



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

MODELACIÓN DEL HÁBITAT POTENCIAL Y NICHOS
ECOLÓGICO DEL DORADO *Coryphaena* spp. EN EL
PACÍFICO MEXICANO

T E S I S

Que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Biología Marina)

P r e s e n t a

EMIGDIO MARÍN ENRÍQUEZ

La Paz, Baja California Sur, enero de 2018

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 11 horas del día 5 del Mes de Diciembre del 2017, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"Modelación del hábitat potencial y nicho ecológico del dorado (*Coryphaena* spp. en el Pacífico Mexicano)"

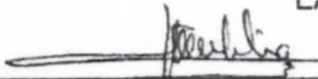

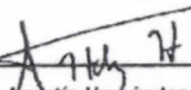


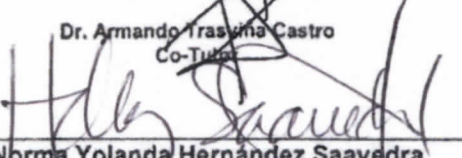
Presentada por el alumno:

Emigdio Marín Enríquez

Aspirante al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN Biología Marina

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

LA COMISIÓN REVISORA

| | |
|--|---|
|  _____ Dr. Arturo F. Muhlia Melo Director de Tesis |  _____ Dr. Andrés Abitia Cárdenas Co-Tutor |
|  _____ Dr. Agustín Hernández Herrera Co-Tutor |  _____ Dr. Enrique Morales Bojórquez Co-Tutor |
|  _____ Dr. Armando Trascuña Castro Co-Tutor | |
|  _____ Dra. Norma Yolanda Hernández Saavedra, Directora de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos | |

COMITÉ TUTORIAL

Dr. Arturo Muhlia Melo

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Director de Tesis

Dr. Andrés Abitia Cárdenas

Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas – IPN
CO-TUTOR

Dr. Agustín Hernández Herrera

Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas – IPN
CO-TUTOR

Dr. Enrique Morales Bojórquez

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
CO-TUTOR

Dr. Armando Trasviña

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Unidad
La Paz
CO-TUTOR

COMITÉ REVISOR DE TESIS

Dr. Arturo Muhlia Melo

Dr. Andrés Abitia Cárdenas

Dr. Agustín Hernández Herrera

Dr. Enrique Morales Bojórquez

Dr. Armando Trasviña

JURADO DE EXÁMEN DE GRADO

Dr. Arturo Muhlia Melo

Dr. Andrés Abitia Cárdenas

Dr. Agustín Hernández Herrera

Dr. Enrique Morales Bojórquez

Dr. Armando Trasviña

SUPLENTE

Dr. Luis Felipe Beltrán Morales

Dr. Jesús Rodríguez Romero

Resumen

El dorado es un pez pelágico altamente migratorio que habita en los océanos tropicales del planeta. En México es capturado estacionalmente por distintos sectores pesqueros, entre los que destacan los sectores deportivo y artesanal. A pesar de su importancia comercial, se conoce poco sobre los mecanismos que regulan la estacionalidad de las capturas de dorado en distintos puertos del Pacífico mexicano. El presente estudio busca aportar información sobre los factores ambientales que influyen en dicha estacionalidad, con el fin de hacer algunas inferencias sobre los patrones migratorios de estos peces. Se analizó una base de datos de diez años de captura incidental de dorado (2004 – 2013), reportado por observadores científicos de la Comisión Inter-Americana del Atún Tropical, a bordo de barcos atuneros que pescan con red de cerco. La base de datos incluyó información tanto cerca de la costa como en aguas internacionales. Se construyó un modelo aditivo generalizado y un modelo factorial de nicho ecológico, para evaluar la influencia que la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés), la concentración de clorofila (Chl-a), la altura del nivel del mar (SSH, por sus siglas en inglés) y la distancia a frentes térmicos (DIST) tienen sobre la captura incidental del dorado. Las capturas mayores se presentaron durante los meses de marzo, junio y octubre, y durante 2004. Se detectaron dos zonas con captura incidental alta, una frente a la costa occidental de la península de Baja California, la cual se volvió más notoria hacia los meses de verano, y otra en una región oceánica (15°N, 120°W), la cual está presente todo el año, pero fue más importante durante los meses de primavera. Los resultados de los modelos sugirieron que el dorado no se distribuye de manera aleatoria en el área de estudio, y que las variables que aportan más a explicar la ocurrencia de estos peces son la SST y la Chl-a. El dorado se encontró principalmente en áreas donde la SST fue entre 23° y 28°C, concentraciones de Chl-a $< 0.2 \text{ mg} \times \text{m}^{-3}$, valores positivos de SSH y DIST $< 10 \text{ km}$, lo que sugiere que estos peces se asocian a ciertas estructuras de mesoescala, como giros y frentes. Los mapas de predicción espacial muestran que el dorado realiza migraciones dentro del área de estudio siguiendo un “corredor” ambiental. Este corredor ambiental fue resultado de una compleja interacción entre distintas características oceanográficas, y conectó la zona del Golfo de Tehuantepec con la Península de Baja California, evitando la alberca de agua cálida del Pacífico Oriental Tropical, pasando por una zona oceánica de abundancia alta.

Vo. Bo.


Dr. Arturo Muhlia Melo

Summary

Dolphinfish are large, highly-migratory pelagic fish that inhabit in all of the world's tropical oceans. In Mexico these fish are targeted mainly by the sport and artisanal fisheries. Despite their commercial importance, little is known about the environmental factors that influence the seasonality of dolphinfish catches in different harbors in Mexico's Pacific coast. This study seeks to identify those factors, with the aim of bring to light these fish's migratory patterns. A 10 year (2004 - 2013) database of dolphinfish incidental catch was analyzed; this database was gathered by scientific observers of the Inter-American Tropical Tuna Commission, on board of tuna purse seiners. Database included both inshore and offshore. Two different approaches were used (Generalized Additive Model and an Ecological Niche Factor Analysis) to elucidate the influence of Sea Surface Temperature (SST), Chlorophyll-a concentration (Chl-a), Sea Surface Height (SSH) and distance to thermal fronts (DIST) had on the spatiotemporal variation of dolphinfish incidental catch. Higher catches were occurred during march, june and october, and during 2004. Two zones of high incidental catch were identified, one near the southwest coast of the Baja California Peninsula, which was more important during summer, and another one in the open ocean (15°N, 120°W), which was present throughout the year, but was more important during spring. Modelling results suggested that dolphinfish are not randomly distributed in the study area, and that SST and Chl-a are the two main environmental variables that determinate dolphinfish occurrence. Higher catches occurred in zones with SST between 23°C and 28°C, with low Chl-a concentrations ($0.2 < \text{mg} \times \text{m}^{-3}$), positive SSH values and $\text{DIST} < 10$ km, which suggests that these fish are associated to certain mesoscale oceanographic structures, such as eddies and thermal fronts. Spatial prediction maps suggested that these fish migrate through the study area following a "migratory corridor" that was a result of a complex interaction between different oceanographic features; this migratory corridor connects the Gulf of Tehuantepec with the Baja California Peninsula, avoids the Eastern Pacific warm pool, running through the high-abundance oceanic zone.

Vo. Bo.



Dr. Arturo Muhlia Melo

Dedicatoria

A mi padres, Dr. José Luis Marín Flores (†) y Dra. Dora Elvia Enríquez Licón. Les debo la vida y este trabajo es parte de ella, *ergo* este logro es suyo. Muchísimas gracias por su apoyo incondicional en todos los aspectos. Son mi más grande admiración.

A mis hermanos, Iván y Óscar. No importa cuántas o cuales diferencias existan entre nosotros, siempre pienso en ustedes, y estoy orgulloso de sus logros. ¡Muchas gracias por todo, hermanos!

A mi abuela (nana) Ma. Elena Licón Cabrera. Gracias por mantener unida a esta familia, sin importar los baches que la vida nos pone enfrente.

A mi familia materna: Max, Gladys, Maritza, José Luis, Javier, Yolanda, Roberto, Fernanda, Vivian, Yeya, Javier, Mario, Pablo, Andrés, Lalo (†), Sergio (†), Pájaro (†). Me vienen a la mente pocas familias tan unidas como la nuestra. Pasa el tiempo y se agranda la distancia, y cada reunión es como si nunca nos hubiéramos alejado. Gracias.

A mi familia de Phoenix: Loren, Mark, Penny, Bella. Gracias por acogerme en su hogar y por la confianza que depositaron en mí para volvernos compadres. Siempre los consideraré mi segunda familia de hogar.

A mi familia de Lagos: Juanita, Roberto “Chino” (†), Memo, Millo, Jorgín, Pancho, Beto, Betín, Carlos, Clara, Carmen, Pepe, Pepito, Iván, Daniela, Emiliano, Fernanda, Nancy, Nancita. Aunque no pasamos juntos tanto tiempo como yo quisiera, siempre están en mi mente. Muchas gracias por todo.

A la familia Olvera Contreras: Jando, Melissa, Gemita, Kenia. Gracias por todas sus atenciones y amistad. Gracias a ustedes tengo mi segundo peldaño al cielo: Gemita. Gracias por su confianza.

A los SpearHunters: Abraham, Taylor, Pepe, Oswaldo, Sinuhe, Toño, Chucho, Tau, Diego, Erick, Cosme. Gracias por esas reuniones de comida, bebida y camaradería, y por esos días en el mar y buceo, donde las historias de pesca y la carrilla nunca faltaron.

A la familia Márquez Alcalá: Luis Martín, Lety, Luisito, Santi (“Nilo”). Gracias por su amistad incondicional, y por su excelente calidad como vecinos.

A los Holguín: Don Carlos, Carlos, Daniel. Gracias por su amistad, por esas tardes de carnes asadas y ceviche, y los días de pesca y playa en el paraje.

Agradecimientos

Al CIBNOR por aceptarme en su programa de posgrado, y por las facilidades otorgadas para utilizar sus instalaciones.

A CONACyT por el apoyo económico (No. de beca 419418), apoyo sin el cual este logro hubiera sido mucho más difícil.

Al personal de posgrado del CIBNOR (Dra. Norma Hernández, Horacio, Tania, Claudia, Osvelia), por facilitar la parte burocrática de mi estancia en el CIBNOR, y por atender siempre con una sonrisa y el mayor afán de ayudar.

A mi asesor, el Dr. Arturo Muhlia Melo, por sus atinados consejos a la hora de guiar este trabajo.

Al comité revisor de tesis por su valioso aporte para mejorar la calidad y forma de la presente tesis: Dr. Enrique Morales Bojórquez (CIBNOR) por su apoyo en la parte numérica y en la parte pesquera, al Dr. Armanto Trasviña (CICESE-ULP) por sus consejos en la parte ambiental, imágenes de satélite, frentes térmicos, etc., a los Dres. Andrés Abitia Cárdenas y Agustín Hernández Herrera (CICIMAR-IPN) por sus aportes en la parte pesquera y sobre todo en la parte biológica, la cual es uno de mis talones de Aquiles.

A los Dres. Xchel Moreno Sánchez y Víctor Hugo Cruz Escalona (CICIMAR-IPN) por tenerme la confianza para invitarme a colaborar con sus alumnos y en sus proyectos.

Al Dr. Javier Seoane, del departamento de Ecología de la Universidad Autónoma de Madrid. Gracias por las enseñanzas sobre modelos de distribución de especies, estadística, programación en general, y por aguantarme en la UAM durante meses.

A los chavales del Laboratorio de Ecología Pesquera y Telemetría de Grandes Pelágicos del CIBNOR: Raúl, Gerardo e Izamar. Gracias por esas mañanas de risas estruendosas y camaradería.

A los amigos cafeseros del CIBNOR: Robert, María (Isariote), Moni, Jonathan, Marce, Zoé, David. Gracias por esas charlas matutinas impregnadas de cafeína, albures y humor negro.

A los *toucheros* del CIBNOR: Milton, Alexia, Hever, Lalo, Ariel, Chava, Ely, Amaury, Oswaldo, Nurens, Itzel. Gracias por las tardes de liberación de estrés en

la cancha, y por uno que otro coraje por competencia deportiva. ¡Ah!, y por esas tardes de liberación de estrés en la ardilla.

Al Dr. Raúl Martínez Rincón, por su invaluable apoyo en cuestiones de programación en R.

A Don Mario Cota, por su apoyo en la logística y realización de salidas de campo.

Contenido

| | |
|--|------------|
| Resumen..... | i |
| Summary..... | ii |
| Dedicatoria..... | iii |
| Agradecimientos..... | v |
| Contenido..... | vii |
| Lista de figuras..... | ix |
| Lista de tablas..... | xii |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 3 |
| 3. JUSTIFICACIÓN..... | 20 |
| 4. HIPÓTESIS..... | 20 |
| 5. OBJETIVOS..... | 21 |
| 6. MATERIAL Y MÉTODOS..... | 21 |
| 6.1 Área de estudio..... | 21 |
| 6.2 Origen de la información..... | 24 |
| 6.3 Tratamiento estadístico..... | 28 |
| 7. RESULTADOS..... | 35 |
| 7.1 Capturas incidentales..... | 35 |
| 7.2 Análisis del esfuerzo..... | 45 |
| 7.3 Ambiente..... | 48 |
| 7.4 Relación entre las variables biológicas y las variables ambientales..... | 68 |
| 7.5 Modelación estadística..... | 74 |
| 8. DISCUSIÓN..... | 84 |
| 9. CONCLUSIONES..... | 104 |

| | |
|-----------------------------------|------------|
| 10. LITERATURA CITADA..... | 106 |
| 11. ANEXOS..... | 116 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Dorado común, <i>C. hippurus</i> . Macho (arriba), macho y hembra (abajo)..... | 2 |
| Figura 2. Esquema migratorio de dorado, propuesto por Oxenford y Hunte (1986), para el Atlántico centro-occidental..... | 16 |
| Figura 3. Mapa de cobertura de la base de datos de capturas incidentales de dorado, provisto por personal de la CIAT..... | 22 |
| Figura 4.- Ejemplo teórico de un biplot, resultado principal de un Análisis Factorial de Nicho Ecológico..... | 34 |
| Figura 5. Variación inter-mensual de la captura incidental de dorado en el Pacífico mexicano..... | 36 |
| Figura 6. Variación interanual de la captura incidental de dorado en el Pacífico mexicano..... | 36 |
| Figura 7. Variación espacial de la captura incidental total de dorado en el Pacífico mexicano, para el periodo comprendido del 2004 al 2013..... | 37 |
| Figura 8. Distribución espacial mensual de la captura incidental de dorado en el Pacífico mexicano..... | 39 |
| Figura 9. Variación temporal de la latitud y la longitud promedio, de los cuadrantes con capturas incidentales altas..... | 41 |
| Figura 10. Variación del número de dorados capturados incidentalmente por la flota atunera, por clase de talla..... | 42 |
| Figura 11. Año tipo de número promedio de dorados capturados por mes, por clases de tallas..... | 43 |
| Figura 12. Capturas anuales promedio, en número de dorados, por clase de talla..... | 43 |
| Figura 13. Serie de tiempo de promedios mensuales de captura incidental de dorado en el Pacífico mexicano..... | 44 |
| Figura 14. Periodograma obtenido mediante análisis de Fourier, para la serie de tiempo de capturas incidentales de dorado..... | 45 |
| Figura 15. Variación estacional del esfuerzo pesquero de la flota atunera que operó en el Pacífico mexicano de 2004 a 2013..... | 46 |
| Figura 16. Variación interanual del esfuerzo pesquero de la flota atunera que operó en el Pacífico mexicano de 2004 a 2013..... | 46 |

| | |
|--|----|
| Figura 17. Distribución espacio-temporal del esfuerzo de pesca de la flota atunera que operó en el Pacífico mexicano de 2004 a 2013..... | 47 |
| Figura 18. Serie de tiempo de esfuerzo pesquero de la flota atunera..... | 48 |
| Figura 19. Variación estacional de temperatura superficial del mar en el Pacífico mexicano..... | 49 |
| Figura 20. Variación interanual de temperatura superficial del mar en el Pacífico mexicano..... | 50 |
| Figura 21. Promedios mensuales de 10 años de imágenes de satélite, de temperatura superficial del mar..... | 52 |
| Figura 22. Variación estacional de la concentración superficial de la Chl- <i>a</i> | 55 |
| Figura 23. Variación interanual de la concentración superficial de la Chl- <i>a</i> | 56 |
| Figura 24. Distribución espacial mensual de la concentración de Chl- <i>a</i> , para el período de 2004 – 2013..... | 58 |
| Figura 25. Variación estacional de la altura del nivel del mar..... | 61 |
| Figura 26. Variación interanual de la altura del nivel del mar..... | 61 |
| Figura 27. Distribución espacial de la altura del nivel del mar. Las líneas continuas y quebradas denotan los valores positivos y negativos de SSH, respectivamente. La línea continua gruesa denota los valores de 0 m. El mes que corresponde a cada imagen se encuentra en el Golfo de México..... | 63 |
| Figura 28. Porcentaje mensual de píxeles considerados como frentes térmicos..... | 65 |
| Figura 29. Distribución espacial de la magnitud del vector gradiente de temperatura. Los contornos denotan el valor calculado de umbral, de $0.12^{\circ} \text{ km}^{-1}$. El mes correspondiente a cada figura se encuentra en el Golfo de México..... | 67 |
| Figura 30. Matriz de correlaciones de Spearman, entre la captura incidental y las variables ambientales..... | 69 |
| Figura 31. Series de tiempo de promedios mensuales de CIPUE y SST..... | 70 |
| Figura 32. Series de tiempo de promedio mensual de captura incidental y concentración de Chl- <i>a</i> | 71 |

| | |
|--|----|
| Figura 33. Serie de tiempo promedio de captura incidental y altura del nivel del mar..... | 72 |
| Figura 34. Serie de tiempo promedio de captura incidental y distancia a frentes térmicos..... | 72 |
| Figura 35. Preferencia espacial y de hábitat del dorado..... | 73 |
| Figura 36. Figuras de efecto del GAM ajustado a los datos de captura incidental..... | 76 |
| Figura 37. Hábitat potencial (probabilidad de ocurrencia) del dorado en el Pacífico mexicano, inferido mediante un GAM de presencia/ausencia..... | 77 |
| Figura 38. Nicho ecológico del dorado (hábitat disponible en puntos negros, y hábitat utilizado en puntos en color) del dorado en el Pacífico mexicano..... | 78 |
| Figura 39. Biplot resultado del ENFA, para la temporada de invierno..... | 79 |
| Figura 40. Biplot resultado del ENFA, para primavera..... | 80 |
| Figura 41. Biplot resultado del ENFA, para verano..... | 81 |
| Figura 42. Biplot resultado del ENFA, para otoño..... | 82 |
| Figura 43. Variación estacional de los valores de Marginalidad y Especialización del dorado en el Pacífico mexicano..... | 83 |

Lista de tablas

Tabla I. Estadística descriptiva del análisis de clases de talla de las capturas incidentales de dorado en el Pacífico mexicano.....42

Tabla II. Resultados del ajuste del modelo aditivo generalizado a la ocurrencia de dorado en el Pacífico mexicano. La devianza residual denota la bondad de ajuste del modelo. En cursivas se denota la variable que fue excluida del modelo final.....75

1. INTRODUCCIÓN

Los peces conocidos comúnmente como dorados son los miembros de la familia Coryphaenidae, la cual comprende un solo género, *Coryphaena*, el cual a su vez comprende dos especies reconocidas: el dorado común *Coryphaena hippurus* (Linnaeus, 1758) y el dorado pámpano *C. equiselis* (Gibbs y Collete, 1959).

La gran mayoría de la literatura científica se basa en el dorado *C. hippurus*; es un pez epipelágico, que habita en los mares tropicales y subtropicales del planeta. Su distribución está regida por la isoterma de 20° C, encontrándosele en una extensa área geográfica, la cual va de los 40° N a los 40° S, aproximadamente (Palko *et al.*, 1982). Es un depredador rápido y voraz; presenta además una alta capacidad de dispersión, lo que lo hace capaz de realizar migraciones considerables (Alejo-Plata *et al.*, 2011).

Al contrario de *C. equiselis*, los organismos adultos de esta especie presentan un dimorfismo sexual marcado: los machos tienden a ser más grandes, y, a diferencia de las hembras, desarrollan una cresta frontal (Fig. 1), la cual se torna casi vertical en organismos en edades adultas avanzadas (Palko *et al.*, 1982). Esta ausencia de dimorfismo sexual en *C. equiselis* tiene como consecuencia que los especímenes de esta especie sean confundidos con juveniles de *C. hippurus* (Massutí, 1997).

Se cree que el dorado presenta una segregación espacial por tallas, debido a que varía su estrategia alimenticia a lo largo de su ciclo de vida. Las hembras y los machos de edad corta prefieren zonas más cercanas a la costa, en donde encuentran refugio bajo mantos de sargazo u objetos flotantes, con los cuales se asocian frecuentemente ya que son lugares de una gran diversidad y abundancia de peces pequeños y otros organismos que sirven de alimento a hembras y juveniles (Manooch *et al.*, 1984; Rose y Hassler, 1974; Uchida y Uchiyama, 1896). Los machos adultos, por otra parte, habitan en zonas más oceánicas, en donde se

alimentan de presas de mayor tamaño, quizá debido a que su metabolismo es más elevado que el de las hembras y los juveniles (Rose y Hasler, 1974).

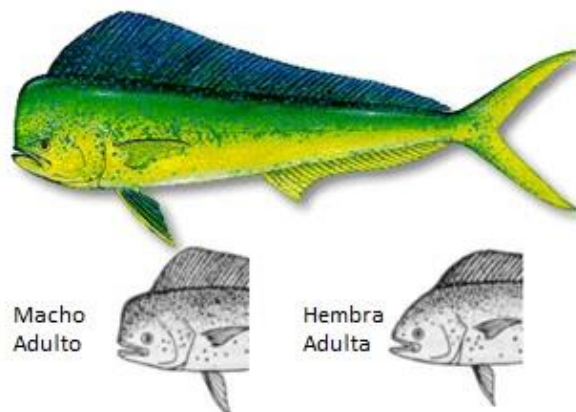


Figura 1. Dorado común, *C. hippurus*. Macho (arriba), macho y hembra (abajo). Tomado de www.belizefishfinder.com.

Debido a su capacidad migratoria, el dorado parece ser un recurso que se presenta de manera estacional en las distintas zonas geográficas en donde se le captura. Por ejemplo, en aguas cercanas a la Isla española de Mallorca, en el Mediterráneo oriental, el dorado es capturado por la flota artesanal de finales de agosto a principios de diciembre (Massutí y Morales-Nin, 1997; Massutí *et al.*, 1998), mientras que en las costas de Florida, E.U.A., se le captura principalmente de mayo a agosto (Oxenford y Hunte, 1986).

En el Océano Pacífico, el dorado es explotado por flotas artesanales ecuatorianas, las cuales reportan que las máximas capturas ocurren entre los meses de noviembre y mayo (Patterson y Martínez, 1991). Para el caso del área de estudio, en el Golfo de Tehuantepec, al sur de México, las capturas más altas se presentan durante los meses de octubre – noviembre y marzo – abril, mientras que en los meses cálidos (junio – agosto), el recurso “desaparece” de las capturas de la flota artesanal (Alejo-Plata *et al.*, 2011). Por otro lado, en el Pacífico central de México (costas de Jalisco y Colima), las mayores abundancias de dorado ocurren durante los meses de noviembre – enero (Carrasco-Águila *et al.*, 2012),

mientras que en la región de Los Cabos, B.C.S., los picos de capturas máximas ocurren en los meses de verano y otoño (Zuñiga-Flores *et al.*, 2011).

En México, el dorado es un recurso destinado por ley exclusivamente a la pesca deportiva, en una franja de 50 m.n. a partir de la línea de costa (NOM-017-PESC-1994). Sin embargo, en algunos puertos del Pacífico mexicano puede llegar a representar cerca del 50% de la captura incidental de la pesca de la flota artesanal (Beltrán, 1995; Damián-Guillén *et al.*, 2010), especialmente en las costas de Oaxaca y Chiapas, donde la temperatura superficial del mar es mayor a 26°C a lo largo del año (Alejo-Plata *et al.*, 2011; Santana-Hernández *et al.*, 2009).

El dorado es un recurso de gran interés comercial, debido al alto valor comercial que alcanza, gracias a la calidad y excelencia de su carne (Carrasco-Águila *et al.*, 2012). Dadas sus características biológicas (alto crecimiento, fecundidad y mortalidad natural y baja talla de primera madurez), se ha sugerido que el dorado podría soportar una pesquería comercial dirigida (Kraul, 1999; Zuñiga-Flores, 2009). Sin embargo, el conocimiento científico aún es escaso, y resulta de crucial importancia a la hora de elaborar planes de manejo para realizar una explotación racional del recurso. En este contexto, en el presente trabajo se aportará al conocimiento de la dinámica poblacional del recurso, analizando la captura incidental del dorado, reportada por la flota atunera de cerco que operó en el Pacífico mexicano de 2004 a 2013, con el fin de hacer inferencias sobre los movimientos migratorios del dorado en el área de estudio.

2. ANTECEDENTES

2.1 Reproducción

Diversos autores han estudiado aspectos reproductivos del dorado, en distintas partes del mundo. Massutí y Morales-Nin (1997) analizaron 410 organismos provenientes de aguas aledañas a la Isla de Mallorca, en el

Mediterráneo occidental; la proporción sexual fue 1:1 a lo largo de todo el año, con excepción del mes de diciembre, y que no existió una relación entre el índice hepatosomático ni el factor de condición con la temporada reproductiva de la especie. Se reporta una L_{50} de 54.5 y 61.8 cm para hembras y machos, respectivamente. Se reporta también que las hembras presentaron al menos dos grupos de ovocitos en sus ovarios, por lo que se concluyó que el dorado desova en múltiples ocasiones a lo largo del año.

Castro *et al.* (1999) estudiaron el crecimiento y la reproducción de ambas especies de dorado en aguas cercanas a las Islas Canarias, España, en el Atlántico centro-oriental. Las hembras de *C. hippurus* dominaron la proporción sexual (1:1.4) durante todo el año, aunque las diferencias no fueron significativas; sin embargo, en el mes de junio se presentaron los valores máximos (mínimos) del índice gonadosomático (factor de condición), por lo que se sugiere que en esta región, esta especie se reproduce durante los meses de verano.

Para el caso del Océano Pacífico, Wu *et al.* (2001) describió la biología reproductiva de *C. hippurus* en organismos capturados en la costa oriental de Taiwán. Los autores reportaron que las hembras dominaron en un 65% durante todo el período de estudio, y que los ovocitos se encontraban maduros al alcanzar 1 mm de diámetro. Se estimó una talla poblacional de primera madurez (L_{50}) de 51 cm para ambos sexos, encontrándose un pico en la actividad reproductiva durante los meses de febrero – marzo. Se reporta que los organismos que desovan en esta zona migran desde otras áreas.

En lo que al Pacífico mexicano se refiere, Alejo-Plata *et al.* (2011) estudió los aspectos reproductivos del dorado capturado en Golfo de Tehuantepec, al sur de México. Se reportó una talla de primera madurez poblacional de ~ 50 cm para ambos sexos, y una proporción sexual (M: H) de 1:1 para la mayor parte del año, con excepción de abril-mayo (1:1.45) y noviembre (1:1.5). Se reporta que en esta zona el dorado desova a lo largo del año, encontrándose picos máximos en los

desoves de mayo-julio y noviembre-enero, lo cual quizá se debe a una migración de este recurso a esta zona de pesca. La actividad reproductiva coincide con la época de vientos en choro, conocidos como “Tehuano”.

En uno de los pocos trabajos sobre la biología reproductiva de *C. equiselis*, Zuñiga-Flores *et al.* (2011) analizaron las gónadas de 12 individuos capturados en el Pacífico central mexicano, reportando que esta especie es desovadora parcial, y que es capaz de desovar varias veces en una temporada. De igual forma se reportó que la especie presenta unas características reproductivas similares a *C. hippurus*, y que la zona de estudio pudiera ser una importante zona de reproducción de *C. equiselis*.

En la región sur del Golfo de California, México, Zuñiga-Flores *et al.* (2011) estudiaron la dinámica reproductiva de *C. hippurus*, utilizando datos de desembarcos tanto de pesca deportiva, como de pesca artesanal, en un período comprendido entre 2004 y 2006. Se reporta que el aumento en las tasas de captura coincide con un aumento actividad reproductiva, lo cual a su vez coincidió con un incremento en la temperatura superficial del mar (~ 26 - 30°C) en los meses de verano - otoño. Se reporta que las hembras presentaron un desarrollo gonadal asincrónico. La talla de primera madurez promedio se estimó en ~ 80 cm, mientras que la proporción sexual no fue estadísticamente distinta a 1M: 1H.

De acuerdo a la evidencias presentadas, se puede inferir que el dorado, si bien en algunas zonas se reproduce a lo largo del año, muestra una preferencia por ciertas condiciones ambientales y biológicas para realizar sus desoves; de igual forma, el período de desove parece durar varios meses. La talla de primera madurez varía entre regiones, pero al parecer la especie alcanza su madurez sexual a edades tempranas, las cuales corresponden a tallas entre 50 y 80 cm.

2.2 Alimentación

Massutí *et al.* (1998) estudiaron los hábitos alimenticios del dorado en el Mediterráneo occidental. Se reportó que los peces teleósteos contribuyeron con la mayor parte de la dieta de la especie; sin embargo, se encontraron diferencias en los espectros tróficos entre las distintas clases de tallas: para el caso de los adultos, los cefalópodos aportaron un porcentaje importante de la dieta, mientras que los crustáceos lo hicieron para los organismos juveniles. Se concluyó que el dorado es un depredador poco selectivo, el cual se alimenta principalmente de especies epipelágicas.

Oxenford (1999) realizó una revisión de distintos aspectos biológicos del dorado en el Océano Atlántico centro-occidental, entre los que se incluyen algunos aspectos alimenticios. En este trabajo se reportó que los peces de las familias *Balistidae*, *Carangidae*, y *Exocotidae*, junto con algunas especies de cefalópodos, se constituyeron como la principal de la dieta del dorado en las aguas costeras del Golfo de México, de Carolina del Norte (E.U.A), y las aguas de la corriente del golfo. Por otra parte, los peces de la familia *Dactylopteridae*, además de las mencionadas anteriormente, conformaron parte importante de la dieta del dorado en aguas cercanas a Barbados, en el Atlántico/Caribe. En el trabajo se concluyó que el dorado es un depredador oportunista, y que las diferencias geográficas en su espectro trófico pueden deberse a la disponibilidad de las presas en las distintas zonas.

Para el Océano Pacífico occidental, Sakamoto y Kojima (1999) reportaron que, en aguas adyacentes a Japón, los peces fueron, por mucho, la principal dieta del dorado, aportando el 86.7% del total de presas registradas y el 98.4% del total del peso de las presas ingeridas. De estos, los peces de la familia *Clupeidae* (*Sardinops melanostictus*, *Etrumeus teres* y *E. japonicus*) fueron los más importantes, ya que se encontraron en ~68% de los estómagos analizados. Se mencionó también que se presentaron diferencias ontogénicas en los hábitos alimenticios del dorado, ya que el tamaño de la presa fue proporcional a la talla del depredador. Se reportó también diferencias diurnas en los hábitos de

alimentación, ya que el dorado parece ser un depredador más activo durante la mañana. A pesar de que se reportaron ligeras diferencias estacionales en los hábitos alimenticios, los autores concluyeron que no existieron diferencias significativas, por lo que concluyeron que el dorado es un depredador oportunista.

En el Pacífico central mexicano, Amezcua-Gómez (2007) estudió las relaciones tróficas entre el dorado y el pez vela (*Istiophorus platypterus*) en las aguas costeras de los estados de Jalisco y Colima, en muestras obtenidas durante torneos de pesca deportiva, en un período comprendido entre 2002 y 2004. En este trabajo se reportó que fueron tres los grupos que representaron la mayor parte de la dieta del dorado: peces, cefalópodos y crustáceos, siendo las presas más representativas *Argonauta cornuta* (28%), *Portunus xantussi* (22%) y *Lagocephalus lagocephalus* (19%). Al contrario de lo reportado por otros autores, en este trabajo se determinó con base al análisis de amplitud de nicho trófico, que el dorado es un depredador especialista, ya que consume en un alto porcentaje un número reducido de especies presa

Para la región del sur del Golfo de California, Aguilar-Palomino *et al.* (1998) estudió el espectro trófico del dorado desembarcado de 1990 a 1991 en La Paz y Cabo San Lucas, B.C.S. Los autores reportaron que existieron diferencias en la dieta entre ambas zonas, ya que el dorado en la bahía de La Paz se alimentó principalmente del calamar gigante *Dosidicus gigas* y del pez *Decapterus muroandsi*, mientras que en Cabo San Lucas sus principales presas fueron los peces balistidos *Balistes polylepis* y *Canthidermis maculatus*, la langostilla *Pleuronocodes planipes* y el calamar *D. gigas*. Se reportó también que el dorado tiene interacción con la mayoría de niveles de la red trófica de la región, ya que se alimenta tanto de organismos filtradores como de consumidores secundarios y terciarios; así mismo, el dorado se alimentó en gran parte de la columna de agua, ya que consumió organismos neríticos y oceánicos de hábitat epipelágico, mesopelágico y bentónico. Otro resultado importante fue que el dorado de tallas

más grandes se alimentó principalmente de peces, mientras que los organismos de tallas menores se alimentaron preferentemente de cefalópodos.

En un trabajo más reciente, para la misma región sur del Golfo de California, Tripp-Valdéz *et al.* (2010), estudiaron la ecología trófica del dorado, utilizando estómagos de organismos desembarcados por las flotas deportiva y artesanal durante los años de 2000, 2001 y 2003 en Cabo San Lucas, B.C.S., y Mazatlán, Sin. Se reportó que en Cabo San Lucas el 24% de los estómagos se encontraron vacíos, mientras que en Mazatlán sólo el 10% no contenían alimento. Con base a los resultados obtenidos con el índice de importancia relativa, la langostilla *P. planipes* fue la presa más importante en 2000 y 2001 en Cabo San Lucas (> 70%), mientras que durante el 2003 lo fue el calamar gigante *D. gigas* (63%), seguido de la langostilla (25%).

Por su parte, en Mazatlán, el crustáceo *Hemisquilla ensigera californiensis* fue la presa que explicó la mayor parte de la dieta del dorado (>64%) en los años 2001 y 2003, siendo el pez *Hemiramphus saltator* la presa más importante (24%) durante el 2000. Se reportó también que, aunque el análisis de amplitud de nicho arrojó que este organismo es un depredador selectivo, se le puede considerar como un depredador oportunista, debido al amplio espectro trófico encontrado en ambas áreas. Entre ambas áreas, la sobre posición geográfica fue baja, por lo que el autor sugiere que las diferencias encontradas se deben más a la abundancia y distribución de las presas, que a la preferencia del dorado como depredador.

Con base a los antecedentes sobre hábitos alimenticios y ecología trófica del dorado, se sabe con certeza que en distintas partes del mundo el dorado se alimenta de diferentes especies presas, lo cual parece depender de la abundancia y disponibilidad de las mismas. Asimismo se presenta una diferencia en los hábitos alimentarios por tallas, en donde los dorados de tamaño mayor consumen presas más grandes. De manera general, el dorado parece se puede categorizar

como un depredador oportunista, ya que se alimenta de un diverso espectro de especies presa.

2.3 Edad y Crecimiento

Massutí *et al.* (1999) describieron la microestructura del otolito sagitta, con el fin de determinar patrones de crecimiento del dorado en el Mediterráneo occidental. En este trabajo se obtuvieron los otolitos de dorados de distintas edades, desde larvas hasta adultos. Se reportó que, mediante la relación longitud-*peso*, se detectó que las hembras presentaron un crecimiento alométrico negativo, mientras que los machos presentaron un crecimiento isométrico. También se señaló que las marcas de crecimiento en esta especie se depositan diariamente, pero que este tipo de estructuras calcáreas aumenta, al menos en esta especie, de complejidad conforme el organismo se hace adulto, por lo que un conteo erróneo de marcas podría llevar a una subestimación de la edad. Asimismo se reportó una talla máxima promedio (L_{inf}) de 72.4 cm para juveniles no sexados, y de ~100 cm para el resto de los organismos. Por otro lado, los parámetros de crecimiento k que se registraron fueron de 2.5 a 1.90 para organismos no sexados y el resto, respectivamente. Los autores sugirieron que el hecho de que el crecimiento haya resultado ser alométrico para hembras e isométrico para machos se debe a que a cierta edad (talla), los machos desarrollan una cresta frontal, y que si bien existieron diferencias en los parámetros de crecimiento (debido a que se utilizaron técnicas distintas), el panorama de ambos resultados es similar.

Para el Océano Atlántico occidental, Schwenke y Buckel (2008) estudiaron la edad y crecimiento del dorado capturado en las costas de Carolina del Norte, E.U.A. En este trabajo se utilizaron escamas (marcas anuales) y otolitos sagitta (marcas diarias), obtenidos de ejemplares desembarcados de mayo del 2002 a mayo del 2004. En este trabajo se reportaron unos parámetros de crecimiento de $L_{inf} \sim 130$ cm y $k \sim 1.08 \times \text{año}^{-1}$, registrándose un crecimiento estimado de $3.78 \text{ mm} \times \text{día}^{-1}$, valores comunes para organismos piscívoros pelágicos. Los autores

demonstraron que las marcas anuales en las escamas se depositaron durante el invierno, lo cual reflejó el decremento estacional de la temperatura superficial del mar y fue corroborado con un estudio de marcado.

Los autores sugirieron que la escama fue la mejor estructura dura para realizar estudios de edad y crecimiento, ya que los resultados son comparables con otros estudios, que son más comunes, en donde se utilizó esta estructura. La edad máxima reportada coincidió con lo reportado por otros autores (~ 3 – 4 años), mientras que se registró que no se detectaron cambios notorios en la edad a cierta talla, a pesar del notorio aumento en las capturas de esta especie.

Sakamoto y Kojima (1999) realizaron una revisión de datos biológicos y pesqueros del dorado capturado en aguas cercanas a Japón, en el Océano Pacífico occidental. Este trabajo abordó brevemente el tema de edad y crecimiento; se reportó que en esta región el dorado alcanza tallas de 38, 68, 90, 108 y 122 cm de longitud furcal durante su primer, segundo, tercer, cuarto y quinto año de vida, respectivamente. Sin embargo, los autores señalaron que estudios de crecimiento que se han realizado en dorados mantenidos en acuarios revelan que bajo estas condiciones los dorados crecen más rápido, pudiendo aumentar de 50 cm y 0.5 kg a 123 cm y 16.6 kg en un plazo aproximado de nueve meses. También se reportó que las mayores tallas de captura empiezan a incrementar a principios de junio (>60 cm), y que de agosto en adelante las tallas fueron usualmente menores a 50 cm. Los autores sugirieron que esta variación estacional se debió a que el área de estudio es utilizada simultáneamente tanto por organismos en etapa reproductiva (de tallas grandes) como por organismos juveniles (talla pequeña), que emplean la región como área de alimentación y crecimiento.

En el Pacífico sur de México, Alejo-Plata *et al.* (2011) evaluaron la edad y el crecimiento en escamas de 266 dorados desembarcados por la flota artesanal en la zona del Golfo de Tehuantepec. Las tallas de los organismos muestreados

fueron de 20 a 140 cm de longitud furcal (LF). El análisis de la relación longitud-peso arrojó que los machos crecen de manera alométrica positiva, caso contrario de lo que ocurre con las hembras. Los parámetros de crecimiento de la ecuación de von Bertalanffy fueron $L_{inf} = 126.29$ y 125.82 cm, $k = 1.0$ y 0.955 año⁻¹ y $t_0 = -0.0385$ y -0.037 años para machos y hembras, respectivamente, sin encontrarse diferencias significativas en el crecimiento entre sexos.

Los autores corroboran lo presentado en otros trabajos: las escamas presentan marcas de crecimiento anuales, las cuales se forman en los meses en los que la temperatura del agua es menor. En este trabajo, las marcas de crecimiento se formaron entre abril y mayo, lo cual puede atribuirse a los cambios en el metabolismo causados por la madurez gonádica y los gastos energéticos asociados a la actividad reproductiva. Al igual que en otros trabajos, se reportó que el dorado es un organismo que crece de manera acelerada, tanto en talla como en peso. Se sugiere también que probablemente el parámetro de L_{inf} esté subestimado, ya que la flota artesanal parece incidir sobre organismos de tallas pequeñas; al respecto, se menciona una longevidad estimada de al menos 4 años para la especie, la cual podría llegar a vivir hasta 5 años, edades (y tallas) que no son capturadas por la flota artesanal.

Peralta-Bravo (2006) realizó un estudio comparativo de edad y crecimiento de dorado, para evaluar las posibles diferencias en los parámetros de crecimiento de dorados capturados en sus límites norte (Cabo San Lucas, B.C.S., México), y sur (Esmeraldas, Ecuador). Se utilizaron dos diferentes métodos indirectos de estimación de los parámetros: ELEFAN I y NSLCA, los cuales utilizan la frecuencia de distribución de tallas. Se reportó que las tallas fueron, de manera general, mayores en Ecuador que en Cabo San Lucas (33-142 cm LF en Cabo San Lucas y 41.1-157.5 cm LF en Esmeralda), encontrándose diferencias en los parámetros estimados: para Cabo San Lucas, se encontró una $L_{inf} = 160$ cm y una $k = 0.65$ año⁻¹ con ELEFAN I, y una $L_{inf} = 162$ cm y $k = 0.85$ año⁻¹ con NSLCA, mientras que para Esmeralda, ELEFAN I arrojó una $L_{inf} = 161$ cm y $k = 0.40$ año⁻¹, y una L_{inf}

=167 y $k = 1.30 \text{ año}^{-1}$ con NSLCA. También se señaló que se midió la robustez de las estimaciones mediante la técnica de *bootstrapping*, encontrándose que la técnica de NLSCA fue la más adecuada de las dos técnicas utilizadas. El autor sugirió que las diferencias en los parámetros de crecimiento entre ambas zonas parecen estar relacionadas a las respuestas de los organismos a ambientes distintos, sin descartar la posibilidad de factores biológicos externos (por ejemplo, las diferencias en los períodos reproductivos que presenta la especie en ambas zonas), o incluso factores humanos, los cuales podrían afectar la estructura de las distintas fuentes de información.

Zuñiga-Flores (2009) estudió varios aspectos de dinámica poblacional del dorado en la región de Baja California Sur, al sur del Golfo de California. En el trabajo se analizó el crecimiento individual en talla y en peso, utilizando un método directo (lecturas escamas) de 497 individuos, colectados de los desembarcos de flotas tanto deportivas como comerciales. De manera general, se reportó un crecimiento alométrico negativo, tanto para machos como para hembras. Para el caso del crecimiento individual, el modelo de von Bertalanffy se ajustó a distintos sets de datos: uno en los que se incluyeron únicamente los valores observados, y otro donde se incluyeron valores de tallas de larvas, reportados en la literatura. Se señaló que las diferencias en el crecimiento entre machos y hembras fueron más notorias cuando se incluyeron los valores de larvas, ya que en organismos de ~ 1 año (> 80 cm de Longitud Furcal), la gran mayoría de organismos muestreados fueron machos. Los parámetros de crecimiento mostraron notorias diferencias al incluir los datos de larvas, siendo éstas diferencias más notorias en los valores de los parámetros k y t_0 , ya que se presentaron diferencias de entre 3 y 4 órdenes de magnitud para k (de ~ 0.4 a 1.4 años^{-1} sin y con los valores de larvas, respectivamente) y de entre 7 y 8 órdenes de magnitud para T_0 (~ 0.85 a ~ 0.10 años con y sin valores de larvas, respectivamente). Se concluyó que ambas flotas inciden principalmente sobre organismos de entre 0.5 y 1.5 años de edad. Para el caso del crecimiento en peso, se mencionó que los organismos de ambos sexos

crecen de manera similar en edades menores y hasta 0.5 años; sin embargo, después de esa edad y hasta las edades máximas encontradas (~ 3.5 años), el crecimiento de los machos fue notoriamente mayor que el de las hembras, lo cual se vio reflejado en el peso máximo promedio (W_{inf} ~ 8 y 15 kg para hembras y machos, respectivamente). Al igual que en otros trabajos, se reportó una tasa de crecimiento acelerada durante los primeros (~ 6) meses de vida, ya que los dorados alcanzaron entre el 40 y el 60 % de su talla máxima durante ese período.

2.4 Genética

Se han realizado diversos estudios de genética de poblaciones del dorado alrededor del mundo. Pla y Martí-Pujolar (1999) analizaron la homogeneidad genética de la especie en el Mediterráneo occidental y el Atlántico oriental. Los autores obtuvieron muestras de corazón, hígado y músculo de 735 dorados juveniles, capturados en la zona de Isla Mallorca, España y Sicilia, Italia en el Mediterráneo y las Islas Canarias, España, en el Atlántico. Utilizando la técnica de análisis de proteínas por electroforesis, los autores concluyeron que la variación genética fue similar a estudios reportados para otros pelágicos altamente migratorios, y que las diferencias encontradas entre las distintas localidades no fueron significativas, por lo que no se pudo rechazar la hipótesis de que el dorado, dentro del área estudiada, pertenece a una población panmíctica. Los autores plantearon que esta conclusión debe ser corroborada utilizando otros marcadores genéticos, como el ADN mitocondrial o microsatélites.

En el Océano Pacífico centro-oriental, Rocha-Olivares *et al.* (2006) analizaron la estructura genética del dorado en el distintas poblaciones del Océano Pacífico, utilizando el gen mitocondrial NADH1. Las muestras se obtuvieron de desembarcos de pesca deportiva en Baja California Sur (Los Cabos, La Paz y Punta Lobos) y Mazatlán, Sin., en México, y de un mercado de pescado en Oahu, Hawaii. En este trabajo se reportó que existe una heterogeneidad

genética significativa entre las distintas localidades de estudio, lo que pudiera significar que existen distintas poblaciones de dorado en el área estudiada.

Para el caso del área de estudio (Pacífico mexicano), son tres los trabajos que se han efectuado sobre el tema de la genética de poblaciones de dorado. Díaz-Jaime *et al.* (2006), al igual que Rocha-Olivares *et al.* (2006), estudiaron la estructura genética del dorado, utilizando la subunidad 1 del NADH mitocondrial. Para ese trabajo se obtuvieron muestras de músculo de dorado de Sonora, Sinaloa y Baja California Sur, en el Golfo de California, y de Chiapas, en el Golfo de Tehuantepec. Para el caso de Baja California Sur y Chiapas, se obtuvieron muestras en distintos años (2002 y 2003 en B.C.S., y 2003-2005 en Chiapas). Utilizando un total de 177 muestras, los autores reportaron que no hubo diferencias significativas ni entre localidades, ni entre años en aquellas localidades en las que se obtuvieron muestras en distintos años. Los autores sugirieron que la conectividad entre individuos de distintas áreas puede ser la causa de que no se encontraran diferencias significativas entre las localidades de estudio; sin embargo, también mencionaron que fenómenos de escalas temporales mayores (como épocas de glaciación) también puede haber afectado la demografía histórica de la especie.

Rosales-Morales (2007) utilizando organismos desembarcados de distintas pesquerías de tres localidades en el sur del Golfo de California (La Paz y Los Cabos en B.C.S. y Mazatlán, en Sinaloa) y 5 localidades en el Pacífico mexicano al sur (4 en Oaxaca y 1 en Chiapas), estudió la variación en el gen de la hormona de crecimiento en dorado. Se reportó que se encontraron dos grupos con características genéticas similares, uno que incluye a los organismos capturados al norte del área de estudio (sur del Golfo de California) y en Puerto Ángel, Oax., y otro que incluye las regiones centro y sur del Golfo de Tehuantepec. El autor concluye que las capturas en el Pacífico mexicano inciden sobre al menos dos stocks de dorado, y que la región del Golfo de Tehuantepec podría ser una zona de transición entre ambos stocks.

Por otro lado, Tripp-Valdéz *et al.* (2010) analizaron 5 microsatélites para definir la estructura genética poblacional del dorado en el Golfo de California y aguas cercanas. En este trabajo se analizaron > 700 muestras de tejido muscular durante los años de 2005 y 2006. Los autores reportaron que, aunque se detectaron ligeras diferencias en la estructura genética de los dorados estudiados, éstas no fueron lo suficientemente contundentes como para definir distintas agrupaciones; por lo tanto, siguiendo el concepto de stock que asegura que dos stocks son grupos genéticamente aislados uno de otro, se concluyó que en la región de estudio el dorado compone una población panmíctica con alta variabilidad genética, lo cual ha sido reportado para otras especies de hábitos similares.

Con base al análisis de los anteriores estudios de genética del dorado, es evidente que existen puntos de vista contrastantes ya que unos autores aseguran que se trata de una sola población, mientras que otros aseguran que existen diferencias en las estructuras genéticas de organismos capturados en distintos puertos pesqueros. Pareciera ser entonces que los diferentes resultados pudieran deberse a las distintas técnicas utilizadas, por lo que los resultados de estos estudios deben ser interpretados con cautela.

2.5 Migraciones y relación recurso-ambiente

En la actualidad existe un número muy bajo de trabajos publicados sobre las migraciones y la relación recurso ambiente del dorado, especialmente hablando del área de estudio en la que se desarrolla la presente tesis. Aunque varios autores tratan superficialmente el tema, el único trabajo donde se plantea formalmente un esquema migratorio para el dorado es el de Oxenford y Hunte (1986) para el Océano Atlántico centro-occidental. Los autores, utilizando datos de estacionalidad de capturas, propusieron que en su área de estudio existen dos poblaciones de dorado, un stock al noroeste y otro al sureste de las Islas Vírgenes (Fig. 2). Ambos stocks migran hacia el norte siguiendo la costa, para después

abrirse a aguas oceánicas, por las cuales se desplazan hasta llegar a las Islas Vírgenes, y empezar de nuevo su migración al norte. Estos autores sugieren que la dinámica poblacional de los dos stocks es diferente, ya que los organismos del stock del sur crecen más rápido, tienen una mayor talla de primera madurez, tienen una fecundidad menor y ponen huevos de menor tamaño que los del stock del norte. De igual forma, mediante la técnica de electroforésis, se encontraron diferencias en las frecuencias alélicas de organismos capturados en Miami (E.U.A) y Barbados, lo que corrobora el esquema propuesto de al menos dos stocks.

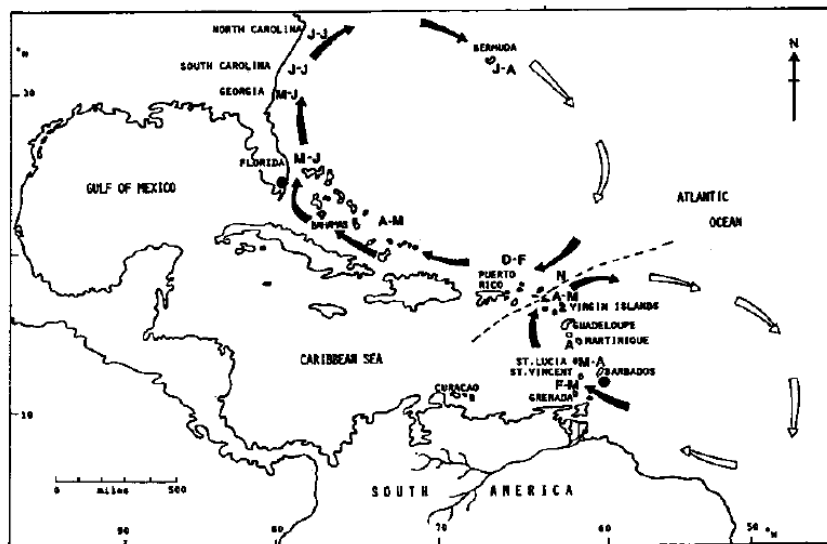


Figura 2. Esquema migratorio de dorado, propuesto por Oxenford y Hunte (1896) para el Atlántico centro-occidental. Las flechas rellenas indican regiones en donde se tuvieron datos, y las flechas vacías indican la migración propuesta, en regiones donde no se tuvieron datos (Tomado de Oxenford y Hunte, 1896).

Utilizando datos pesqueros de flotas de Estados Unidos y Venezuela, Kleisner (2008) analizó la relación que guarda la abundancia relativa del dorado (captura por unidad de esfuerzo, CPUE) con el medio ambiente en el Golfo de México. Utilizando distintas técnicas de estadística multivariada, (Análisis de Componentes Principales, Modelos Lineales Generalizados, etc.), la autora

reportó que el dorado tiene preferencias ambientales y espaciales definidas: de manera general, es más probable encontrarle en aguas con temperaturas superficiales del mar elevadas, cerca de frentes oceánicos, aguas poco profundas y en zonas cercanas a la costa. Asimismo se reportó que se pueden determinar patrones espaciales de abundancia de dorado, los cuales estarían asociados a variaciones ambientales locales.

Farrell (2009) estudió la preferencia de hábitat, movimientos y cuestiones de manejo del dorado en el Atlántico nor-occidental, Golfo de México y Mar Caribe, utilizando datos de marcado y recaptura de un programa a largo plazo. A la fecha de la elaboración del trabajo, cerca de 8,500 organismos habían sido marcados con etiquetas convencionales; de esos, se recapturaron un total de 250 individuos, aproximadamente. Para evaluar la relación que los movimientos del dorado guardan con el ambiente, el autor utilizó tanto datos *in-situ* (provistos a la hora de marcar, y en su caso, a la hora de recaptura) como datos inferidos mediante sensores remotos.

Para cuantificar dicha relación, se utilizó una aproximación de modelado que requiere únicamente datos de presencia, técnica que se conoce como análisis factorial de nicho ecológico (ENFA, por sus siglas en inglés). El autor reportó que los movimientos del dorado presentaron una notoria sensibilidad espacial a cambios de temperatura y Chl-a, y que la gran mayoría de observaciones ocurrieron en temperaturas de 20° - 34° C, concentraciones de Chl-a menores a 0.5 mgxm⁻³ y dentro de 50 km de la plataforma continental. Los movimientos de esta especie son descritos por el autor como complejos, reportándose que, a pesar de que el dorado tiene un período de vida relativamente corto (en comparación con otros pelágicos mayores, ~ 4 años), es capaz de atravesar varias zonas de jurisdicción de distintas naciones, encontrándose organismos que migraron desde la costa de Colombia hasta las costas de Florida, en E.U.A.

En el Océano Pacífico, Lasso y Zapata (1999) estudiaron algunos aspectos biológico-pesqueros del dorado en aguas del Pacífico colombiano y costas de Panamá. Si bien el trabajo estuvo más enfocado a cuestiones biológicas (como la reproducción y la alimentación), el tema de la estacionalidad y las migraciones fue abordado brevemente. Estos autores reportaron una estacionalidad marcada de las capturas de dorado, encontrándose los picos máximos durante los meses de diciembre a abril, lo cual denotó una migración estacional de la especie. Durante esta misma época, los índices de reproducción (índices gonadosomático y hepatosomático y proporción sexual) mostraron los valores más elevados de todo el año, por lo que los autores concluyeron que las migraciones del dorado en su área de estudio están relacionadas con el comportamiento reproductivo de la especie.

Kraul (1999) estudió la estacionalidad del dorado en el Pacífico tropical y aguas cercanas a Hawái, utilizando datos pesqueros y muestreos en mercados de subastas de peces. En el trabajo se reportó que los desembarcos de Hawái presentan dos modas a lo largo del año, una durante los meses de febrero-abril, y otra durante agosto-noviembre. El autor reportó que estos dos períodos de capturas altas coincidieron con la “migración” estacional de la isoterma superficial de 23°C (lo cual pudiera interpretarse como que el dorado migra hacia su área de estudio en los meses de abundancias altas); sin embargo, también coincidieron con factores reproductivos de la especie, por lo que las variaciones en la abundancia relativa (capturas) pudieran ser una función de sobrevivencia de cohortes, ya que parece ser que el dorado se reproduce más intensamente durante ciertas épocas del año, o bien las cohortes desovadas en ciertos meses del año (julio) parecen tener ser más fuertes más que aquellas desovadas durante el resto del año.

Uno de los pocos trabajos sobre la relación recurso-ambiente del dorado en el Pacífico Oriental Tropical es el de Norton (1999). En ese trabajo, el autor reportó que en ciertas épocas, las capturas de dorado en el sur de California, E.U.A

(región donde el dorado rara vez se captura) presentaban valores anómalamente altos. Este comportamiento “raro”, asegura el estudio, se debe a que el hábitat del dorado en el océano Pacífico se extiende cuando ocurren ciertas condiciones oceanográficas: la baja presión atmosférica del Pacífico subtropical disminuye, lo que trae como consecuencia un decremento en la intensidad de los vientos que fluyen paralelo a la costa de Norteamérica; esto a su vez ocasiona un aumento en el transporte de aguas cálidas del sur al norte, lo que se ve reflejado en temperaturas superficiales del mar elevadas en California. Debido a estos resultados, el autor concluye que las barreras físicas del hábitat preferencial del dorado se expanden bajo ciertas condiciones climáticas/oceanográficas, lo que se ve reflejado en una disponibilidad alta del recurso a pescadores recreativos del sur de California.

Zuñiga-Flores *et al.* (2008) estudiaron la variación intra e interanual de las tasas de captura promedio mensual reportadas por la flota deportiva en el sur del Golfo de California, México, reportadas para los años de 1990 a 2000. Las mayores capturas en esta región se presentaron durante los meses cálidos del año, de agosto a noviembre, principalmente, encontrándose una correlación lineal de $r=0.78$ (con un mes de retraso) entre las tasas de captura y la temperatura superficial del mar. Un resultado interesante del estudio fue que, durante 1997 se reportaron las tasas de captura más bajas del período de estudio, año en el que ocurrió un evento niño intenso. Los autores se lo atribuyeron a un posible desplazamiento del recurso hacia el norte, debido a un evento de expansión de hábitat del dorado, como lo sugirió Norton (1999).

Son pocos los trabajos que se han enfocado en las migraciones y la relación recurso-ambiente del dorado. Diversos autores plantean que las migraciones de la especie están asociadas a cambios en la temperatura y a aspectos reproductivos, reportándose que el recurso llega a las distintas áreas de pesca cuando las temperaturas del mar son elevadas, quizá con fines reproductivos; sin embargo, pocos trabajos han cuantificado la posible relación

entre los índices de abundancia relativa y el ambiente, especialmente hablando del área de estudio de la presente investigación.

3. JUSTIFICACIÓN

El dorado es un recurso económica y ecológicamente importante, ya que compone una fracción importante de distintas pesquerías, como la ribereña y la deportiva (Beltrán, 1995; Carrasco-Águila *et al.*, 2012; Damián-Guillén *et al.*, 2010; Miranda-Carrillo *et al.*, 2010). Estas estadísticas pesqueras, junto con sus características biológicas (crecimiento acelerado, alta fecundidad, baja talla de primera madurez, etc.) convierten al dorado en un atractivo blanco para explotación, y hacen suponer que puede soportar una pesquería comercial dirigida (Kraul, 1999; Zuñiga-Flores, 2009), sin embargo, el conocimiento sobre ciertos aspectos biológicos y migratorios del dorado en el Pacífico mexicano es aún escaso. Zuñiga-Flores (2009) resaltó que no se cuenta con información de las migraciones anuales del dorado en mares mexicanos. Abrir una pesquería comercial dirigida, sin contar con información científica que sustente que estos peces puede soportar dicha pesquería, podría poner en riesgo este importante recurso económico, lo que podría desencadenar una serie de consecuencias ecológicas, económicas y sociales.

En este contexto, el principal objetivo de la presente investigación se centró en modelar la captura incidental de dorado, con el fin de elucidar los factores ambientales que regulan sus migraciones dentro del área de estudio.

4. HIPÓTESIS

Diferentes estudios sugieren que el dorado es un organismo que es capaz de realizar migraciones considerables, y atravesar distintas zonas de jurisdicción marina en tiempos relativamente cortos. Otros estudios sugieren que estos peces migran siguiendo un hábitat preferencial, por lo que sus patrones migratorios están relacionados con distintos aspectos oceanográficos (cambios estacionales en la

temperatura superficial del mar, entre otros). Con base a lo anterior, en el presente estudio se planteó la hipótesis de que las predicciones del hábitat potencial del dorado en la zona de estudio reflejarán una migración costera sur-norte-sur.

5. OBJETIVOS

Objetivo general:

Modelar la captura incidental del dorado, en función de distintas variables ambientales, espaciales y temporales.

Objetivos particulares:

- Analizar la estacionalidad de las capturas incidentales de dorado en distintas áreas del Pacífico mexicano.
- Analizar la variación espacio temporal del esfuerzo pesquero de la flota atunera en distintas áreas del Pacífico mexicano y Golfo de California.
- Caracterizar el área de estudio desde el punto de vista oceanográfico.
- Calcular la distancia de los cuadrantes de pesca a frentes térmicos.
- Construir modelos estadísticos explicativos y predictivos de la abundancia relativa del dorado.
- Determinar los patrones migratorios del dorado en el área de estudio.

6. MATERIAL Y MÉTODOS

6.1 Área de estudio

El área de estudio comprende todo el Pacífico mexicano, desde los 10°N a los 33°N, y de los 90°W a los 125°W, abarcando zonas tanto costeras como oceánicas (Fig.3). Dentro del área de estudio se presentan diferentes tipos de clima: en la región centro y sur, en las costas de Colima, Jalisco, Oaxaca y Chiapas, se presenta un tipo de clima cálido – subhúmedo, mientras que en la costa de los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa se presentan los tipos de clima muy seco y seco (García, 2004).

Las masas de agua presentes en el área de estudio son: 1) Agua de la Corriente de California (ACC), la cual se caracteriza por tener temperatura y salinidad baja ($T < 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S < 34.6$); 2) Agua Superficial Tropical (AST), caracterizada por temperaturas altas y salinidades medias ($T > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $34.6 < S < 34.9$); 3) Agua Sub-superficial Subtropical (ASsSt), con una salinidad de entre 34.5 y 35 y una temperatura de entre 8 y $18\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4), Agua Intermedia del Pacífico (AIP), la cual presenta un rango de salinidad de 34.5 a 34.75 y un rango de temperatura de 5 a $2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5); Agua del Golfo de California (AGC), conocida por su amplio rango de temperatura ($> 12\text{ }^{\circ}\text{C}$) y salinidad alta ($35 < S < 35.5$) y 6) Agua Central del Golfo de California (ACGC), la cual es altamente salina (>34.9) y templada ($22\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Cepeda *et al.*, 2013; León-Chávez *et al.*, 2009).

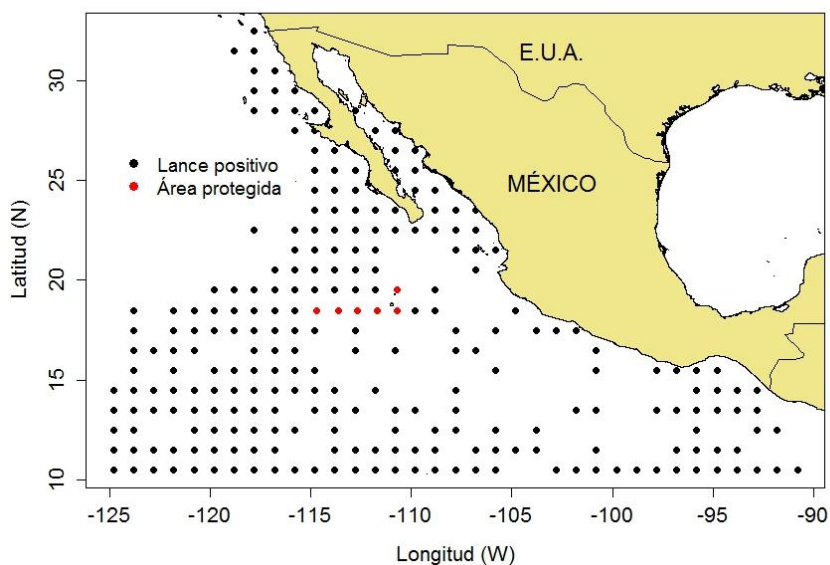


Figura 3. Mapa de cobertura de la base de datos de capturas incidentales de dorado, provisto por personal de la CIAT. Los puntos rojos denotan las zonas protegidas a la pesca.

La distribución de estas masas de agua varía espacial y temporalmente; el área más al norte se encuentra bajo la influencia permanente de la Corriente de California, una corriente que fluye de norte a sur, transportando agua del polo

hacia el ecuador. Esta corriente se bifurca, dando lugar a lo que se conoce como el Brazo tropical de la Corriente de California (Godínez *et al.*, 2010; Kurczyn *et al.*, 2012). En la entrada del Golfo de California se encuentra una zona de transición de masas de agua, en la que este brazo tropical se encuentra con la Corriente Costera Mexicana, una corriente sub-superficial de agua cálida, la cual se origina en el Golfo de Tehuantepec y fluye paralela a la costa (Godínez *et al.*, 2010; Kessler, 2006).

El área del Golfo de Tehuantepec, en la región sur del área de estudio, está influenciada por la corriente costera de Costa Rica, una corriente superficial cálida que se origina hacia el sur, en las costas de Costa Rica y Panamá (Kessler, 2006). En esta región se presenta durante invierno una serie de fenómenos climáticos/oceánicos conocidos como tehuanos: ráfagas intensas de vientos provenientes del norte, las cuales son de corta duración (3-7 días), y tienen la capacidad de generar parches de agua fría y cálida, los cuales pueden distribuirse dentro del Golfo y mar afuera (Trasviña *et al.*, 2003).

Otra característica oceanográfica que se presenta en el área de estudio, en la zona oceánica de la porción sur, es la característica conocida como “la depresión de Tehuantepec”, un área cálida cuyo centro se encuentra alrededor de los 103°W y 14°N, conocida así por el hundimiento de las isotermas en relación con áreas aledañas (Kessler, 2006).

De manera más local, en la boca del Golfo de California, existe, a lo largo de todo el año una circulación ciclónica, ya que el agua proveniente del Pacífico entra al Golfo por la costa oriental (Sinaloa), y sale por la costa occidental (Baja California Sur), alternándose estacionalmente las masas de agua que entran/salen del Golfo (Castro *et al.*, 2000).

La compleja circulación oceánica en el área de estudio tiene como resultado una serie de fenómenos de mesoescala, como giros y frentes térmicos, los cuales juegan un papel importante en la distribución y retención de agua y energía

(Torres-Orozco *et al.*, 2005), y en muchos de los casos son responsables de acumular alimento, del cual se alimentarán las potenciales presas de los pelágicos mayores (Sosa-Nizhisaki, 1998), como es el caso del dorado.

6.2 Origen de la información

6.2.1 Base de datos de captura incidental de dorado.

Se analizó una base de datos de diez años (2004-2013) de capturas incidentales de dorado, reportadas por observadores a bordo de barcos atuneros clase 6 (> 425 m³ de capacidad de bodega), cuyo arte de pesca es el cerco de encierro. La base de datos fue provista directamente por personal de la Comisión Interamericana del Atún Tropical (CIAT, o IATTC, por sus siglas en inglés), e incluye los valores de dorados capturados por mes (para cada año), agrupados en cuadrantes de 1°X1°, así como el número de lances positivos (con al menos un dorado) que dio lugar a esa captura, el número total de lances realizados por cuadrante, el número de dorados capturados en cada cuadrante, agrupados en tres intervalos de tallas (chicos, < 30 cm, medianos, 30 – 60 cm, y grandes, > 60 cm), así como los valores de latitud y longitud correspondientes a cada uno de los cuadrantes. La base incluye cuadrantes en toda el área exclusiva de la costa occidental de México y el área sur y centro del Golfo de California, así como un área oceánica de 10° a 20°N, la cual se extiende hasta 125°W (Fig. 3), excluyendo zonas de áreas protegidas a la pesca (puntos rojos).

Con el fin de eliminar el posible sesgo introducido por el esfuerzo pesquero, se calculó la captura incidental de dorado por unidad de esfuerzo, utilizando la ecuación

$$CIPUE_i = \frac{Dorados_i}{Lances_i} \quad (1)$$

Dónde: CIPUE_i es la captura incidental por unidad de esfuerzo, Dorados_i es el número de dorados capturados, y Lances_i es el número de lances de cerco, todo para el *i*-ésimo cuadrante de pesca.

6.2.2 Variables ambientales

Las variables ambientales analizadas fueron temperatura superficial del mar (SST), Clorofila (Chl-*a*) y altura del nivel del mar (SSH). Las imágenes de SST y Chl-*a* fueron obtenidas de imágenes de satélite promedio mensual, obtenidas del servidor BloomWatch360 de la Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), de la página <http://coastwatch.pfel.noaa.gov/coastwatch/CWBrowserWW360Info.html>.

Se utilizaron funciones en lenguaje R (R Core Team, 2013) para buscar dentro de toda la base de datos aquellas bases que igualaran la cobertura temporal y espacial de los datos biológicos. En el servidor BloomWatch, todos los subset de datos tienen un código único de identificación, el cual sirve para ayudar al usuario a realizar búsquedas dentro del servidor. Para el caso de la temperatura superficial del mar, se eligió una base de datos global (código *TBAssta*), la cual contiene imágenes promedio mensuales, con una resolución espacial de $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$, y es una serie de tiempo que incluye datos de varios sensores.

En el caso de la Chl-*a*, se utilizó una base de datos denotada con el código *TMHchla*, la cual cubre un período de enero de 2004 a septiembre del 2013 (mensual), y tiene una resolución espacial de $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$. Con el fin de cubrir la mayor parte posible del período de la base de datos de capturas de dorado, se extrajeron las imágenes mensuales de Chl-*a* del portal ERDAPP de la NOAA (<http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/erdMBchlamday.graph>), para los meses de octubre - diciembre del 2013, utilizando la base de datos con la clave *erdMBChlamday*, la cual cuenta con imágenes mensuales, con una resolución espacial de $0.025^{\circ} \times 0.025^{\circ}$. Ambas bases de datos de Chl-*a* provienen del satélite Aqua-MODIS, perteneciente a la NOAA.

Por otro lado, la variable SSH se obtuvo del portal de AVISO, (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/data-access/gridded-data-extraction-tool.html>) del cual se extrajeron imágenes diarias con una resolución espacial de

0.25°. Estas imágenes diarias de promediaron con el fin de iguala la resolución temporal de los datos pesqueros (1 mes).

6.2.3 Distancia de los cuadrantes de pesca a los frentes térmicos

6.2.3.1 Frentes térmicos: definición e importancia

Un frente térmico es una zona en donde dos masas de agua con propiedades físicas distintas convergen, y se caracteriza usualmente por un gradiente pronunciado de temperatura (Etnoyer *et al.*, 2006). Este encuentro de masas de agua tiene como consecuencia un aumento en la productividad primaria y secundaria, resultado de un incremento en el flujo vertical, y la retención de partículas en la zona donde ocurre este fenómeno, debido a las diferencias de densidad entre ambas masas de agua (Olson *et al.*, 1994; Bakun, 1996; Genin *et al.*, 2005)

Uno de los principales obstáculos a la hora de definir un frente térmico es la elección del umbral, aquél valor que servirá para discernir entre cuales de los pixeles de la imagen satelital de temperatura pueden ser considerados como zonas frontales; o, dicho de otra manera, ¿qué tan pronunciado tiene que ser el gradiente horizontal de temperatura, para que una zona pueda ser considerada como zona frontal? Algunas de las definiciones han sido propuestas para áreas de estudio específicas, por ejemplo, Uda (1938) propuso un gradiente de $0.05 - 0.5$ °C km⁻¹ para la corriente de Kuroshio, por lo que utilizarlas en otras áreas de estudio, donde las características físicas son diferentes, puede resultar riesgoso. Fedorov (1986) propuso una definición más genérica, en donde una zona frontal se considera aquella en donde los gradientes de temperatura son un orden por encima del promedio de la temperatura meridional (en °C km⁻¹). En el presente estudio se optó por utilizar esta definición de zona frontal, ya que puede ser aplicada para cualquier área de estudio (Etnoyer *et al.*, 2006).

6.3.2.2 Algoritmo

Se desarrolló un algoritmo en lenguaje R (R Core Team, 2013), el cual calcula la distancia de los cuadrantes de pesca a las zonas consideradas como frentes térmicos. De manera general, el algoritmo utiliza *loops* (bucles), que en cada vuelta, para cada observación (renglón) de la base pesquera:

1. Extrae el mes y el año de cada una de las observaciones de la base de datos pesqueros, con el fin de obtener la imagen de satélite mensual que corresponde a esa combinación mes/año, a partir de un arreglo tridimensional de imágenes, cuyas dimensiones son (Lat, Lon, Tiempo), donde el tiempo es un índice i que va de 1 a 120 (120 imágenes mensuales durante 10 años). Para esto se utilizó la expresión:

$$i=(\text{año} - \min(\text{año})-1)\times 12-(12-\text{mes}) \quad (2)$$

Donde: i es el índice que corresponde a cada imagen de satélite, y mes y año corresponden al mes/año de la observación de la base pesquera. Por ejemplo, $i = 13$ corresponde a enero del 2005:

$$i=(2005-(2004-1))\times 12-(12-1)=13 \quad (3)$$

2. Calcula el gradiente de temperatura en la dirección X y en la dirección Y para la imagen i :

$$\nabla T_i = \left(\frac{\partial T_i}{\partial X}, \frac{\partial T_i}{\partial Y} \right) \quad (4)$$

Y la magnitud del vector gradiente de temperatura para la imagen i :

$$|\nabla T_i| = \left(\left(\frac{\partial T_i}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_i}{\partial Y} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

3. “Desecha” aquellos valores que no cumplan con el umbral latitudinal de temperatura
4. Extrae las coordenadas de aquellos pixeles que sí cumplen con el umbral de temperatura

5. Calcula la distancia geodésica de las coordenadas del cuadrante de pesca a cada una de las coordenadas que cumplieron con el umbral, y
6. De todas estas distancias se extrae la mínima, la cual se interpreta como la distancia entre el cuadrante de pesca y el frente térmico más cercano, para cada una de las observaciones de la base de datos pesqueros.

6.3. Tratamiento estadístico

6.3.1. Análisis exploratorio y análisis de varianza

Se aplicaron pruebas exploratorias, tanto de normalidad (Kolmogorov-Smirnov) como de homocedasticidad de variancias (Bartlett) a variables tanto biológicas como ambientales, con el fin de decidir qué tipo de estadísticos se utilizarían (paramétricos o no paramétricos). En caso de que uno o ambos supuestos no se cumplieran, se procedió a utilizar estadística no paramétrica. Para evaluar las posibles diferencias entre áreas, entre años y entre estaciones del año, se aplicó análisis de varianza de una vía (Kruskal-Wallis en el caso no paramétrico). Todo el análisis estadístico fue realizado utilizando las funciones de librería *stats*, incluida entre las librerías base del lenguaje R (R Core Team, 2013).

6.3.2. Análisis de series de tiempo

Se calcularon los promedios mensuales de las capturas incidentales de dorado y de esfuerzo pesquero, con el propósito de tener una serie de tiempo mensual de enero de 2004 a diciembre del 2013. Para rellenar los espacios dejados por aquellos meses en donde no se presentó captura incidental, se utilizó interpolación lineal simple, utilizando la función *na.approx*, de la librería *zoo*, del lenguaje R (R Core Team, 2013). Una vez completa la serie de tiempo, se le calculó el periodograma, para ver la posible periodicidad de la serie. Para este análisis, se utilizó la función *spec.pgram* de la librería *stats*, incluida en las librerías base de R. Esta función utiliza una transformada rápida de Fourier, con la finalidad de pasar la serie de un dominio en el tiempo, a un dominio en la frecuencia, la cual

es el inverso matemático del período (Resnick *et al.*, 2001). Para obtener un panorama más claro de la periodicidad de la serie, se extrajo de la misma la media y la tendencia.

Se utilizaron dos aproximaciones para evaluar la posible tendencia de la serie de tiempo de capturas incidentales: una mediante regresión lineal simple, en donde un modelo lineal fue ajustado a la serie, y se evaluó si el parámetro b del ajuste (la pendiente) era distinto que cero, y otro mediante la prueba de estacionalidad de Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin, la cual prueba la hipótesis nula de que una serie es estacionaria a lo largo del tiempo. Esta prueba se realizó utilizando la función `kps.test` de la librería `tseries` de R.

6.3.3 Modelos aditivos generalizados

Con el fin de cuantificar la influencia que las variables ambientales tienen sobre las variables biológicas, se utilizó la técnica de estadística multivariada conocida como modelos aditivos generalizados (GAMs, por sus siglas en inglés). Este tipo de modelos son considerados como una variación de los modelos lineales generalizados, en donde el predictor lineal está dado por la suma de unas funciones suavizadoras de las covariantes; estas funciones son especificadas por el usuario, y están relacionadas con la variable dependiente mediante una función de enlace (p. ej., logaritmo). La forma general de un GAM está dada por

$$g(\mu_i) = \mu + \sum_{j=1}^p f_j(X_i) \quad (6)$$

Dónde: g es la función monótonica de enlace μ_i es valor ajustado, X_i son las variables predictorias, y f_j es una función de suavizado (Hastie y Tibshirani, 1986). En este caso, se utilizó la captura incidental como variable respuesta y las variables ambientales como variables predictivas. De igual forma, se incluyeron distintas variables espaciales (latitud, longitud, distancia mínima a la costa) y temporales (año, mes) como variables predictivas, con el fin de mejorar el poder

de predicción de los modelos. Todas las variables, tanto ambientales como espaciales y temporales, se consideraron como variables continuas.

Con el fin de elegir el mejor modelo, se probaron distintas distribuciones, para ver cual se ajustaba mejor a la variable respuesta, utilizando figuras de prospección. Cuando la distribución supuesta y la distribución de la variable respuesta son similares, en un modelo con un buen ajuste, el gráfico cuartil-cuartil se asemeja a una línea recta; el histograma de residuales se asemeja a una distribución normal (lo cual sugiere que el modelo ni sobre estima ni subestima la variable respuesta). La figura de dispersión del predictor lineal vs. residuales no presenta ningún patrón, y la gráfica de valores observados vs. predicción asemeja una línea recta con pendiente de 45°.

Los modelos fueron construidos en una manera “stepwise” (paso a paso), es decir, añadiendo las variables predictorias una a la vez, y realizando pruebas de ANOVA para cada variable añadida, lo cual es útil a la hora de decidir cuales variables predictivas son las que contribuyen significativamente a explicar la variación de la variable respuesta. De igual forma, se utilizó el criterio de información de Akaike (AIC), un valor que pondera la complejidad del modelo (número de parámetros) con la bondad de ajuste de un modelo (Akaike, 1974). Cuando se comparan dos modelos, aquél con el AIC menor es el mejor candidato. La modelación de GAMs se realizó utilizando las funciones de la librería *mgcv* (Wood, 2006) del lenguaje R (R Core Team, 2013).

6.3.4. Análisis Factorial de Nicho Ecológico

Propuesto por Hirzel *et al.* (2002), el análisis de factor de nicho ecológico (ENFA, por sus siglas en inglés), es una técnica estadística multivariada, basada en el concepto seminal de nicho ecológico de Hutchinson (1957): *un hiper-volumen en un espacio multidimensional de variables ecológicas, dentro del cual cierta especie puede mantener una población viable*. De acuerdo a los autores, esta técnica tiene una ventaja, en comparación con otras técnicas similares: no

necesita de datos de “ausencia” de la especie de estudio, lo cual es característico de muchas bases de datos (incluyendo la de captura incidental, utilizada en la presente tesis). El hecho de no tener datos de ausencia no necesariamente significa que la especie no esté presente; los autores de esta técnica sugieren tres posibles escenarios para que una especie no sea detectada en muestreos de presencia/ausencia: a) la especie no se detectó debido a fallas en el muestreo, b) la especie realmente no está presente, aunque el hábitat sea adecuado para ella, y c) la especie no guarda preferencia por ese hábitat en particular.

En la práctica, se espera que las especies no se distribuyan de manera aleatoria, sino que muestre preferencia por ciertos valores de las variables ecogeográficas elegidas a priori para el análisis (por ejemplo, una temperatura óptima), por lo que se espera que cierta especie sea encontrada en aquellas áreas (por ejemplo, celdas de una malla espacial) en donde se presenten esos valores óptimos de la (o las) variable(s) ecogeográfica(s). Esto podría cuantificarse comparando la distribución de la variable ecogeográfica en aquellas áreas (celdas) en las que la especie ha sido detectada, con la distribución de la variable ecogeográfica en todas las celdas del área de estudio (donde se encontró y donde no se encontró a la especie objetivo).

El proceso es, matemáticamente, muy similar a un análisis de componentes principales (PCA). Sin embargo, en el ENFA los dos primeros componentes tienen significados ecológicos importantes: Marginalidad y Especialización. La Marginalidad (M) se define como la diferencia absoluta entre la media de la distribución global y la media de la distribución de la especie objetivo, dividido entre 1.96 veces la varianza de la distribución global:

$$M = \frac{|m_g - m_s|}{1.96\sigma_g} \quad (7)$$

Al dividir entre 1.96 veces la varianza se elimina el posible sesgo debido a la varianza de la distribución global, y se asegura que, en la mayoría de los casos, el coeficiente de marginalidad esté entre 0 y 1.

Por otra parte, la especialización se define como el cociente entre la varianza de la distribución global y la varianza de la distribución de las celdas donde la especie objetivo fue observada:

$$S = \frac{\sigma_g}{\sigma_s} \quad (8)$$

Un grupo de celdas elegidas aleatoriamente tendría un valor de $S=1$, por lo que cualquier valor por encima de uno indica algún grado de especialización.

Al igual que en un PCA, en este análisis se debe de seleccionar un número de factores, de acuerdo a la cantidad de información ecológica que cada uno de los factores aporta. En este caso se utilizó el umbral de técnica de varianza acumulada (Basille *et al.*, 2008; Hirzel *et al.*, 2002). Debido a que las condiciones oceanográficas cambian notoriamente entre estaciones del año en el área de estudio, se optó por seguir a Farrell (2009), quien sugiere correr un modelo de ENFA por temporada del año, utilizando una aproximación trimestral (enero – marzo se consideró invierno, abril – junio primavera, etc.).

El principal resultado del ENFA es el *biplot*, una figura que resume la información obtenida del análisis (Calenge, 2011). Esta figura es la proyección del nicho ecológico en una dimensión de n variables ecogeográficas en un plano cartesiano, en donde los ejes X y Y denotan la marginalidad y el primer factor de especialización, respectivamente. Estos factores son ortogonales al polígono de dimensión n , definido por las n variables ecogeográficas (Basille *et al.*, 2008). La figura 4 muestra un ejemplo idealizado de un *biplot* con dos variables ecogeográficas (A y B); en ella se puede apreciar 1) la diferencia en proporciones del hábitat disponible y del hábitat utilizado (polígono gris claro y polígono gris

oscuro, respectivamente), 2) la diferencia geométrica entre los centroides de los polígonos del hábitat disponible y el utilizado (marginalidad, punto azul), 3) la contribución de cada una de las variables ecogeográficas (vectores A y B), y 4) la similitud entre cada una de las variables ecogeográficas y los factores de marginalidad y especialización. En este ejemplo teórico, la especie de interés utiliza sólo una pequeña porción del hábitat disponible, encontrándose una marginalidad alta, lo que sugiere que esta especie se encuentra restringida a un hábitat muy particular. La variable ecogeográfica A es la que más influye en la presencia de esta especie teórica, ya que la longitud de su vector es mayor que la longitud del vector correspondiente a la variable B. El factor de marginalidad (eje X) está más correlacionado con la variable A, lo que sugiere que esta variable aporta más al coeficiente de marginalidad, o dicho de otra manera, la especie teórica se encuentra en condiciones donde A es, en promedio, diferente que las condiciones disponibles.

Además, el hecho de que el vector apunte hacia el lado positivo de X sugiere que estos animales ocupan un hábitat donde las condiciones de A son mayores, en promedio, a aquellas condiciones disponibles en el área de estudio. Por otro lado, B está más correlacionado con el primer factor de especialización (eje Y), lo que sugiere que un nicho ecológico restringido con respecto a esta variable, es decir, que la especie es intolerable a cambios drásticos de la variable ecogeográfica B. En este caso, el sentido del vector no importa, ya que la especialización es un cociente de la varianza del hábitat disponible y el hábitat utilizado, por lo que la interpretación de este resultado se debe enfocar en el valor absoluto, ya que los signos son arbitrarios (Hirzel *et al.*, 2002).

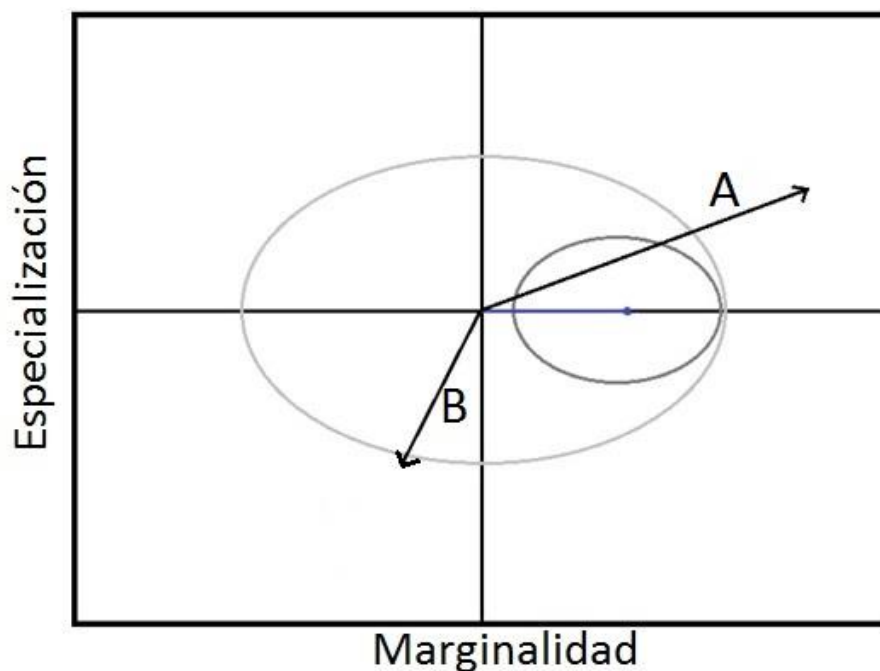


Figura 4. Ejemplo teórico de un biplot, resultado principal de un Análisis Factorial de Nicho Ecológico. Los polígonos gris claro y gris oscuro denotan el hábitat disponible y el hábitat utilizado, respectivamente. El punto azul en el eje X es la diferencia geométrica entre los centroides de ambos polígonos, o marginalidad. Los vectores denotan el grado de aporte de cada variable ecogeográfica a la presencia de la especie de interés (longitud del vector) y la relación de cada una de las variables con los dos primeros factores obtenidos del análisis: marginalidad (eje X) y primer factor de especialización (eje Y).

Con el fin de evaluar la pertinencia del ENFA aplicado a los datos de captura incidental, se realizó una prueba de Montecarlo, la cual consiste en repartir un número de dorados capturados igual al número observado, en celdas elegidas aleatoriamente en toda el área de estudio. Este proceso se repite un número n de veces suponiendo una distribución normal, sin tomar en cuenta remplazo para las simulaciones; en cada simulación se extrae el factor de marginalidad; una vez extraídos los n valores de marginalidad, el valor observado se contrasta contra la distribución de estos n valores, teniendo así una herramienta estadística para evaluar si este pez se distribuye de manera aleatoria en el área de estudio. El número mínimo necesario de simulaciones (n) se estimó

de acuerdo a Winston (2000), obteniendo un mínimo de ~ 200 simulaciones para el peor de los escenarios. Debido a que el cómputo de las simulaciones toma alrededor de dos segundos, se optó por utilizar un valor $n \sim 1000$, valor sugerido por Calenge (2006) para el ENFA. Tanto el proceso de modelado como la prueba de pertinencia (Montecarlo) se realizaron utilizando las funciones de la librería `adehabitats` (Calenge, 2006), del lenguaje R (R Core Team, 2013).

7. RESULTADOS

7.1 Capturas incidentales

7.1.1 Variación espacio-temporal de la captura incidental por unidad de esfuerzo

Un total de 55,406 dorados fueron capturados incidentalmente durante el período de estudio. El valor máximo de CIPUE fue de $650 \text{ dorados} \times \text{lance}^{-1}$, el cual se presentó durante el mes de octubre del 2012. Todos los meses, con excepción de diciembre, presentaron al menos un lance de sólo un dorado. Los valores promedio mensuales máximos de CIPUE se presentaron durante el mes de diciembre ($\sim 8 \text{ dorados} \times \text{lance}^{-1}$, $sd=9,8 \text{ dorados} \times \text{lance}^{-1}$), aunque sólo se presentaron capturas durante los diciembre de 2005 y 2007. Por otro lado, los valores mínimos se presentaron durante el mes de abril ($\sim 0.21 \text{ dorados} \times \text{lance}^{-1}$, $sd= 1.86 \text{ dorados} \times \text{lance}^{-1}$). Al violarse tanto el supuesto de normalidad ($p < 0.05$) como el de homocedasticidad de varianzas ($B_{(11,8517)} = 73751, p < 0.05$), se procedió a usar la prueba de Kruskal-Wallis, encontrándose que las diferencias intermensuales fueron estadísticamente significativas ($H_{(11,8517)} = 68.23, p < 0.05$, Fig. 5).

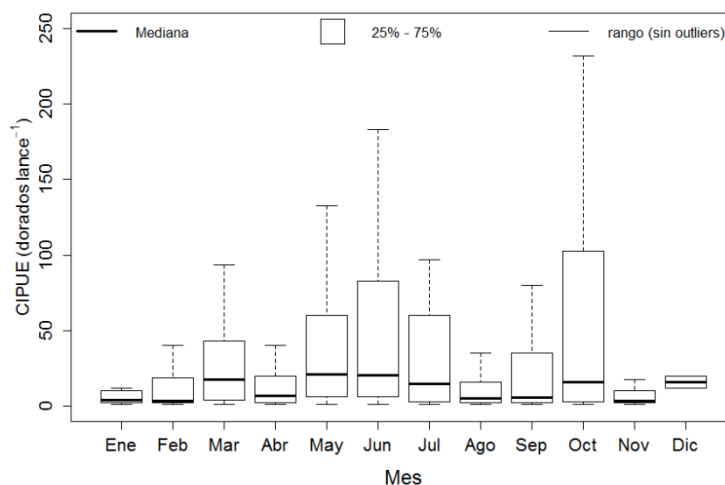


Figura 5. Variación inter-mensual de la captura incidental de dorado en el Pacífico mexicano.

En el caso de la variabilidad interanual, los valores mínimos de CIPUE se presentaron durante el año de 2011 (~ 0.5 dorados \times lance⁻¹, $sd=5.38$ dorados \times lance⁻¹), mientras que los valores promedio máximos se presentaron durante el 2004 (~ 4.54 dorados \times lance⁻¹, $sd=35.91$ dorados \times lance⁻¹). Nuevamente, el supuesto de homocedasticidad de varianzas no se cumplió para el análisis interanual ($B_{(9,8517)} = 3864.6, p < 0.05$), por lo que se procedió a usar estadística no paramétrica, encontrándose diferencias interanuales significativas ($H_{(9,8517)} = 41.06, p < 0.05$, Fig. 6).

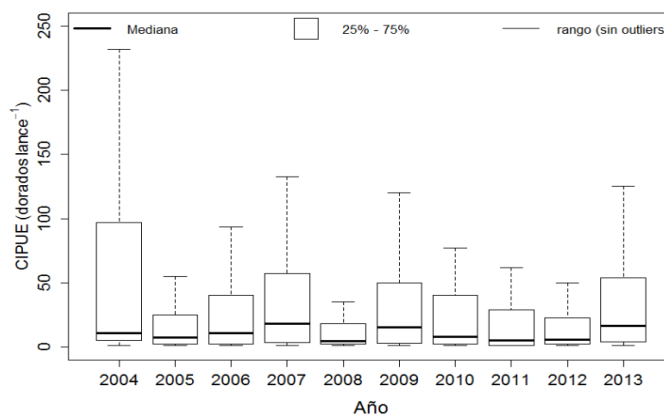


Figura 6. Variación interanual de la captura incidental de dorado en el Pacífico mexicano.

Para todo el período de estudio, se encontraron dos zonas con capturas incidentales altas: una en la región oceánica, comprendida entre 10° - 20°N y 115° - 125°W, y otra en la costa occidental de la península de Baja California, entre los 23° y los 33°N (Fig. 7).

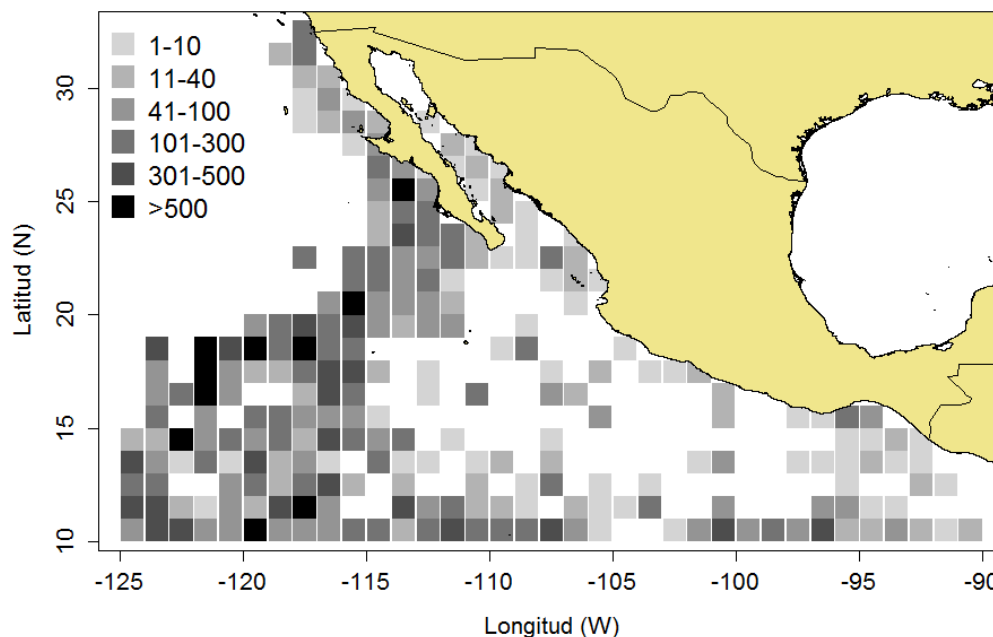


Figura 7. Variación espacial de la captura incidental total de dorado en el Pacífico mexicano, para el período comprendido del 2004 al 2013.

Durante enero la mayoría de cuadrantes con lances positivos se presentaron al sur de los 18°N. Durante este mes se presentan capturas bajas y medias (<50 dorados \times lance $^{-1}$) dentro del área de estudio, encontrándose capturas tanto cerca de la costa como en el océano. Cerca de la costa, se detectaron capturas de 5 – 10 dorados \times lance $^{-1}$ en la zona del Golfo de Tehuantepec e islas Mariás, Nay., mientras que en la zona oceánica la mayoría de cuadrantes con capturas se detectaron bajo los 15°N, de 100 a 125°W, detectándose dos lances de 10 – 50 dorados \times lance $^{-1}$ en un área alrededor de los 10°N y 100°W (Fig. 8). En febrero, la distribución de las capturas fue similar a enero, con un “cinturón” de cuadrantes con capturas en su mayoría bajas (con algunos cuadrantes con capturas de 50 – 100 dorados \times lance $^{-1}$) al sur de los 15°N, a lo largo de toda la

cobertura longitudinal del área de estudio; sin embargo, se detectaron capturas más al norte, presentándose capturas bajas alrededor de los 24°N en la boca del Golfo de California, así un cuadrante con capturas bajas en la zona cercana al área protegida a la pesca, en la región de las islas Revillagigedo (~ 18°N, -112°W; Fig. 8).

En el mes de marzo nuevamente, se detectó que la mayoría de cuadrantes con lances positivos se ubicaron en una franja latitudinal (95°- 125°W) por debajo de los 15°N, encontrándose un lance con capturas altas (100 – 300 doradosxlance⁻¹) alrededor de los 11°N y 102°W, así como cuadrantes aislados con capturas bajas, dentro y en la boca del Golfo de California (Fig. 8). Durante abril, la franja latitudinal con cuadrantes con capturas bajas, medias y altas parece moverse al oeste de los 105°W, encontrándose un cuadrante con capturas medias en la zona central oceánica del área de estudio, así como cuadrantes con capturas bajas y medias dentro del Golfo de California, y en la costa occidental de la península de Baja California.

Para mayo, la población de dorado parece moverse hacia el NW, ya que se observó un notorio aumento en la captura incidental en área oceánica comprendida entre los 10° - 20°N y los 110° - 125°W, encontrándose lances de más de 100 doradosxlance⁻¹. En junio, esta área de altas abundancias relativas parece moverse hacia el NE, encontrándose un núcleo de capturas altas centrado en 19°N y 118°W. De igual forma, se observan capturas altas al SW de la punta de la península de Baja California, así como capturas bajas y medias tanto en la costa occidental de la península, como en la región central del Golfo, por encima de los 25°N (Fig. 8).

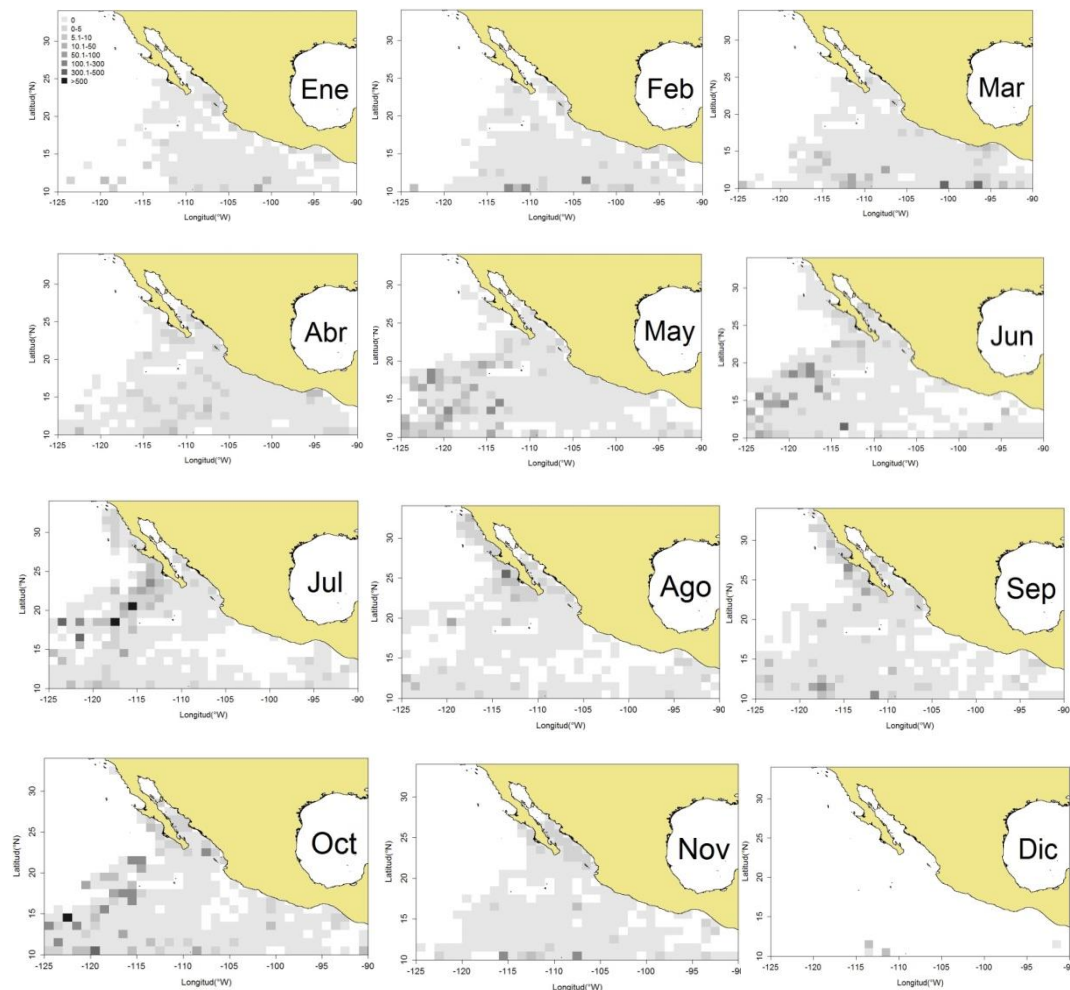


Figura 8. Distribución espacial mensual de la captura incidental de dorado en el Pacífico mexicano. El mes correspondiente a cada imagen se encuentra en el Golfo de México. La escala se encuentra en la parte superior izquierda de la figura de enero, en número de dorados \times lance $^{-1}$.

Julio, fue el mes en el que se detectaron las capturas más altas, observándose nuevamente como la zona oceánica de capturas altas se movió hacia el NE, movimiento que se denotó por una franja de altas abundancias relativas (> 500 dorados \times lance $^{-1}$ en algunos cuadrantes), la cual se orienta de NE a SW. Durante este mes, las capturas al este de los 110° W fueron prácticamente nulas. En agosto, esta área oceánica de capturas altas, con excepción de algunos cuadrantes aislados, desapareció, ya que las capturas se concentraron a lo largo

de toda la costa occidental de la península de Baja California, con algunos cuadrantes con capturas bajas dentro del Golfo. Nuevamente, las capturas en la parte SE del área de estudio fueron bajas.

Durante septiembre prevaleció el área de capturas altas en la costa occidental de la península de Baja California; sin embargo, se observó un parche de altas/medias abundancias relativas al SW del área de estudio (10° - 13° N y 116° - 119° W, Fig. 8). Durante octubre, la población parece desplazarse de nuevo al área oceánica localizada en la región más al SW del área de estudio, ya que se presentaron cuadrantes con capturas de más de 500 dorados \times lance $^{-1}$, encontrándose de nuevo este patrón de “franja”, similar al del mes de julio. Una zona de capturas bajas se detectó también en la parte sur de la costa occidental de Baja California Sur, así como cuadrantes con lances de capturas medias – altas en la zona de la entrada, parte central y región de las grandes islas del Golfo de California. Para noviembre, la región oceánica de altas abundancias desapareció, encontrándose cuadrantes dispersos con capturas bajas y medias al S del área de estudio, así como en la costa occidental de Baja California Sur y de la entrada a la región central del Golfo de California. En diciembre, sólo se presentaron cuatro cuadrantes con capturas medias, alrededor de los 10° - 12° N y 111° - 114° W y al SW del área de estudio (Fig. 8).

Utilizando como proxy de altas abundancias aquellos cuadrantes con capturas incidentales mayores al límite inferior del último cuartil, pareciera ser que la población de dorado se movió hacia el norte durante los meses de enero – agosto, para luego regresar hacia el sur durante el resto de los meses del año; de igual forma, parece existir un desplazamiento longitudinal de la población a lo largo del año, ya que el dorado parece moverse hacia áreas oceánicas durante enero – mayo, permaneciendo en esa región de mayo a octubre, para luego regresar a aguas más cercanas a la costa en noviembre (Fig. 9).

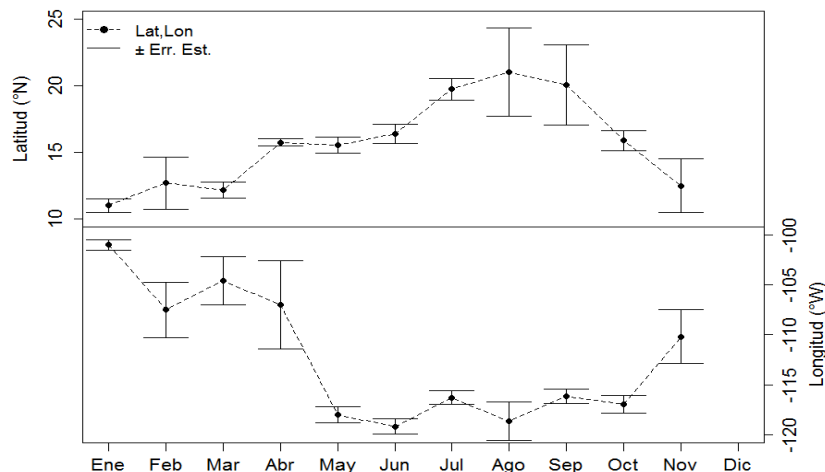


Figura 9. Variación temporal de la latitud (arriba) y longitud (abajo), en promedio, de los cuadrantes con altas capturas incidentales.

7.1.2 Análisis por clases de talla

La tabla I resume la estadística descriptiva para el análisis por clases de talla de captura incidental de dorado. Dado que la base de datos sólo incluye el número total de lances que dieron lugar a la captura, por mes y por cuadrante, no fue posible estandarizar la captura por unidad de esfuerzo. En total, se capturaron 5,306 dorados pertenecientes a la clase chica (< 30 cm), 21,387 de la clase mediana de tallas (30 – 60 cm) y 28,713 organismos de la clase de tallas grandes (> 60 cm). En promedio, se capturaron por cuadrante/mes 0.62 dorados chicos, 2.51 dorados medianos, y 3.37 dorados de clase grande. Los valores máximos por cuadrante/mes fueron de 1,706, 2,185 y 1,869 para las clases chicos, medianos y grandes, respectivamente. La mayor variación (desviación estándar) fue para la clase de organismos grandes (43.28 dorados), seguida de la clase mediana (41.90 dorados) y la clase chica (20.26 dorados).

Tabla I. Estadística descriptiva del análisis de clases de talla de las capturas incidentales de dorado en el Pacífico mexicano.

| Clase de talla | Mínimo | Total | Promedio | Desv. Est. |
|----------------|--------|--------|----------|------------|
| Chico | 0 | 5,306 | 0.62 | 20.26 |
| Mediano | 0 | 21,387 | 2.51 | 41.90 |
| Grande | 0 | 28,713 | 3.37 | 43.28 |

El número de dorados capturados por clase de tallas no presentó una distribución normal ($p < 0.05$), rechazándose también la hipótesis nula de homocedasticidad de varianzas entre las distintas clases ($B_{(2,2551)} = 5041, p < 0.05$). La prueba de Kruskal-Wallis reveló que existen diferencias significativas en el número de dorados capturados por clases de talla ($H_{(2,2551)} = 275.77, p < 0.05$; Fig. 10).

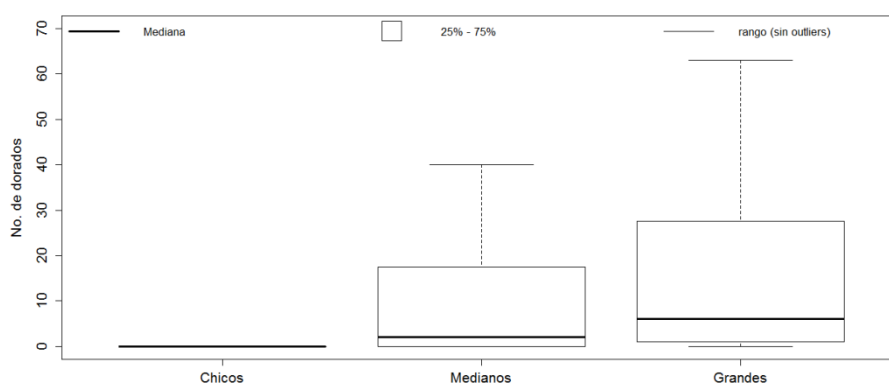


Figura 10. Variación del número de dorados capturados incidentalmente por la flota atunera, por clase de talla.

En promedio, se capturaron más dorados chicos durante los meses de marzo y julio, más dorados medianos en abril y julio, encontrándose un notorio pico de capturas altas de dorados de clase grande durante el mes de octubre (Fig. 11). Anualmente, las tres clases de talla presentaron capturas altas durante el 2004; mientras que la clase de dorados chicos mostró un segundo pico durante el 2006, se presentaron tres picos más de capturas altas de dorados medianos en

los años 2006, 2009 y 2013, siendo los años de 2008 y 2012 los años en los que, seguido de 2004, se capturaron más dorados de la clase de talla grande (Fig. 12).

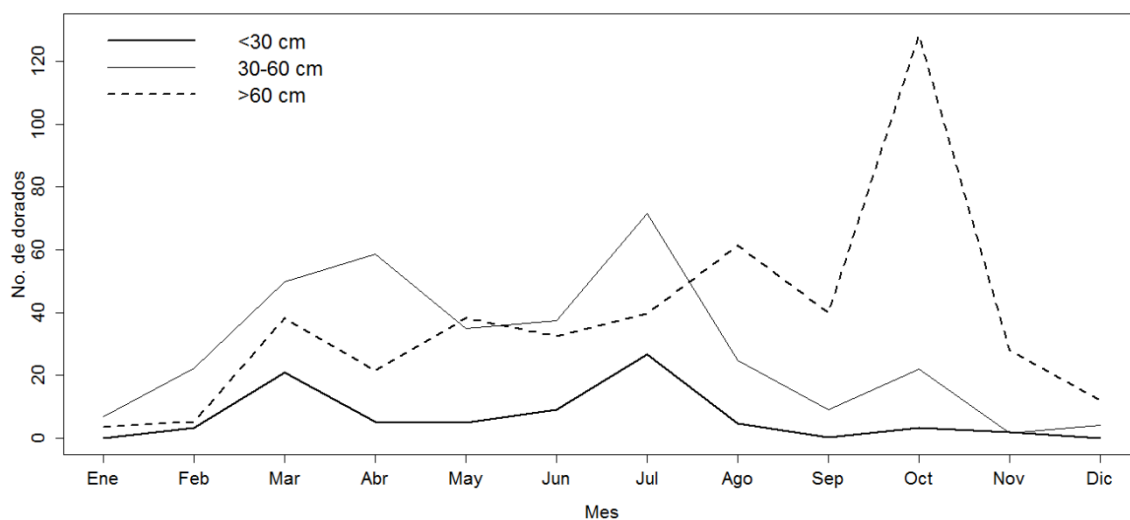


Figura 11. Año tipo de número promedio de dorados capturados por mes, por clase de tallas.

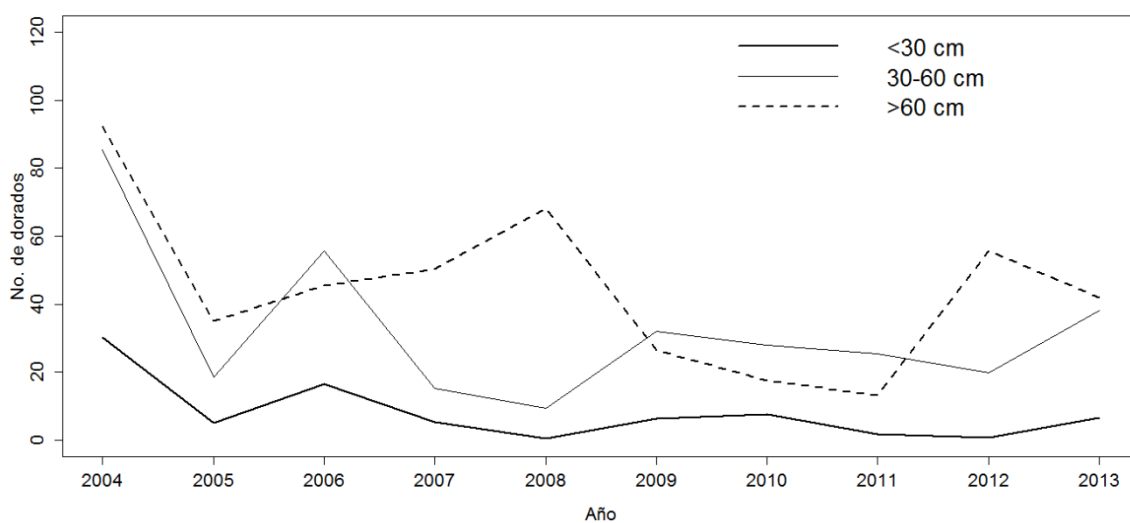


Figura 12. Capturas anuales promedio, en número de dorados, por clase de talla.

7.1.3 Análisis de series de tiempo

La figura 13 muestra la serie de tiempo de promedios mensuales de capturas incidentales, una vez aplicada la interpolación lineal. La figura sugiere que durante la mayoría de los años, se registró más de un pico máximo de captura, y que los valores mayores de CIPUE ocurrieron al inicio de la serie de tiempo.

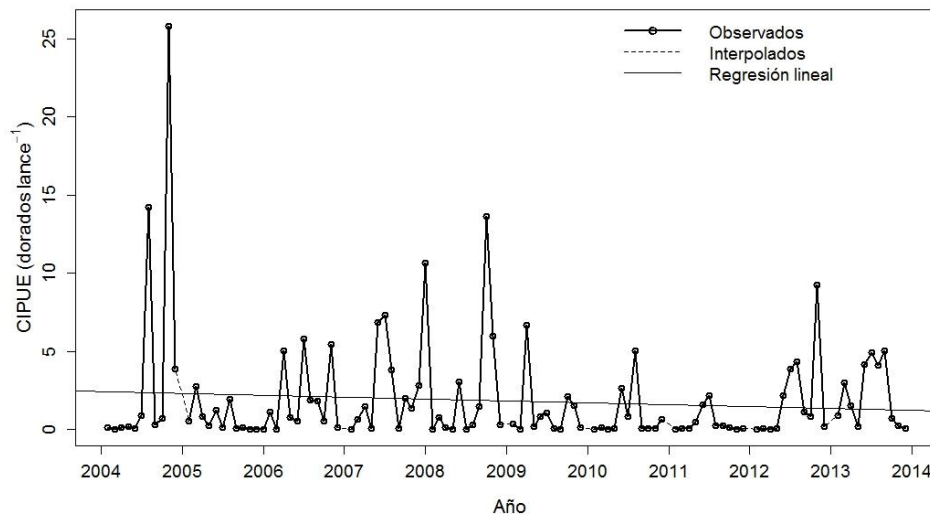


Figura 13. Serie de tiempo de promedios mensuales de captura incidental de dorado en el Pacífico mexicano.

Aunque se detectó una notoria variación interanual, ambas aproximaciones para detectar una posible tendencia sugieren que la serie es estacionaria en el tiempo: el análisis de regresión lineal simple mostró una pendiente ligeramente negativa ($b=-0.01$) la cual no fue distinta a cero ($p=0.26$), y al aplicar la prueba de KPSS no se rechazó la hipótesis nula de que la serie es estacionaria ($p=0.1$).

El periodograma obtenido mediante la aplicación de la transformada rápida de Fourier sugirió que se presentaron dos ciclos en la serie de tiempo, uno estacional ($\sim 6 - 8$ meses), y uno anual (~ 12 meses), lo cual denotó la periodicidad de la serie (Fig. 14).

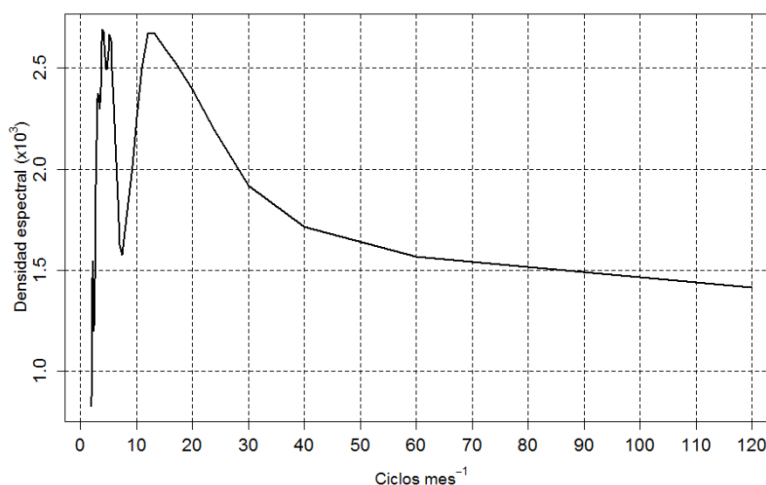


Figura 14. Periodograma obtenido mediante análisis de Fourier, para la serie de tiempo de capturas incidentales de dorado.

7.2 Análisis del esfuerzo

Durante todo el período de estudio se realizaron un total de 46,559 lances de pesca. La distribución de frecuencias de los lances atuneros mostró una distribución distinta a la normal ($D = 0.323, p < 0.05$), y una varianza heterocedástica entre los distintos meses ($B_{(11,8384)} = 1681.59, p < 0.05$) y años ($B_{(9,8384)} = 662.71, p < 0.05$). Se detectaron diferencias significativas tanto en meses ($K_{(11,8384)} = 71.37, p < 0.05$) como en años ($K_{(9,8384)} = 94.78, p < 0.05$). Estacionalmente, los valores máximos de esfuerzo se presentaron durante febrero y abril (Fig. 15), mientras que interanualmente los valores máximos se presentaron durante 2010 y 2013 (Fig. 16).

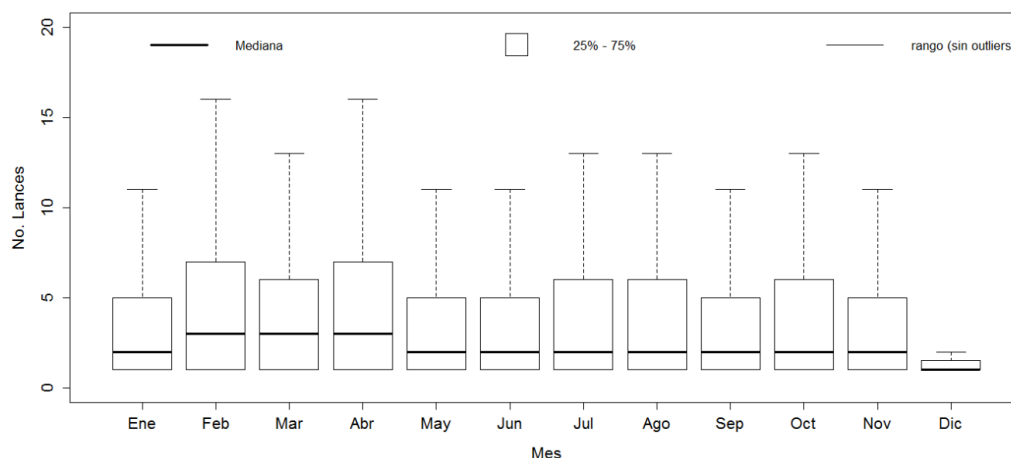


Figura 15. Variación estacional del esfuerzo pesquero de la flota atunera que operó en el Pacífico mexicano de 2004 a 2013.

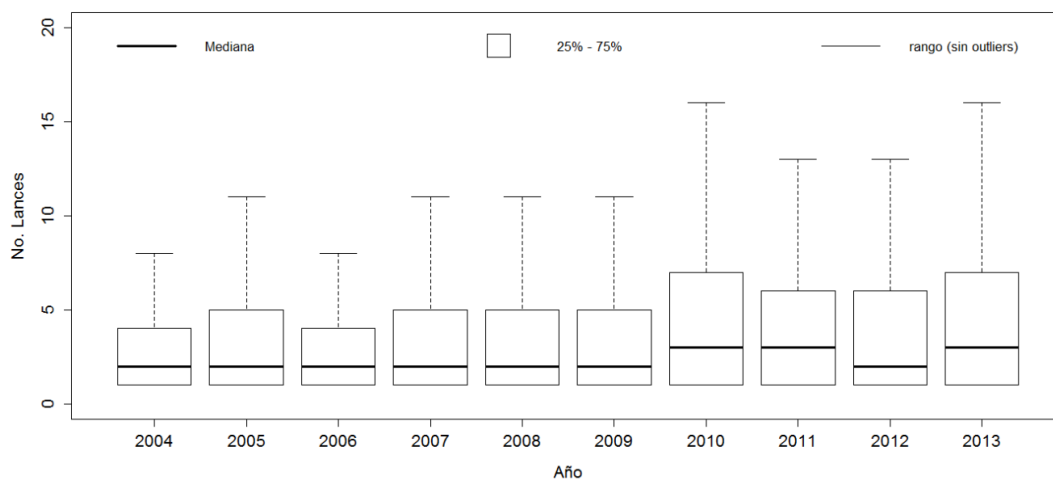


Figura 16. Variación interanual del esfuerzo pesquero de la flota atunera que operó en el Pacífico mexicano de 2004 a 2013.

El máximo número de lances por cuadrante/mes fue de 284, se presentó durante agosto del 2013 en la zona sur de la península de Baja California. Cuadrantes con un lance mensual se presentaron a lo largo de todo el año y en toda el área de estudio. Especialmente, durante los meses de enero – abril, la

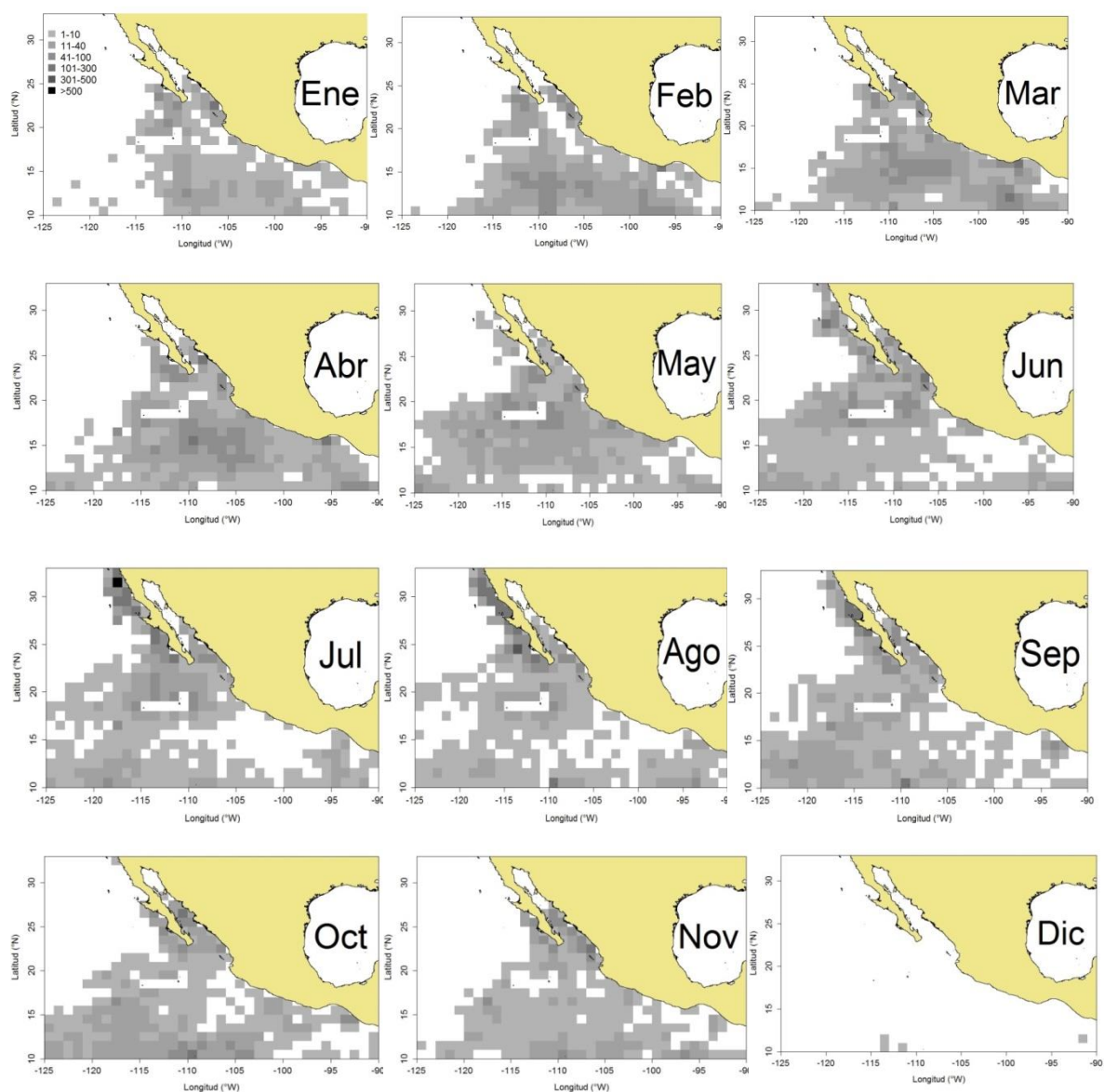


Figura 17. Distribución espacio-temporal de esfuerzo de pesca de la flota atunera que operó en el Pacífico mexicano de 2004 a 2013. El mes correspondiente a cada imagen se encuentra en el Golfo de México.

mayoría del esfuerzo pesquero se concentró al sur de los 25°N, tanto en la región oceánica como en la zona costera, incluyendo la alberca de agua cálida. De mayo a septiembre, una cantidad considerable de lances de pesca se realizaron en la costa occidental de la península de Baja California, aunque se presentaron lances

prácticamente en toda el área de estudio. Para octubre, el esfuerzo volvió a concentrarse al sur de los 28°N y en la entrada del Golfo de California, presentándose sólo un escaso número de lances durante el mes de diciembre (Fig. 17).

Tanto el análisis de regresión lineal simple ($b=0.03$, $p<0.05$) como la prueba de KPSS ($p<0.05$) sugirieron que la serie de tiempo del esfuerzo presentó una tendencia al aumento hacia los últimos años del período de estudio (Fig. 18).

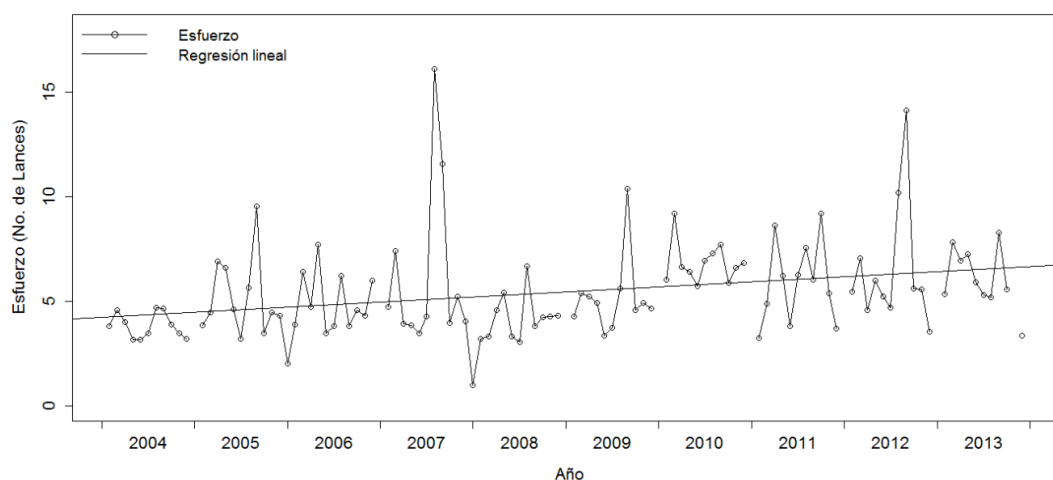


Figura 18. Serie de tiempo de esfuerzo pesquero de la flota atunera. La línea recta denota el ajuste de una regresión lineal simple.

7.3. Ambiente

7.3.1 Temperatura superficial del mar

La temperatura superficial del mar mostró un ciclo estacional típico, aunque menos marcado, de una región tropical, con temperaturas menores durante la primera mitad del año y mayores durante la segunda (Fig. 19). Los promedios mensuales de los 10 años de imágenes satelitales no mostraron una distribución

normal ($p < 0.05$) ni fueron homocedásticos ($B_{(11,64133)} = 1432, p < 0.05$), variación que resultó ser estadísticamente significativa ($H_{(11,64133)} = 6374, p < 0.05$).

Anualmente, se presentaron temperaturas más altas durante el año de 2009, mientras que durante 2008 se presentaron las temperaturas menores (Fig. 20). Al no cumplirse los supuestos de normalidad ($p < 0.05$) ni homocedasticidad de variancias ($B_{(9,64133)} = 146.1, p < 0.05$), se procedió a aplicar estadística no paramétrica, la cual reveló que se registraron diferencias interanuales significativas en la temperatura superficial del mar dentro del área de estudio ($H_{(9,64133)} = 341.7, p < 0.05$).

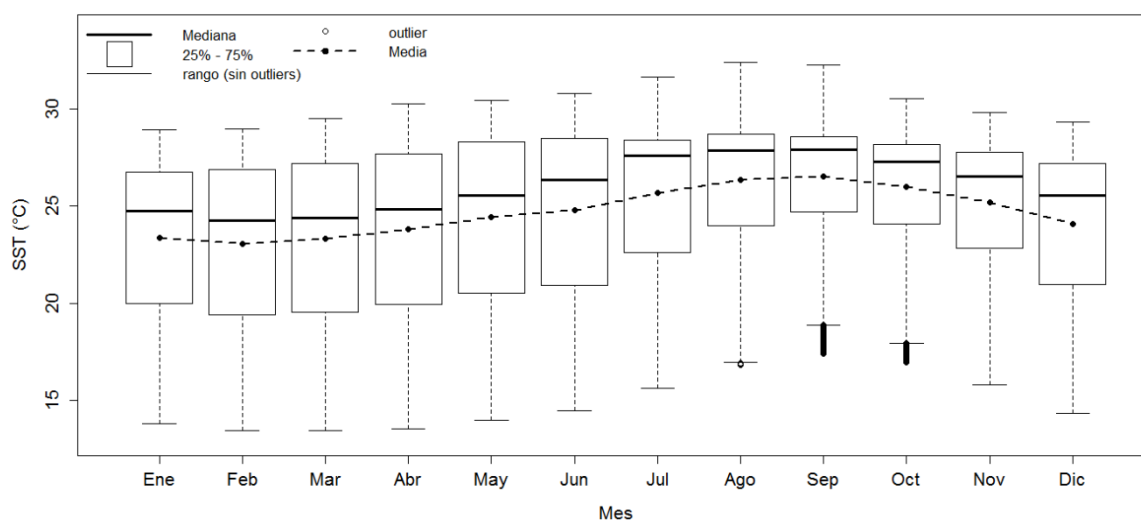


Figura 19. Variación estacional de temperatura superficial del mar en el Pacífico mexicano.

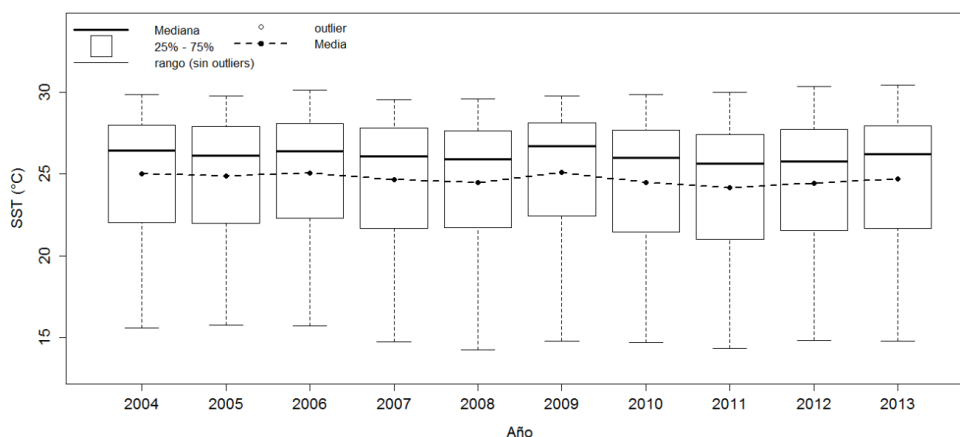


Figura 20. Variación interanual de la temperatura superficial del mar en el Pacífico mexicano.

Espacialmente, durante enero, se observó un giro en la zona oceánica del Golfo de Tehuantepec, denotado por la isoterma de 25°C. En el Pacífico central mexicano se registró la alberca de agua cálida, la cual presentó temperaturas superficiales de 27°-28°C, mientras que más al norte, la isoterma de los 25°C se encontró con el continente en la zona de Cabo Corrientes, Jalisco, alrededor de los 20°N. Esta isoterma presentó una inclinación latitudinal hacia el sur, ya que en la parte más al SW del área de estudio se ubicó alrededor de los 12.5°N. La isoterma de 21°C se registró entre los 20° y 23°N, encontrándose con la costa occidental de la península de Baja California, la zona sur del Golfo de California y al sur de la bahía de La Paz (Fig. 21). Durante el mes de febrero se observó un calentamiento de la zona del Golfo de Tehuantepec, ya que la isoterma de 25°C fue reemplazada por la de 26°C; algo similar ocurrió en la alberca de agua cálida del Pacífico central, en donde la isoterma de 27° desapareció, encontrándose aguas por encima de esa temperatura. Por el contrario, la región de Cabo Corrientes, Jalisco presentó un ligero enfriamiento, ya que la isoterma de 25°C fue desplazada aproximadamente un grado hacia el sur, caso similar al que sucedió con la isoterma de 21°C en la costa suroccidental de la península de Baja California. En la zona más al norte, se observó una deformación de la isoterma de

15°C, la cual se ubicó paralela a la costa, de los 32° a los 29°N, aproximadamente (Fig. 21).

Marzo fue el primer mes en el que se observó la isoterma de 29°C en el área de estudio, encontrándose tanto en la alberca de agua cálida, como en las costas de Chiapas, interrumpida latitudinalmente por una zona de aguas menos cálidas en el Golfo de Tehuantepec. La zona de surgencias en la región de Cabo Corrientes siguió presente; durante este mes se registró una intrusión hacia el Golfo de California de aguas 1°C más cálidas que el mes anterior, mientras que en la parte NW de la península de Baja California las isotermas de 16° y 17°C se deformaron hacia el SE. La isoterma de 15°C se rompió hacia el norte del área de estudio, desprendiendo una lengüeta de agua templada, la cual se observó paralela a la costa NW de la península de Baja California, de 28° a 33°N, aproximadamente (Fig. 21). El ancho de esta lengüeta disminuyó para el mes de abril, mientras que la deformación hacia el SE de las isotermas de 16° - 18°C se hizo más notoria en este mes; asimismo continuó la intrusión de aguas cálidas al Golfo de California, mientras que la isoterma de los 25°C “envolvió” a las islas Marías. La isoterma de 29°C, denotada por un giro en la alberca de agua cálida durante el mes anterior, invadió la parte SE del área de estudio, mientras que apareció por primera vez en el año la isoterma de 30°, en las costas de Chiapas. Las isotermas de 28° - 26° se registraron paralelas a la costa en el Pacífico central, curveándose hacia el océano abierto alrededor de los 13° - 15°N (Fig. 21).

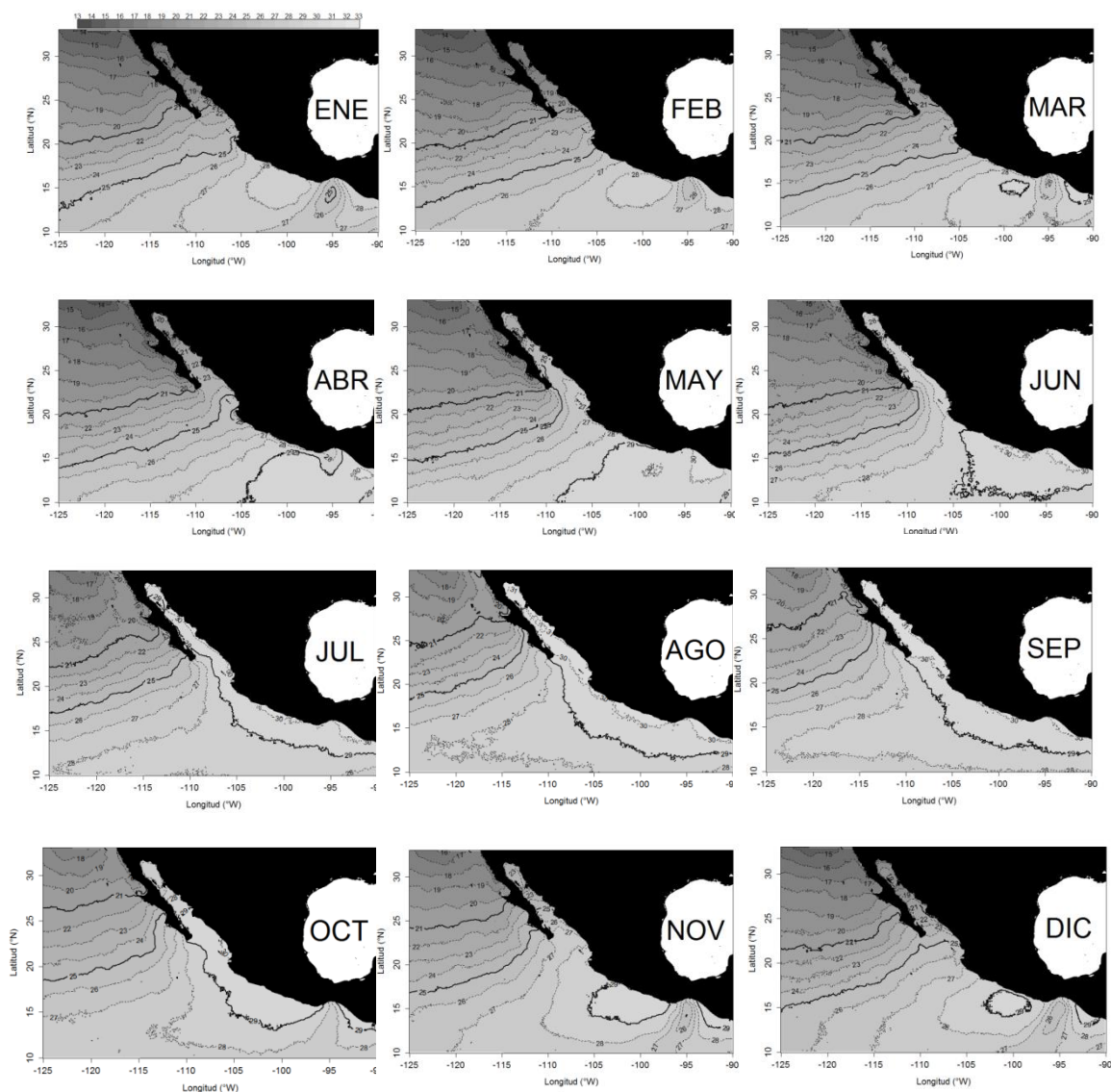


Figura 21. Promedios mensuales de 10 años de imágenes de satélite mensuales, de temperatura superficial del mar. El mes correspondiente a cada imagen está en el Golfo de México.

Para mayo, la zona de surgencias en la parte NW de la península de Baja California siguió siendo notoria, mientras que la intrusión de agua cálida causó que la isoterma de 25°C se adentrara en el Golfo de California, encontrándose temperaturas de entre 24° y 25° en la parte sur y centro, y de 22° en el alto Golfo.

Al sur, la surgencia de Cabo Corrientes disminuyó en intensidad, mientras que bajo los 15°N se localizó un giro cálido con temperaturas de 30°C, y un parche de agua con temperaturas similares pegado a las costas de Chiapas (Fig. 21).

Durante junio se observó una intrusión de agua “cálida” (~ 3°C mayor al agua que la rodea) en la parte NW de la península de Baja California. La isoterma de 25°C desapareció dentro del Golfo de California, el cual presentó temperaturas de > 26°C a lo largo de toda la cuenca. En la parte del Pacífico central, la alberca de agua cálida estuvo claramente definida por la isoterma de 29°C, mientras que el giro con temperaturas de ~ 30°C observado el mes anterior se pegó a la costa, a la par de que el parche de agua cálida de temperaturas similares se hizo más angosto (Fig. 21).

La intrusión de agua cálida en la parte NW de la península de Baja California fue notorio también en el mes de julio, encontrándose temperaturas de ~ 20°. La intrusión de agua cálida hacia el Golfo causó una curvatura en las isotermas 26° - 28°C. Esta última isoterma se extendió desde la punta sur de la Península hasta la parte más al SW del área de estudio, corriendo prácticamente paralela al paralelo de 10°N. Las isotermas de 29° y 30°C siguieron la forma de la costa, encontrándose paralelas al continente desde el sur del área de estudio hasta el alto Golfo de California (Fig. 21).

En agosto, la intrusión de agua cálida continuó en la parte NW de la península, lo cual causó que apareciera la isoterma de 21°C a una latitud de ~ 32°N. Las temperaturas mensuales más altas de todo el período de estudio se encontró en este mes, registrándose temperaturas > 31°C dentro del Golfo de California. En el Pacífico central, el área cubierta por aguas con temperaturas > 28°C disminuyó, mientras que las isotermas de 29° y 30°C siguieron apareciendo paralelas al continente (Fig. 21).

Las condiciones de temperatura superficial del mar en el Pacífico mexicano fueron similares en agosto y en septiembre: una intrusión de agua “cálida” (~

21°C) en la parte NW de la península, con una lengüeta de agua templada (; 20°C) pegada a la costa en la misma región. Las isothermas de 29° y 30° corrieron paralelas a la costa, invadiendo el Golfo de California, el cual presentó temperaturas de ~ 31°C (Fig. 21).

Para octubre, la isoterma de 21°C desapareció de la zona más al norte del área de estudio, y una lengüeta de agua templada (< 18° C) se observó en la parte NW de la península de Baja California. Mientras que el Golfo de California empezó a enfriarse, un parche de agua cálida (> 30°C) se registró en la entrada al Golfo, en las costas de Nayarit, al W de las islas Marías, mientras que las isothermas de 28° y 29°C se “rompen” en la zona central del Golfo de Tehuantepec (Fig. 21).

Durante noviembre, el enfriamiento del Golfo de California continuó, ya que se encontraron temperaturas de ~ 23° en la parte norte, y de ~ 27°C en la parte sur. La isoterma de 25°C, que un mes anterior chocaba con la península alrededor de los 25°N, se desplazó hacia el sur, encontrándose ahora con la península alrededor de los 22°N. Quizá lo más notorio durante este mes fue la delimitación clara de la alberca de agua cálida en el Pacífico central, y el inicio de la temporada de giros en la región del Golfo de Tehuantepec, en donde se registró la isoterma de 25°C a una latitud de ~14°N (Fig. 21).

En diciembre se observó un enfriamiento notorio del Golfo de California, encontrándose dentro de él temperaturas < 19°C en la región de las grandes islas y al norte, mientras que la isoterma de 21°C apareció en la región sur. En el Pacífico central, los círculos formados por las isothermas de 27° - 29°C disminuyeron en extensión, mientras que el polígono formado por la isoterma de 29°C se desprendió de la costa (Fig. 21).

7.3.2 Clorofila-a

Al igual que la SST, los valores de Chl-a mostraron una distribución distinta a la normal ($p < 0.05$). Estacionalmente, los valores máximos de Chl-a ocurrieron

durante los meses de invierno y otoño, mientras que los valores más bajos se presentaron durante los meses de verano (Fig. 22). La variancia entre meses no fue homocedástica ($B_{(11,78593)} = 1657, p < 0.05$), y la prueba de ANOVA no paramétrica reveló que las diferencias estacionales resultaron ser significativas ($H_{(11,78593)} = 4999, p < 0.05$).

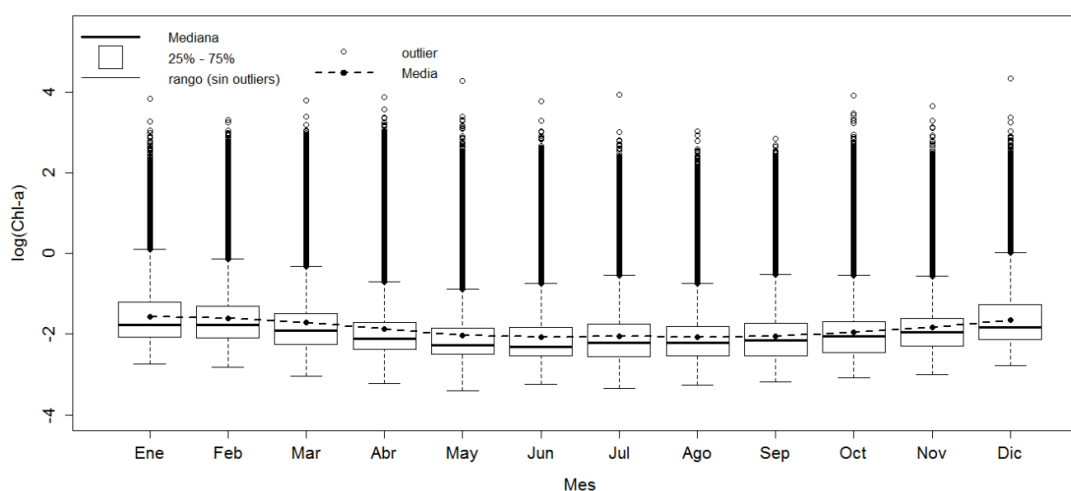


Figura 22. Variación estacional de la concentración superficial de Clorofila-a.

La varianza en los valores de Chl-a entre los distintos años del período de estudio no fue homocedástica ($B_{(9,78593)} = 1963, p < 0.05$). Interanualmente, existieron ligeras diferencias en la concentración superficial de clorofila, encontrándose dos picos “máximos” durante los años de 2008 y 2011 (Fig. 23). A pesar de ser ligeras, estas diferencias interanuales fueron estadísticamente significativas ($H_{(9,78593)} = 481.4, p < 0.05$).

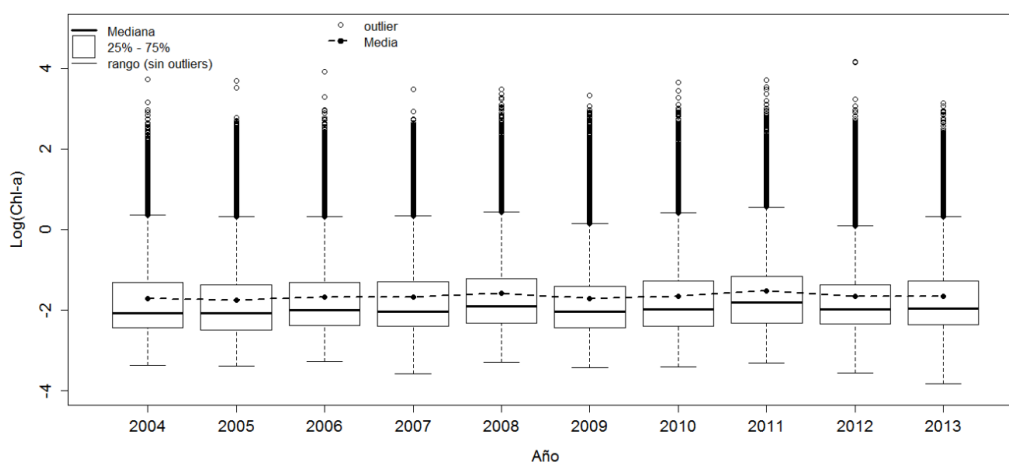


Figura 23. Variación interanual de la concentración superficial de Clorofila-a.

En promedio de los 10 años, en el mes de enero, se encontró la presencia de agua oceánica oligotrófica ($< 0.1 \text{ mg m}^{-3}$) en una región entre los 17° y los 29°N , en la parte más al W del área de estudio. La isolínea de 0.3 mg m^{-3} siguió la forma de la costa, con excepción de la parte norte de la península de Baja California ($> 30^\circ\text{N}$) y el área del Golfo de Tehuantepec ($< 15^\circ\text{N}$). Concentraciones mayores a 1 mg m^{-3} se observaron en la costa W de la península de Baja California y dentro de todo el Golfo, en la región del Golfo de Tehuantepec, y a lo largo de la costa en el centro del área de estudio. En la región del alto Golfo de California se registró un giro de dimensiones considerables, el cual estuvo delimitado por la isolínea de 1 mg m^{-3} (Fig. 24).

Durante febrero, la distribución espacial de la concentración superficial de Chl-a fue muy similar a enero, con excepción de que la isolínea de 0.3 mg m^{-3} ahora se encontraba más cerca de la costa en el área del Golfo de Tehuantepec, y se desarrolló una zona de surgencias notoria en la zona de Cabo Corrientes, Jalisco ($\sim 21^\circ\text{N}$, -106°W , Fig. 24).

Para el mes de marzo, la masa de agua oligotrófica, delimitada por la isolínea de 0.1 mg m^{-3} , se extendió hacia el SE, de -115°W en enero y febrero, a -

110°W en este mes. Mientras que se presentaron zonas de surgencia intensa en la costa W de la península de Baja California, la isolínea de 1 mg m^{-3} desapareció de la región del alto Golfo. Durante este mes persistió la surgencia en la región de Cabo Corrientes, mientras que el área cubierta por agua con concentraciones de Chl-a de $0.3 - 1 \text{ mg m}^{-3}$ en la zona oceánica frente al golfo de Tehuantepec, disminuyó durante este mes (Fig. 24).

En abril, la masa de agua oligotrófica permaneció en condiciones similares al mes anterior; la isolínea de 1 mg m^{-3} se adentró más al norte en el Golfo de California, y se despegó de la costa en la costa W de la península de Baja California y en el área de Cabo Corrientes. En la zona del Golfo de Tehuantepec, la cobertura espacial ocupada por la masa de agua con concentraciones de Chl-a de $0.3 - 1 \text{ mg m}^{-3}$ disminuyó aún más, mientras que la superficie cubierta por agua con concentraciones mayores a 1 mg m^{-3} también bajó en esta zona (Fig. 24).

Durante mayo, se observó una zona de surgencia intensa en la costa SW de la península de Baja California; la isolínea de 1 mg m^{-3} penetró hasta la parte central y volvió a aparecer en la zona del alto Golfo. Se observó una disminución en la intensidad de la surgencia en la región de Cabo Corrientes, mientras que la masa de agua con concentraciones menores a 0.1 mg m^{-3} se propagaron hacia el E, extendiéndose hasta cerca de los 98°W . En la región del Golfo de Tehuantepec, la isolínea de 1 mg m^{-3} se encontró pegada a la costa, mientras que el área ocupada por aguas con concentraciones de $0.3 - 1 \text{ mg m}^{-3}$ en esta región fue mínima (Fig. 24).

Durante junio, la masa de agua con concentraciones bajas de Chl-a ($< 0.1 \text{ mg m}^{-3}$) se empezó a retraer hacia el océano. La mayor intensidad de surgencias en este mes se observó en la costa SW de la península de Baja California, encontrándose también una zona de surgencias notoria en la costa de Nayarit, alrededor de las islas Marías. La isolínea de 0.1 mg m^{-3} ocurrió prácticamente a lo largo de todo el Golfo de California, mientras que en la región centro y sur del

área de estudio, las isóneas de 0.3 y 1 mg m^{-3} se encontraron paralelas a la costa (Fig. 24).

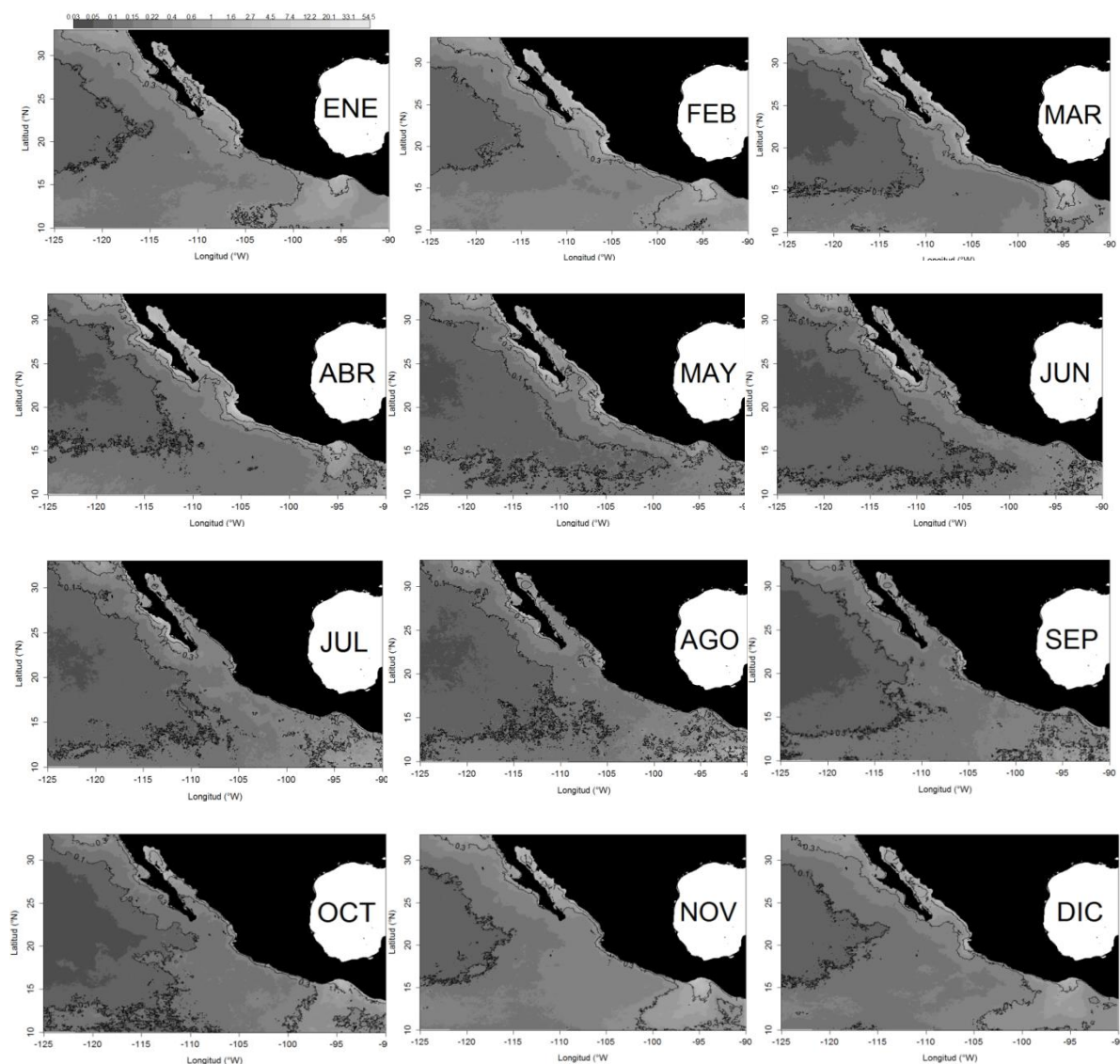


Figura 24. Distribución espacial mensual de la concentración de Chl-a, para el período de 2004 – 2013. El mes correspondiente a cada imagen se encuentra en el Golfo de México.

La retracción de agua oligotrófica oceánica continuó durante el mes de julio. Mientras que la intensidad de las surgencias en la costa SW de la península de Baja California disminuyó en intensidad, las isóneas de 0.3 y 1 mg m^{-3} se

“pegaron” a la costa en la zona frente a Nayarit. Aguas con concentraciones de $\sim 0.3 \text{ mg m}^{-3}$ penetraron en el Golfo de California, encontrándose un giro bien definido en el alto Golfo. En la zona centro y sur del área de estudio las isotermas de 0.3 y 1 mg m^{-3} continuaron paralelas a la costa, mientras que en la región más al SE del área de estudio se observó una estructura no muy organizada, denotada por la isolínea de 0.3 mg m^{-3} (Fig. 24).

En agosto continuo la retracción de agua oligotrófica hacia el W-NW. La surgencia en la costa NW de la península disminuyó en intensidad, y aguas con concentraciones menores a 0.3 mg m^{-3} invadieron la parte sur y centro del Golfo; el giro del alto Golfo siguió como una estructura bien definida, y aumentó su tamaño. Una lengüeta de agua con concentraciones mayores a 0.3 mg m^{-3} se desprendieron de la costa de Nayarit, en la región de las islas Marías, mientras que las isolíneas de 0.3 y 1 mg m^{-3} siguieron encontrándose paralelas en la parte central del área de estudio. La isolínea de 0.3 mg m^{-3} se despegó de la costa en el Golfo de Tehuantepec, y la isolínea de 1 mg m^{-3} apareció en la zona más al SE del área de estudio (Fig. 24).

En septiembre el parche de agua oceánica con valores de Chl-*a* menores a 0.1 mg m^{-3} disminuyó ligeramente su tamaño; se detectaron dos zonas de surgencia: una en la costa SW de la península de Baja California y otra en las costas de Nayarit ($\sim 22^\circ\text{N}$). Mientras que la isolíneas de 0.3 mg m^{-3} invadieron la zona sur y centro del Golfo, el giro del norte aumentó de tamaño, teniendo concentraciones de Chl-*a* menores a 0.3 mg m^{-3} en su centro. Aunque las isolíneas de 0.3 y 1 mg m^{-3} se encontraron pegadas a la costa en la zona centro y sur, algo de actividad se apreció en la zona oceánica frente al Golfo de Tehuantepec, en la región más al SE del área de estudio (Fig. 24).

Durante octubre el parche de agua oligotrófica aumentó en extensión, mientras se observaron zonas de surgencia aisladas, unas en la costa SW de la península de Baja California, y otra en las costas de Jalisco y Nayarit. El giro del

alto Golfo se presentó como una estructura definida, ocupando toda la región al N de las grandes islas, mientras que la isolínea de 1 mg m^{-3} penetró en la parte sur del Golfo. Durante este mes inicia la actividad en la región costera y oceánica del Golfo de Tehuantepec, ya que la isolínea de 0.3 mg m^{-3} se desprendió de la costa, definiendo una estructura oceánica en la parte más al SE del área de estudio (Fig. 24).

El parche de agua oceánica con concentraciones menores a 0.1 mg m^{-3} disminuyó durante noviembre. Las zonas de surgencia en la costa W de la península de Baja California y en las costas de Jalisco y Nayarit se mantuvieron durante este mes, aunque su extensión no fue muy notoria; dentro del Golfo de California, las isolíneas de 0.3 y 1 mg m^{-3} se retraen hacia el S, mientras que en el alto Golfo el giro sigue teniendo un tamaño considerable. Las surgencias en la costa E del Golfo empezaron a ser notorias. En el área central del Pacífico mexicano, las isolíneas siguen pegadas a la costa, mientras que en el Golfo de Tehuantepec la isolínea de 1 mg m^{-3} se alejó de la costa, y el parche de agua con concentraciones de Chl-a mayores a 0.3 mg m^{-3} se extendió hacia el W, hacia océano abierto (Fig. 24).

En diciembre el parche oceánico oligotrófico se mantiene similar, con respecto al mes anterior, en dimensiones y posición. La isolínea de 0.3 mg m^{-3} salió del Golfo de California, mientras que las surgencias de la costa E aumentaron en intensidad, al igual que las surgencias en la región de Cabo Corrientes, Jal. El giro en el alto Golfo siguió delimitado por la isolínea de 1 mg m^{-3} , mientras que en el Golfo de Tehuantepec aunque la isolínea de 1 mg m^{-3} se encontró más cerca de la costa, el parche de agua con concentraciones $> 0.3 \text{ mg m}^{-3}$ aumentó en dimensión (Fig.24).

7.3.3 Altura del nivel del mar

El vector de SSH presentó una distribución distinta a la normal ($D=0.028, p < 0.05$) y heterogeneidad de varianzas tanto para la variación

estacional ($K_{(11,106560)} = 1511.20, p < 0.05$) como para la interanual ($K_{(9,106560)} = 325.15, p < 0.05$). Los valores más altos de SSH se presentaron durante los meses de primavera, mientras que los valores menores se registraron durante los meses de otoño (Fig. 25). Estas diferencias resultaron ser significativas ($H_{(11,106560)} = 951.17, p < 0.05$).

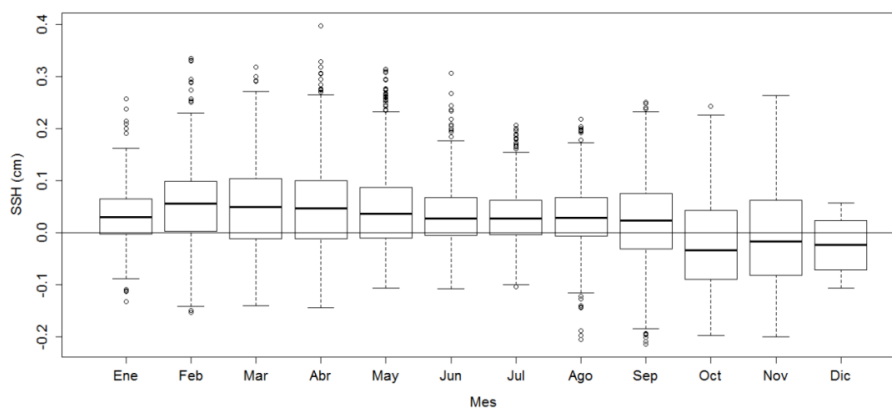


Figura 25. Variación estacional de la altura del nivel del mar.

Las diferencias interanuales de SSH también fueron estadísticamente significativas ($H_{(9,106560)} = 3297.40, p < 0.05$). Los valores máximos se presentaron durante 2005, y los mínimos durante 2011 (Fig. 26).

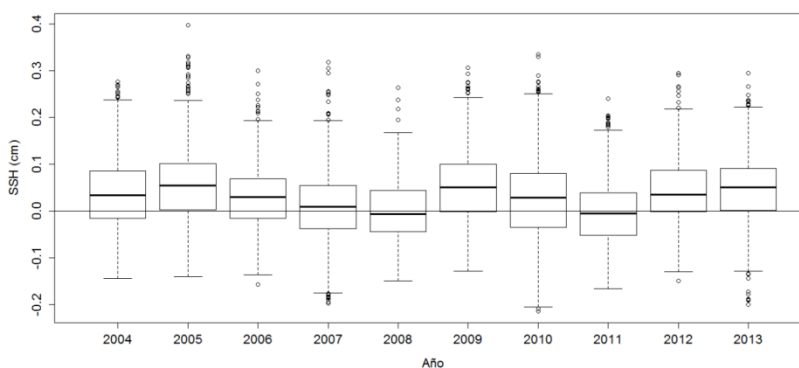


Figura 26. Variación interanual de la altura del nivel del mar.

Durante enero, valores negativos de SSH ocuparon prácticamente todo el Golfo de California, la región del Golfo de Tehuantepec y una región oceánica en la parte SW del área de estudio. Una estructura ciclónica de tamaño considerable se encontró en la zona oceánica del Pacífico central, alrededor de los 12°N, 104°W (Fig. 27). En febrero, prácticamente toda la zona costera del área de estudio, con excepción de la costa occidental de la península de Baja California, fue ocupada por valores negativos de SSH. En la zona sur del área de estudio se registraron tres estructuras de carácter anticiclónico, mientras que el parche oceánico de valores bajos de SSH encontrado en enero disminuyó en tamaño (Fig. 27).

Para marzo la lengüeta costera de SSH negativas se extendió por la península de Baja California, hasta ~ 30°N, mientras que el parche oceánico desapareció. Las estructuras anticiclónicas permanecieron, creciendo en tamaño (Fig. 27).

En abril, toda la zona costera del área de estudio presentó valores negativos de SSH. Las tres estructuras anticiclónicas parecieron desplazarse hacia el W, mientras que la isolínea de 0 cm se encontró cerca de la costa en el Golfo de Tehuantepec (Fig. 27).

En mayo, la lengüeta de valores negativos de SSH ocupó la zona costera hacia el norte del Golfo de Tehuantepec, así como un área oceánica en la parte central; valores positivos (~ 0.1 m) invadieron la zona de Tehuantepec, mientras que alturas positivas ocuparon toda la parte sur del área de estudio (Fig. 27).

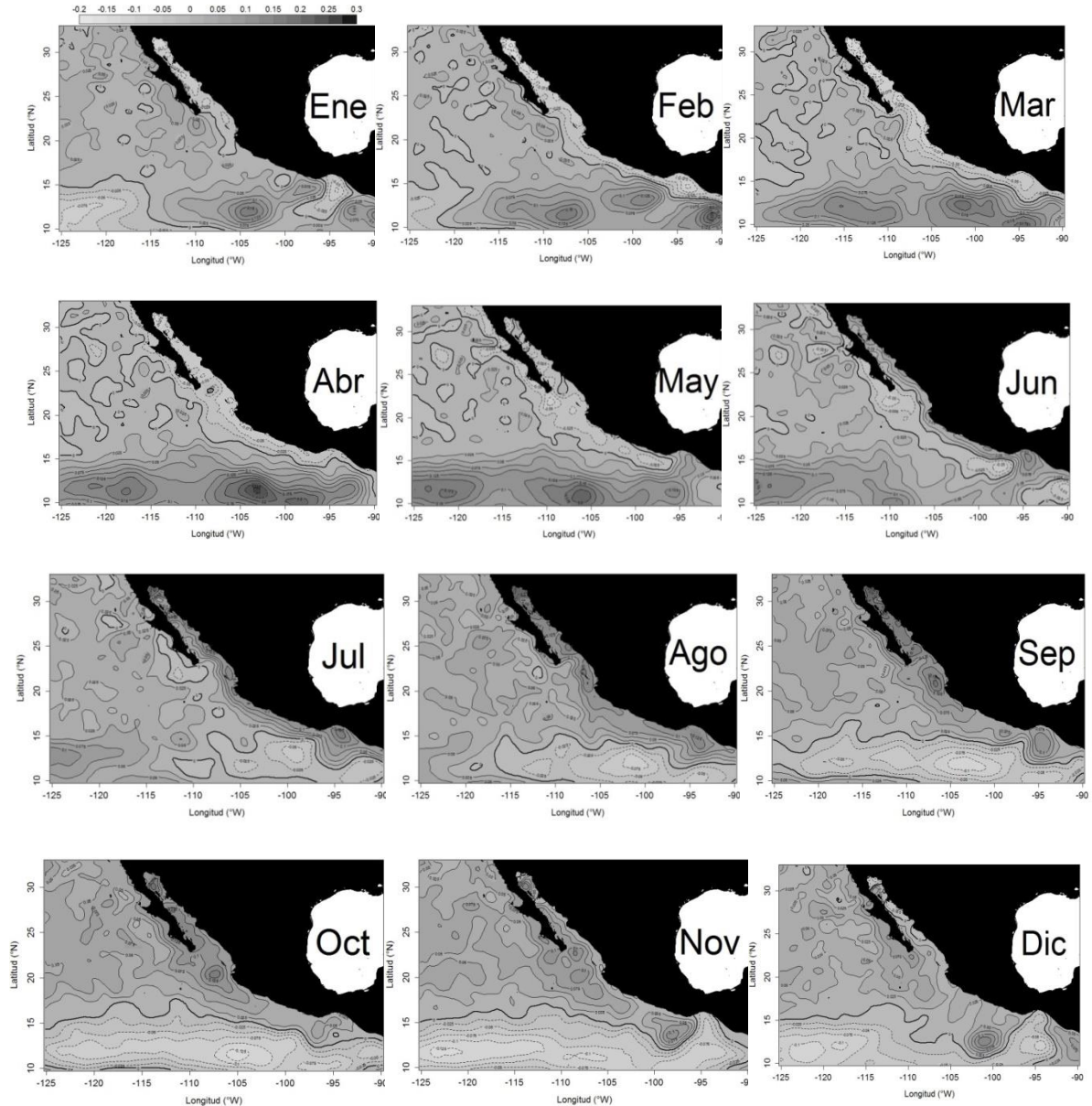


Figura 27. Distribución espacial de la altura del nivel. Las líneas continuas y quebradas denotan valores positivos y negativos de SSH, y la línea continua gruesa denota valores de 0 m. El mes que corresponde a cada imagen se encuentra en el Golfo de México.

La lengüeta de SSH negativas se despegó de la costa durante junio. Una estructura anticiclónica definida se observó en el Golfo de Tehuantepec, mientras

que una estructura ciclónica se registró al sur del Golfo. La zona costera, el Golfo de California y la zona suroeste del área de estudio fueron ocupados por aguas con valores de SSH positivos durante este mes. Algunas estructuras ciclónicas se observaron cerca de la península de Baja California (Fig. 27).

Con excepción de estructuras aisladas cerca de la península de Baja California y una lengüeta que se extendió por la parte SE, toda el área de estudio registró valores positivos de SSH durante julio. Las isolíneas corrieron paralelas a la costa, y un giro anticiclónico se formó en la región del Golfo de Tehuantepec (Fig. 27).

Las isolíneas de valores positivos de SSH siguieron paralelas a la costa en agosto, pero estuvieron más separadas entre sí. Las estructuras ciclónicas cercanas a la península de Baja California Sur desaparecieron, y la lengüeta de la zona sur se extendió hasta los $\sim 116^{\circ}\text{W}$ (Fig. 27). Al mes siguiente, en septiembre, esta lengüeta ocupó toda la parte sur; en el resto del área se encontraron valores positivos, con estructuras en Cabo Corrientes y el Golfo de Tehuantepec (Fig. 27).

El panorama en el mes de octubre fue similar a septiembre: la lengüeta de valores negativos se extendió por toda la porción sur del área de estudio (aunque creció en tamaño), mientras que el resto del área se ocupó por alturas positivas, con algunas estructuras definidas, como en la región de Cabo Corrientes (Fig. 27). Para noviembre, la lengüeta de valores negativos se conectó con el Golfo de Tehuantepec, y se desarrolló una estructura ciclónica en la parte NW de este golfo. El resto del área de estudio siguió ocupada por aguas con altura positiva (Fig. 27). En diciembre se desarrollaron algunas estructuras anticiclónicas en el Golfo de California, mientras que en el de Tehuantepec, en la zona oceánica, se observó un dipolo (Fig. 27).

7.3.4 Frentes térmicos

El gradiente térmico latitudinal calculado fue, en promedio, de $0.012^{\circ}\text{C km}^{-1}$, por lo que cualquier pixel con gradiente por encima de $0.12^{\circ}\text{C km}^{-1}$ fue considerado como zona frontal (Fedorov, 1986). En promedio, la mayor actividad de frentes se presentó durante el mes de junio, ya que durante ese mes se encontró el valor máximo de pixeles considerados como frentes ($\sim 9.73\%$). El mes de octubre fue el mes en donde la actividad de frentes fue menor, encontrándose el porcentaje más bajo ($\sim 3.38\%$) de todos los meses (Fig. 28).

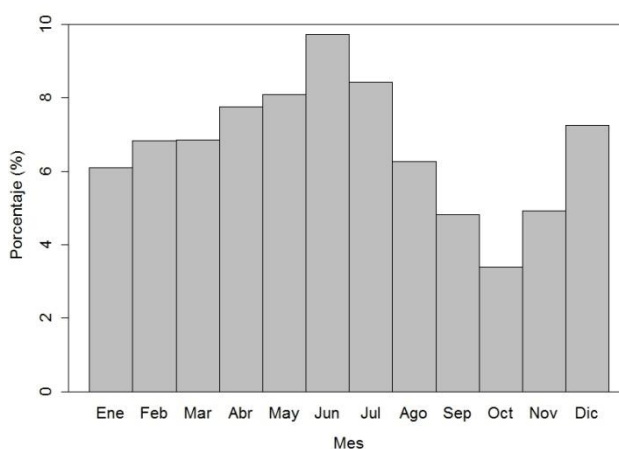


Figura 28. Porcentaje mensual de pixeles considerados como frentes térmicos

Espacialmente, durante el mes de enero se observó una zona frontal importante en el área del Golfo de Tehuantepec, de la que se desprendió una franja costera en la parte central del área de estudio, hasta conectarse a la región de Cabo Corrientes, en donde también se desprendió una lengüeta de zona frontal hacia mar afuera. En la zona oceánica ($15 - 25^{\circ}\text{N}$, $-113 - -125^{\circ}\text{W}$) se registró una zona con filamentos y algunas estructuras aisladas, mientras que la zona con la mayor magnitud de gradiente se localizó en la costa oriental del Golfo de California ($\sim 27^{\circ}\text{N}$, -108°W). Otras zonas frontales se encontraron en la parte central/norte del Golfo, así como en la parte más al norte de la península de Baja California (Fig. 29). Durante febrero, la zona frontal del Golfo de Tehuantepec disminuyó, así como las surgencias dentro del Golfo de California. Por otra parte, la actividad frontal en la zona oceánica aumentó. Al igual que en enero, durante este mes se

presentó poca actividad frontal en la parte oceánica del Pacífico central mexicano (Fig. 29). En marzo el panorama de actividad frontal fue similar a febrero: zonas frontales en Tehuantepec, a lo largo de la costa continental de México, y algunas estructuras en la zona oceánica mencionada anteriormente (Fig. 29). Para abril, la zona frontal de Tehuantepec se retrajo casi totalmente; la surgencia costera siguió presente a lo largo del continente. Dos zonas destacaron por los valores de gradiente térmico: la zona de Cabo Corrientes y la región de las grandes islas dentro del Golfo de California. En la zona oceánica la actividad se mantuvo, mientras que una lengüeta de tamaño considerable se desprendió de la costa occidental de la península de Baja California, la cual se volvió más notoria en Mayo (Fig. 29). Tres zonas destacaron durante este mes: la punta suroeste de la península, la región de Punta Eugenia, al centro de la península ($\sim 27^{\circ}\text{N}$, -114°W), y la región de las grandes islas, dentro del Golfo. La actividad en la región oceánica y en la zona costera se mantuvo, mientras que en la región de Golfo de Tehuantepec se observó muy poca actividad frontal (Fig. 29).

En junio (Fig. 29) la lengüeta de zona frontal de la península de Baja California estuvo en su máxima extensión, extendiéndose hacia el sur, cerca de las Islas Marías ($\sim 21^{\circ}\text{N}$, -106°W). La surgencia costera en el Pacífico central, al igual que la de Tehuantepec, se encontraron ausentes durante este mes. Una importante zona de actividad se presentó en la parte oceánica del área de estudio, centrada alrededor de 19°N , -124°W . Las zonas con los valores máximos de gradiente térmico se localizaron en la región de las grandes islas, en el Golfo de Ulloa ($\sim 25^{\circ}\text{N}$, -113°W) y al norte de Punta Eugenia ($\sim 28^{\circ}\text{N}$, -116°W).

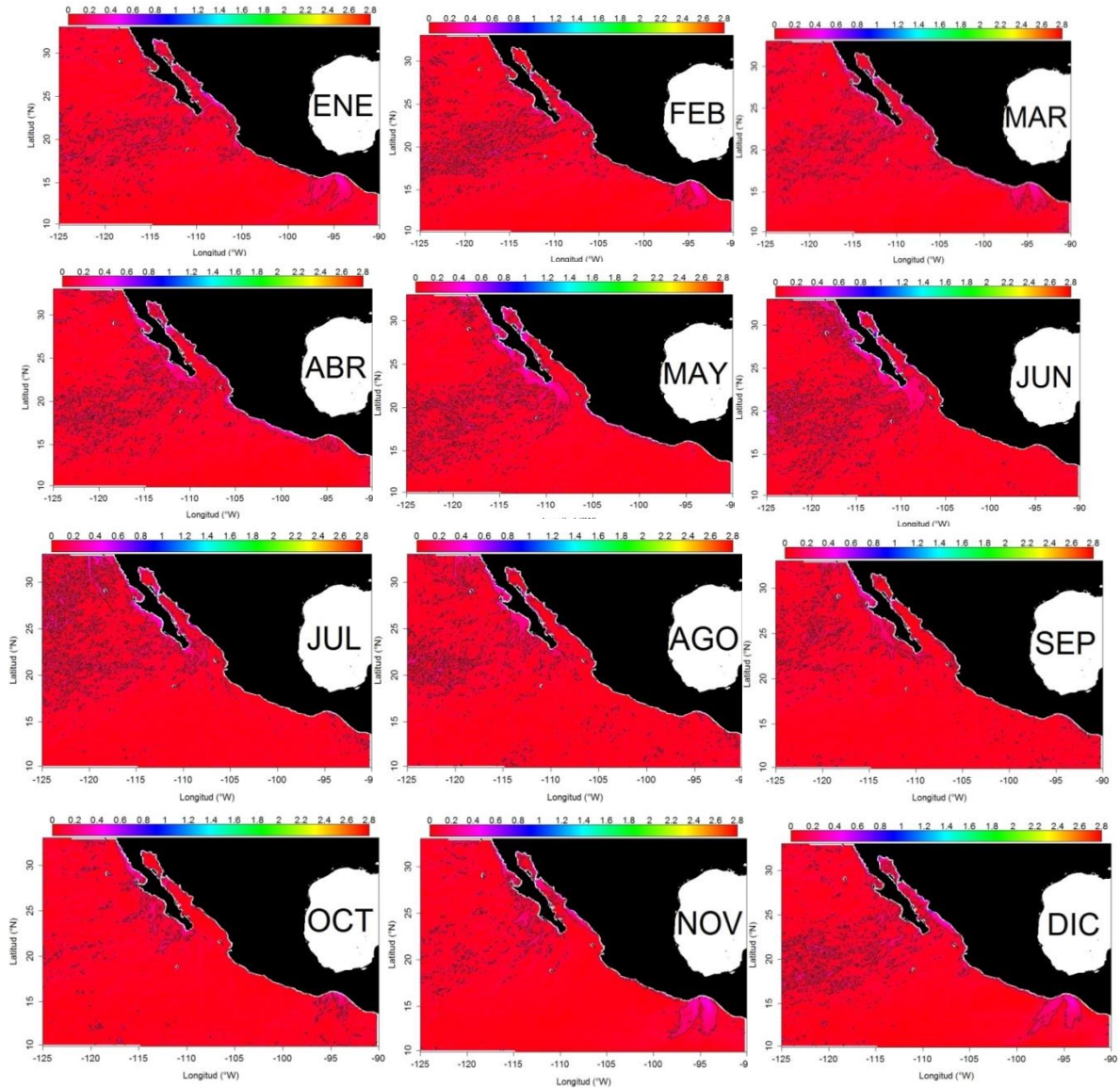


Figura 29. Distribución espacial de la magnitud del vector gradiente de temperatura. Los contornos denotan el valor calculado de umbral, de $0.12^{\circ}\text{C km}^{-1}$. El mes correspondiente a cada figura se encuentra en el Golfo de México.

Durante julio, la lengüeta de zona frontal que se desprendió al sur de la península de Baja California se retrajo. La zona oceánica de alta actividad se movió hacia el NW. Las zonas de valores altos de gradientes se mantuvieron en el Golfo de Ulloa y en la región de las grandes islas. Se detectó poca/nula

actividad en la parte central/sur del área de estudio (Fig. 29). En agosto la lengüeta de la península de Baja California se retrajo aún más. La zona oceánica de actividad frontal se desplazó al Sur, y desaparecieron las zonas con valores altos de valor del vector gradiente. Algunas estructuras aisladas se presentaron en la zona centro y sur del área de estudio (Fig. 29).

Durante septiembre se observó poca actividad frontal; una zona de actividad “desorganizada” se centró alrededor de los 25°N, -120°W. La zona frontal más importante se registró en el Golfo de Ulloa. Estructuras aisladas se presentaron en la zona costera del área de estudio, y en algunas zonas oceánicas (Fig. 29). Octubre fue el mes donde se presentaron el menor número de pixeles considerados como frentes. Las zonas frontales oceánica y de la península de Baja California estuvieron en su estado más moderado. Se empezó a apreciar algo de actividad frontal en la zona del Golfo de Tehuantepec (Fig. 29).

En noviembre se observó poca actividad en la zona oceánica y en la península de Baja California. Una zona frontal importante apareció en la costa oriental del Golfo de California, la cual abarcó desde el sur hasta la región del alto Golfo. Apareció otra zona de actividad costera en la porción centro del área de estudio, mientras que la zona del Golfo de Tehuantepec aumentó considerablemente en tamaño (Fig. 29). Hacia el final del año (diciembre) la zona oceánica de actividad frontal volvió a hacerse notoria. Existió actividad frontal prácticamente en todo el Golfo de California, y se desprendió una lengüeta del área de Cabo Corrientes. El área del Golfo de Tehuantepec fue similar respecto al mes anterior (Fig. 29).

7.4 Relación entre variables biológicas y variables ambientales

7.4.1 Captura incidental

7.4.1.1 Correlación

Dado que tanto los datos de captura como los datos ambientales siguieron una distribución distinta a la normal, se utilizó una correlación de Spearman, con el fin de resaltar la relación lineal entre las variables.

La captura incidental mostró una correlación lineal baja con las variables ambientales. La correlación más alta fue entre la SST y SSH (0.19), mientras que la correlación menor fue de -0.01, entre Chl-a y distancia a frentes (Fig. 30).

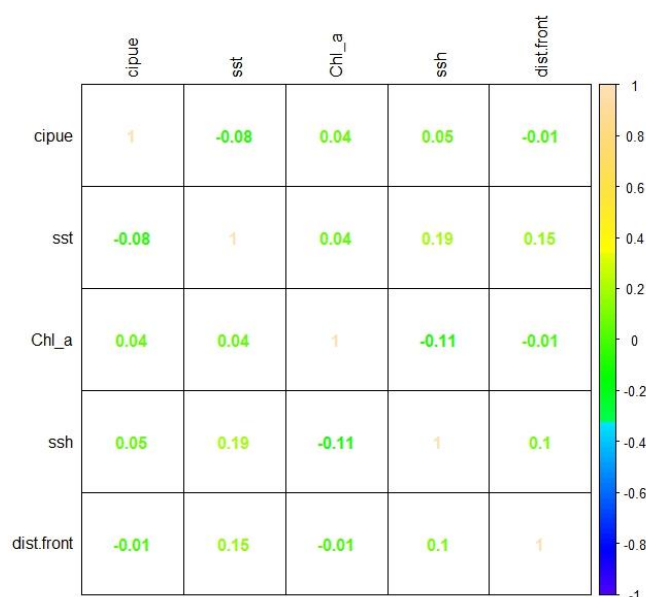


Figura 30. Matriz de correlaciones de Spearman entre la captura incidental (cipue) y las variables ambientales (sst= temperatura superficial, Chl-a Clorofila-a, ssh= altura del nivel del mar, dist.front = distancia a los frentes térmicos).

Mediante la técnica de correlación cruzada de series de tiempo, se encontró que la serie de tiempo promedio mensual de capturas incidentales y la serie de tiempo de temperatura superficial del mar estuvieron mejor correlacionadas de manera directa (0.235) sin desfase temporal, mientras que las series de captura y la de Chl-a estuvieron mejor correlacionadas de manera inversa (-0.291) con un mes de desfase positivo, siendo ambas correlaciones estadísticamente significativas.

La figura 31 mostró las series de tiempo de captura incidental y SST. Ambas variables presentaron una ciclicidad notoria, con la diferencia de que la CIPUE registró dos picos dentro de un mismo año en ciertos años, mientras que la SST mostro sólo uno. El pico máximo de capturas durante el 2004 no parece coincidir con algún evento anormal de temperaturas promedio, ya que el pico máximo de valores de SST se presentó durante 2009, y el mínimo durante 2010.

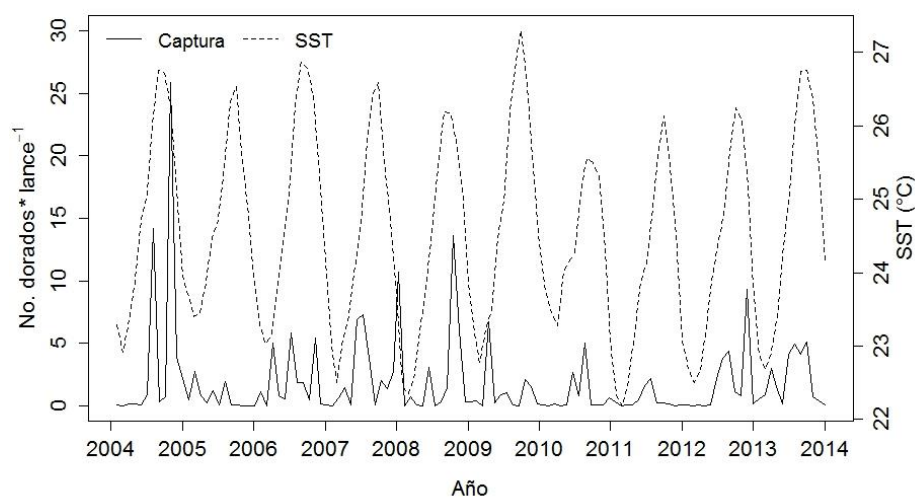


Figura 31. Series de tiempo de promedios mensuales de CIPUE y SST.

Por su parte, las series pareadas de CIPUE y concentración de Chl-a mostraron, de manera general un patrón similar: ciclicidad notoria, y un comportamiento anual bimodal. Existieron tres años con concentraciones altas de Chl-a, 2008, 2011 y 2012; durante 2011 y 2012, estas concentraciones altas coincidieron con los años en los que las capturas promedio fueron las más bajas en toda la serie de tiempo, mientras que durante 2004 los valores más bajos de Chl-a de toda la serie se relacionaron con los valores más altos de CIPUE (Fig. 32).

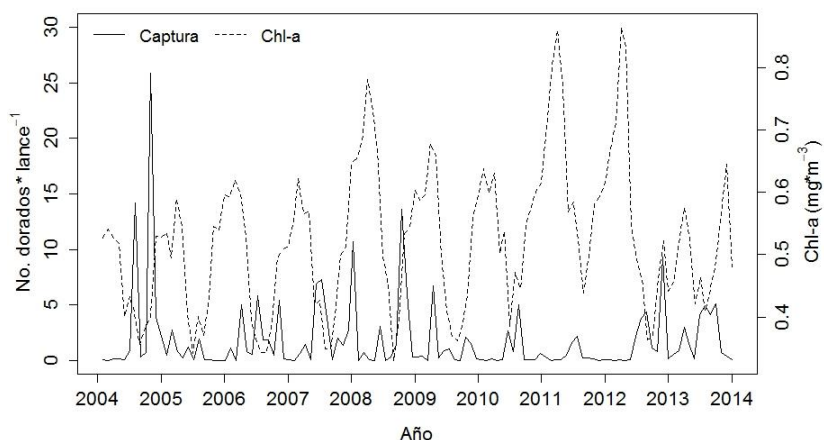


Figura 32. Series de tiempo promedio mensual de captura incidental y concentración de Chl-a.

Se detectó una correlación baja y no significativa (0.137) con dos meses de desfase positivo entre la serie de captura y la serie de altura del nivel del mar, mientras que la correlación de las capturas con la distancia a los frentes térmicos se presentó con seis meses de desfase negativo (0.282), la cual fue estadísticamente significativo.

La serie de tiempo de altura del nivel del mar mostró que, en promedio, se presentaron una altura del mar positiva en una gran parte del período de estudio, con excepción de la segunda mitad del 2007/primer mitad del 2008, comportamiento que se repitió para 2010/2011 y 2011/2013. Como sugirió el resultado del análisis, la relación temporal entre esta variable y la serie de capturas no fue clara, ya que ambas series intercalaron picos máximos y mínimos sin un patrón definido (Fig. 33). Por otro lado, la serie de tiempo de distancia a frentes mostró un interesante decremento hacia el final del período de estudio, y una ciclicidad notoria, con un pico máximo y uno mínimo en cada año. La relación entre la distancia a los frentes y la captura tampoco pareció estar desfasada estacionalmente, ya que algunos de los picos máximos de captura en un año

coincidieron con un valle en la serie de distancia a frentes del mismo año, lo cual fue evidenciado por el desfase de la correlación máxima entre series (Fig. 34).

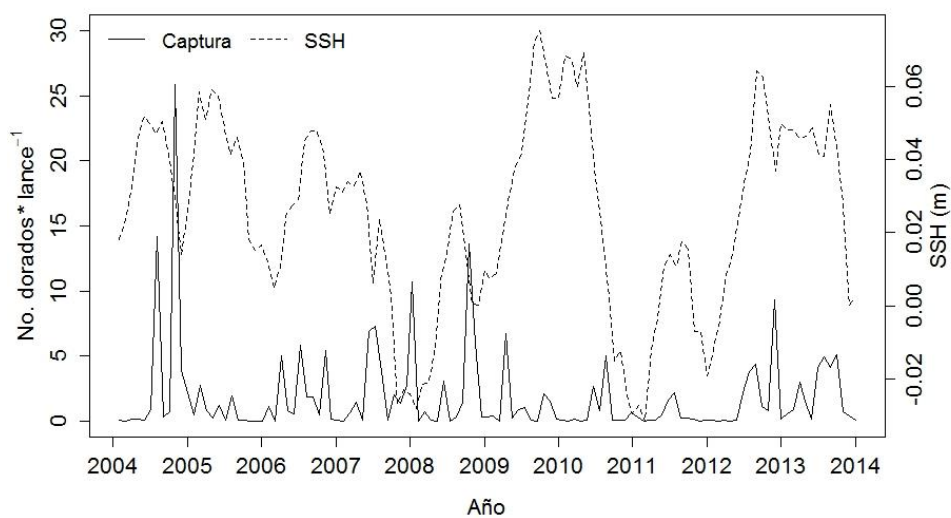


Figura 33. Series de tiempo promedio de captura incidental y altura del nivel del mar.

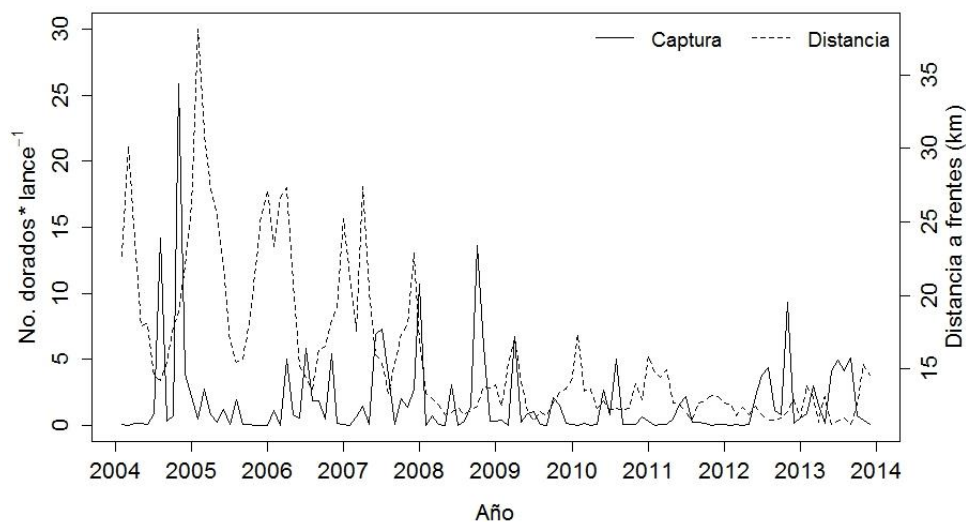


Figura 34. Series de tiempo promedio de captura incidental y distancia a frentes térmicos.

7.4.1.2 Hábitat preferencial

La mayoría de dorados de las clases medianas y grandes se capturaron al sur de la zona de estudio, entre 10° y 12°N. La moda para la clase chica se encontró entre 20° y 22°N (Fig. 35 A). Longitudinalmente, la mayoría de dorados de todas las clases de talla se capturaron al oeste de -111°W, con otra moda entre -96 y -93°W (Fig. 35 B). La moda más importante de los dorados de tallas medianas y grandes se situó entre 27° y 28°C, mientras que para la talla chica se encontró entre 25° y 26°C (Fig. 35 C). El dorado mostró una clara preferencia con aguas con concentraciones de Chl-a bajas, ya que la gran mayoría de captura incidental, de todas las tallas, ocurrió en agua con concentraciones $< 0.2 \text{ mg m}^{-3}$ (Fig. 35 D). En lo que altura del mar se refiere, la mayor parte de la captura ocurrió en valores cercanos al cero, en valores positivos, con una moda importante en valores cercanos al cero, del lado negativo (Fig. 35 E). Mediante este análisis resaltó una notoria preferencia por aguas cercanas a frentes térmicos, ya que la gran mayoría de dorados se capturaron en distancias a frentes $< 20 \text{ km}$ (Fig. 35 F).

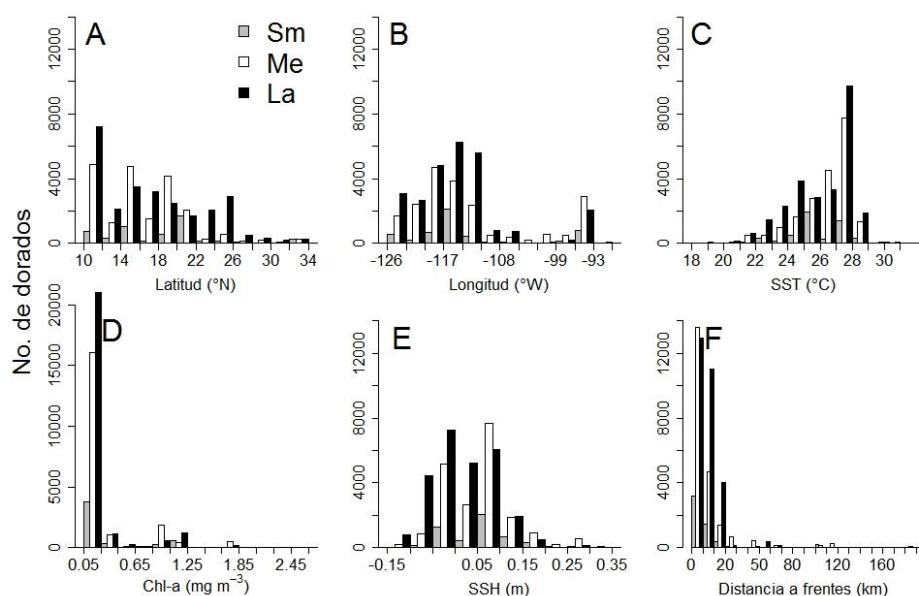


Figura 35. Preferencia espacial y de hábitat del dorado. A) latitud, B) longitud, C) SST, D) Chl-a, E) SSH y F) distancia a frentes térmicos.

7.5 Modelación estadística

7.5.1 Modelos aditivos generalizados

Después de probar distintas aproximaciones estadísticas, como los modelos aditivos inflados por ceros (con distribuciones Poisson y binomial negativa) y los modelos tipo “hurdle” (donde se construye un modelo binomial para los datos de presencia ausencia y un modelo para las capturas positivas), se decidió utilizar una aproximación de presencia/ausencia (binomial) ya que ninguna de las aproximaciones mencionadas arrojó resultados satisfactorios durante el proceso de evaluación. Para evaluar el poder predictivo del modelo, se utilizaron dos métodos de evaluación, el porcentaje de clasificados correctamente (utilizando valores de umbral de 0.1 a 0.7 y extrayendo la media de todos los resultados) y el área bajo la curva ROC. Ambos métodos fueron aplicados a un data set de validación, el cual incluyó 30% de los datos de la base original, elegidos aleatoriamente. La validación del modelo se realizó usando las funciones de la librerías de R *PresenceAbsence* (Freeman y Moisen, 2008) y *ROCR* (Sing *et al.*, 2005).

Los valores de porcentaje de clasificación y área bajo la curva sugirieron que se pueden hacer predicciones de manera confiable (80 ~ 90 %) con el modelo ajustado. La variable ambiental que más ayudó a explicar la probabilidad de captura del dorado fue la SST, seguido de Chl-a, y finalmente SSH, mientras que el aporte de la distancia a los frentes térmicos fue mínima y no significativa, por lo que esta variable fue excluida del modelo final (Tabla II). La variable operacional que más contribuyó fue el número de lances por cuadrante (TotSets). Dos variables operacionales (longitud y la interacción año, longitud) no resultaron ser estadísticamente significativas en el análisis; sin embargo, la primera variable estuvo presente en interacciones que si resultaron ser significativas, por lo que se retuvo en el modelo, mientras que la segunda variable contribuyó en más de dos unidades al AIC, por lo que se decidió retener ambas en el modelo final.

El modelo final explicó un 30 % de la devianza total. Los valores de porcentaje de clasificación y área bajo la curva sugirieron que se pueden hacer predicciones de manera confiable con el modelo ajustado.

Tabla II. Resultados del ajuste del modelo aditivo generalizado a la ocurrencia de dorado en el Pacífico mexicano. La devianza residual denota la bondad de ajuste del modelo. En cursivas se denota la variable que fue excluida del modelo final.

| | Devianza residual | % total de la devianza explicada | AIC | $p(\chi^2)$ |
|---------------------------------|--------------------------|---|------------|-------------|
| NULL | 3316.50 | | 3318.48 | |
| +s(sst) | 3241.40 | 2.26 | 3257.19 | <0.05 |
| +s(log(Chl-a)) | 3173.40 | 4.31 | 3198.70 | <0.05 |
| +s(ssh) | 3140.90 | 5.29 | 3167.12 | <0.05 |
| +s(<i>dist.front</i>)* | 3139.90 | 5.32 | 3168.18 | 0.33 |
| +s(TotalSets) | 2788.80 | 15.90 | 2826.50 | <0.05 |
| +s(Month) | 2724.60 | 17.80 | 2769.28 | <0.05 |
| +s(Year) | 2654.20 | 20.00 | 2725.14 | <0.05 |
| +s(Lon) | 2570.30 | 22.50 | 2638.61 | 0.28 |
| +s(Lat) | 2502.30 | 24.50 | 2590.16 | <0.05 |
| +s(Lon,Lat) | 2383.60 | 28.10 | 2505.00 | <0.05 |
| +s(Year,Lon) | 2398.9 | 28.15 | 2502.87 | 0.07 |
| +s(Year,Lat) | 2315.80 | 30.3 | 2488.78 | <0.05 |
| Devianza total explicada | 30% | | | |

El modelo final quedó de la siguiente manera:

$$P/A \approx s(sst) + s(\log(Chl_a)) + s(SSH) + s(TotSets) + s(Mes) + s(Year) + s(Lat) + s(Lon) + s(Lon, Lat) + s(Year, Lon) + s(Year, Lat) + \varepsilon$$

En las figuras de efecto del GAM se observó que el dorado prefiere temperaturas entre 23° y 28°C, aguas con concentraciones de Chl-a bajas, valores positivos de SSH y número de lances, un pico de captura al principio del año, un

pico máximo durante 2010 - 2013, y más altas probabilidades de captura a valores bajos de longitud y latitud (Fig. 36).

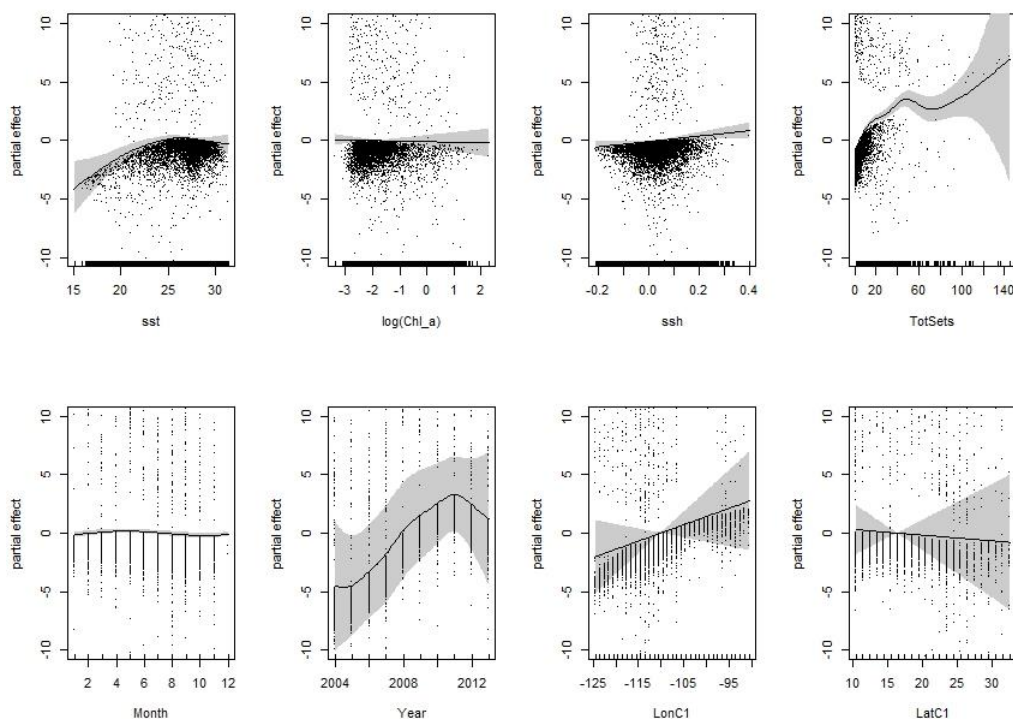


Figura 36. Figuras de efecto del GAM ajustado a los datos de captura incidental. En el eje X se denota cada una de las variables incluidas en el modelo, y en el eje Y el efecto parcial, con sus grados de libertad efectivos.

Los mapas de predicción espacial del hábitat potencial del dorado (utilizando un valor de 6 lances por cuadrante, el valor promedio general) sugirieron que este pez se encuentra en el Golfo de Tehuantepec durante los primeros meses del año; esta zona de altas probabilidades de encuentro está conectada con una zona oceánica (~ 17°N, 122°W) mediante un corredor que está presente durante estos meses. Esta conexión se hace menos evidente en la segunda mitad del año (junio), cuando la zona oceánica de altas probabilidades se extiende formando una lengüeta hasta la península de Baja California, siendo esta temporada también cuando se detectaron altas probabilidades de ocurrencia dentro del Golfo de California.

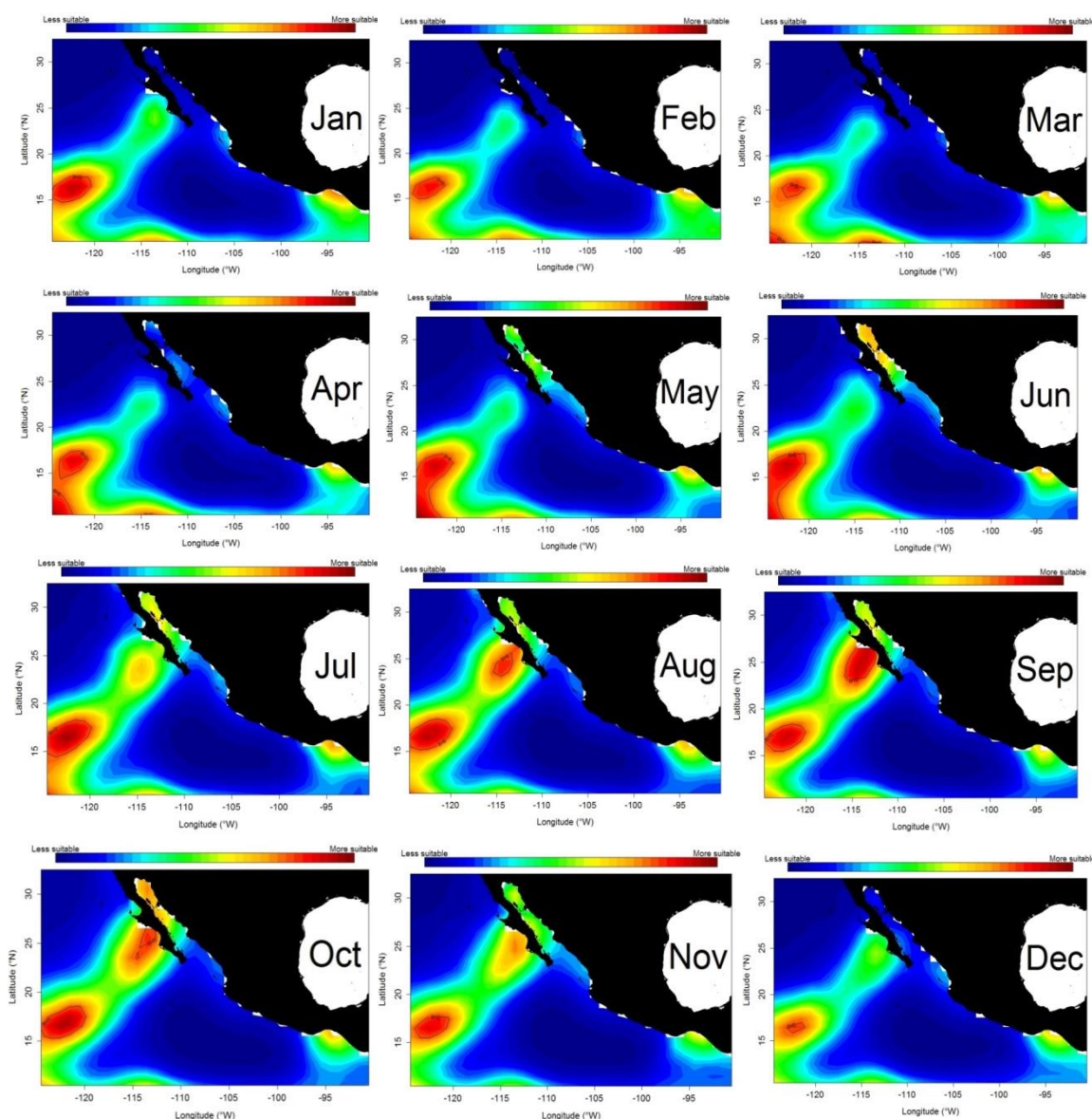


Figura 37. Hábitat potencial (probabilidad de ocurrencia) del dorado en el Pacífico mexicano, inferido mediante predicciones de un GAM de presencia/ausencia. La paleta de colores indica una potencialidad de hábitat baja en azul y alta en rojo. El contorno denota los *hotspots* biológicos (> 95% del vector de predicción). El mes correspondiente a cada imagen se encuentra en el Golfo de México.

Si bien la zona oceánica estuvo presente durante todo el año, pareció ser más extensa durante mayo – junio, mientras que durante los meses de verano (agosto – septiembre) fue cuando se presentó la mayor probabilidad de ocurrencia

en la costa occidental de la península de Baja California. Una característica interesante de la predicción espacial fue que el dorado parece evitar la alberca de agua cálida, ya que las probabilidades de encontrársele ahí son bajas durante todo el año (Fig. 37).

7.5.2 ENFA

La figura 38 ilustró el concepto de Nicho Ecológico para tres de las variables ambientales utilizadas en el análisis: SST, SSH y Chl-a.

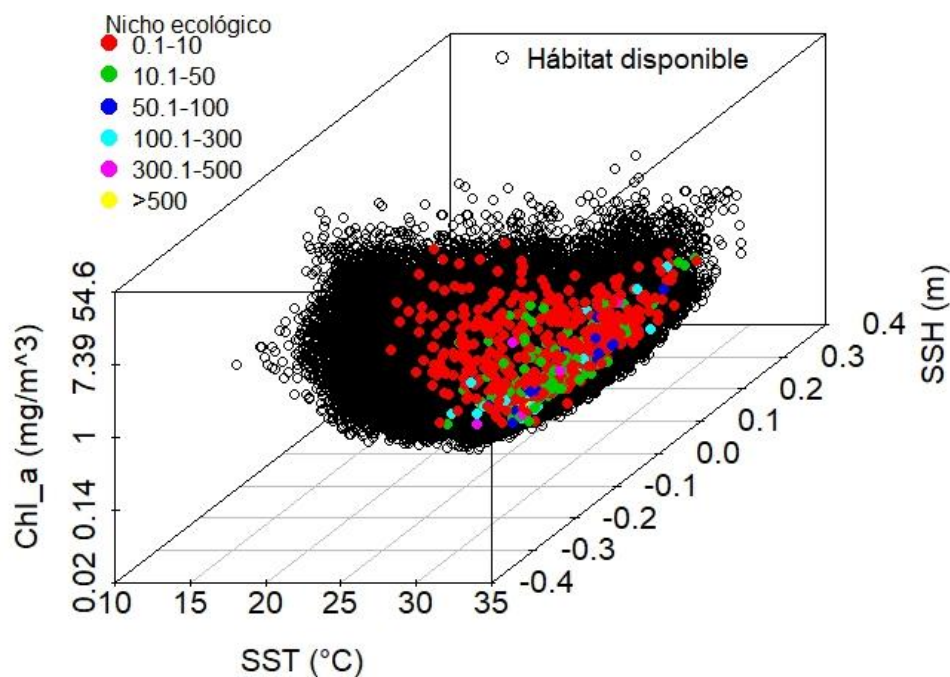


Figura 38. Nicho ecológico del dorado (hábitat disponible en puntos negros, y hábitat utilizado en puntos en color) del dorado en el Pacífico mexicano. La escala de colores indica los distintos valores de CIPUE.

El modelo ENFA para la temporada de invierno sugirió que durante estos meses el dorado se encontró restringido a una porción del hábitat disponible, ya que se encontraron valores altos de Marginalidad (1.36) y de especialización

(1.47); las principales variables que influyeron en esta restricción fueron la Chl-a, SST, longitud y distancia a los frentes térmicos. Durante esta temporada, el dorado ocupó aguas con valores de SST, SSH, distancia a frentes y longitud mayores a aquellos disponibles en el área de estudio, y valores de latitud menores a los disponibles. La Chl-a estuvo estrechamente relacionada con el factor de especialización, lo que sugirió que el dorado es intolerante a cambios en la concentración de Chl-a. Los dos primeros factores del análisis capturaron la mayor parte de la varianza (Fig. 39).

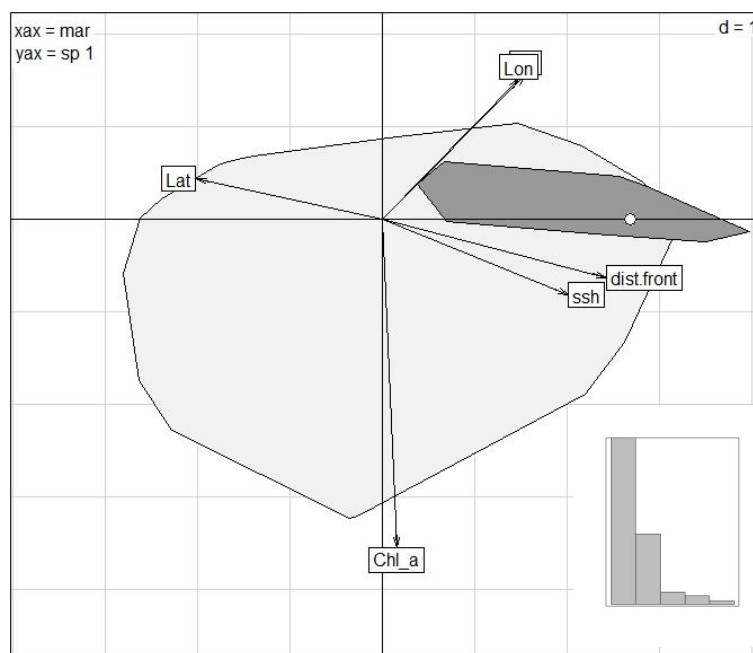


Figura 39. Biplot resultado del ENFA para la temporada de invierno. En el eje X es el eje de Marginalidad, y el eje Y el primer factor de Especialización. El tamaño de la flecha es proporcional al aporte de cada variable. Los polígonos de color gris claro y oscuro denotan el hábitat disponible y el hábitat utilizado, respectivamente. El punto blanco denota la diferencia entre los centroides de ambos polígonos (Marginalidad). La figura de barras denota el grado de aporte de cada uno de los factores de especialización.

En el ENFA de primavera se encontró un menor valor tanto de especialización (0.62) como de marginalidad (1.07), lo que sugirió que, en comparación con invierno, el dorado ocupó una porción mayor del hábitat total. En

este análisis se retuvieron tres factores, marginalidad y dos de especialización. La selección de hábitat en esta época estuvo notoriamente influenciada por la SST, la cual guardó una estrecha relación con el factor de especialización, lo que indicó que el dorado se restringe a valores muy específicos de temperatura superficial, y es intolerante a cambios drásticos de esta variable. Durante esta temporada, el dorado prefirió un hábitat definido por valores de SST y SSH mayores a los disponibles, y valores de Chl-a, distancia a frentes, latitud y longitud menores a los disponibles en el área de estudio (Fig. 40).

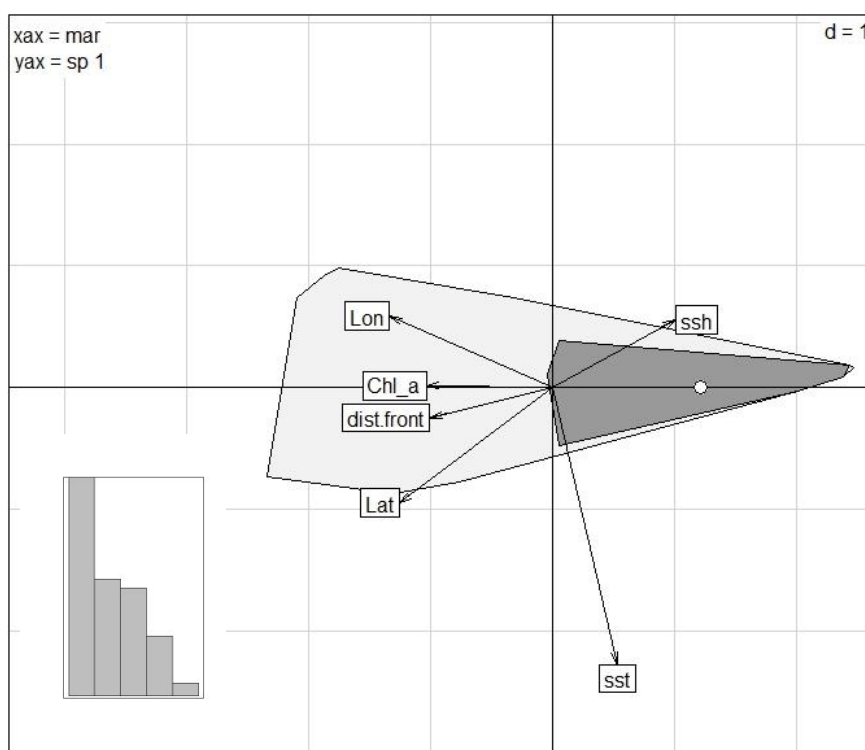


Figura 40. Biplot resultado del ENFA para la temporada de primavera.

La temporada de verano fue la temporada donde el valor de marginalidad fue el menor (0.38), con un valor de especialización relativamente alto (1.00). Nuevamente, la SST fue la variable ambiental más influyente, mientras que la variable espacial longitud también tuvo un aporte notorio. Es de notarse que durante esta temporada, el dorado prefirió valores de SST que fueron menores a

aquellos valores promedio del hábitat disponible, caso similar al que sucedió con la distancia a los frentes y la longitud. Para esta época del año, el dorado mostró una restricción notoria a valores de SST y de latitud. Los dos primeros factores explicaron la mayor parte de la selección del hábitat (Fig. 41).

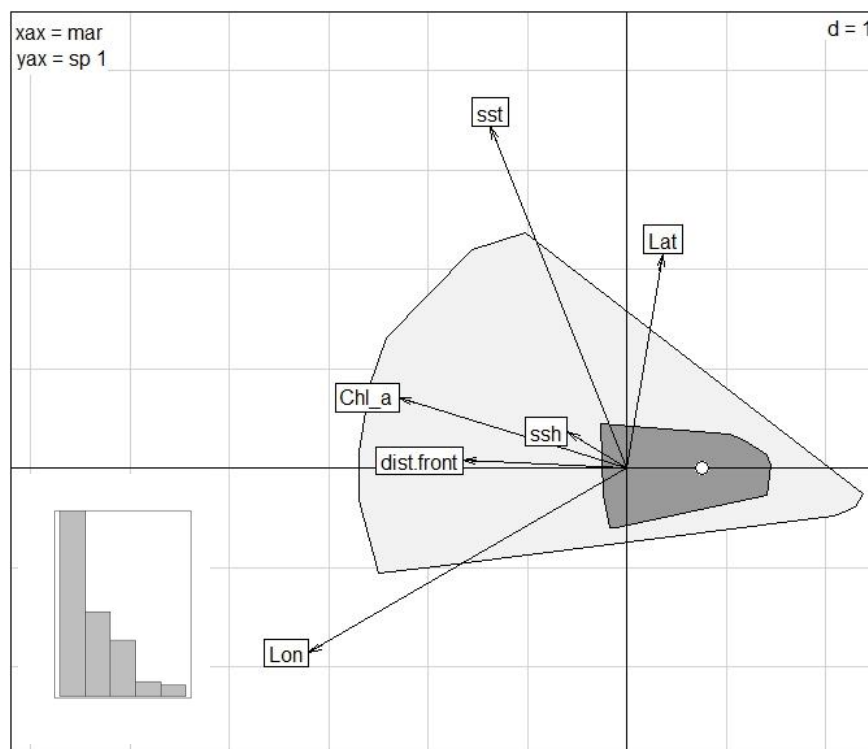


Figura 41. Biplot resultado del ENFA para la temporada de verano.

La variable espacial latitud fue la variable que registró la mayor parte de la varianza durante la temporada de otoño, mientras que las variables CHL-a y SSH fueron las variables ambientales más influyentes. En contraste con las otras temporadas, el aporte de SST fue mínimo, encontrándose que el dorado habita aguas con valores de SST ligeramente más altos de los valores de SST disponibles, caso contrario a lo que sucede con el resto de las variables. En esta temporada se encontró el segundo valor más bajo de marginalidad (0.56) y de especialización (0.96). Los dos primeros factores explicaron la mayoría de la información (Fig. 42).

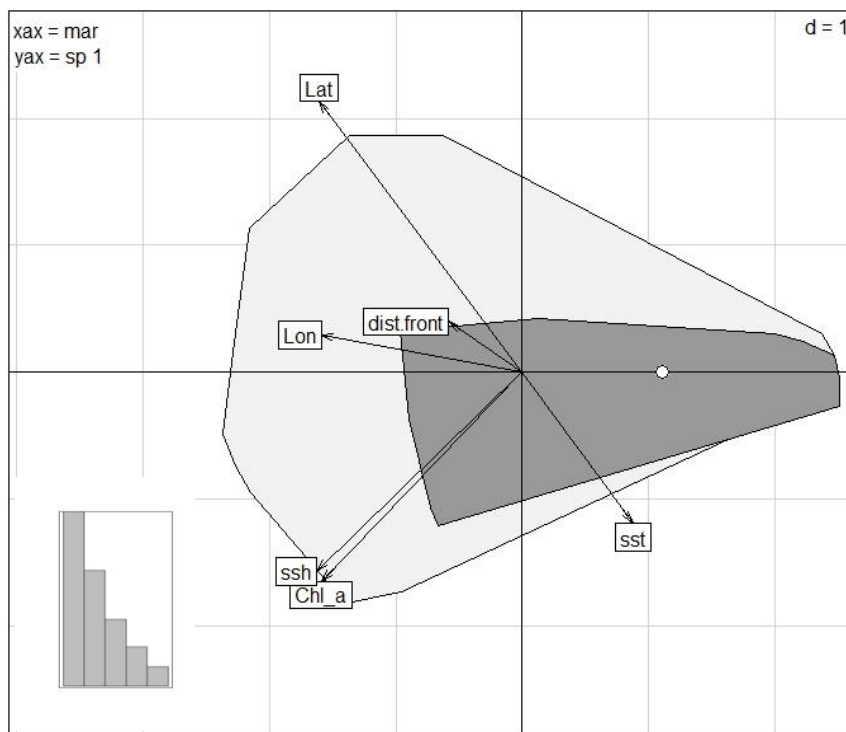


Figura 42. Biplot resultado del ENFA para la temporada de otoño.

La figura 43 resume el resultado de los ENFA para las distintas estaciones del año; en ella se observó que el hábitat preferencial del dorado fue restringido durante las dos primeras estaciones, siendo verano y otoño las épocas en donde el hábitat donde se encuentra este pez fue más parecido al hábitat disponible en el área de estudio; sin embargo, en todos los casos el valor de especialización fue mayor o cercano a uno, lo que sugirió que este pez tiene un nicho ecológico restringido. Aunque se observó una variación estacional en los valores de marginalidad y especialización, ya que las pruebas de Montecarlo (aleatoriedad) demostraron que el dorado no se distribuye de manera aleatoria en el área de estudio durante ninguna de las épocas del año ($p < 0.01$ en todos los casos).

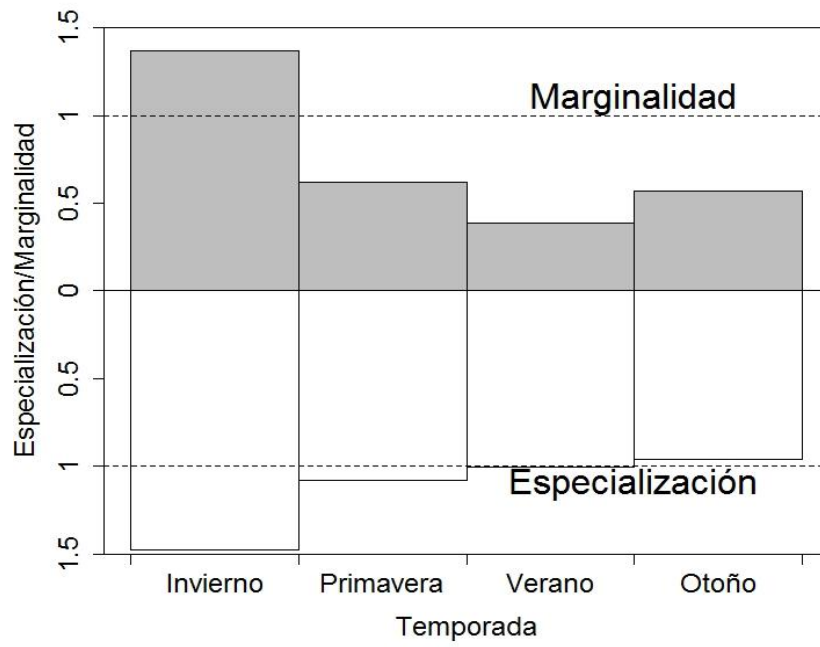


Figura 43. Variación estacional de los valores de Marginalidad (barras grises) y Especialización (barras blancas) del dorado en el Pacífico mexicano.

8. DISCUSIÓN

8.1 Capturas incidentales

Aunque las capturas de dorado no mostraron un patrón espacial completamente definido, se logró detectar dos zonas con capturas altas de este recurso, uno en la costa occidental de la península de Baja California, y otra, la más importante, en una zona oceánica comprendida entre los 10 y 15°N y los -115 y -125°W. Mientras que las capturas altas en la zona oceánica se presentaron durante los meses de mayo – julio, en agosto las capturas en esta zona fueron escasas, encontrándose una mayor abundancia relativa en la costa occidental de la península de Baja California. Esta evidencia, aunada a la variación temporal de la latitud y longitud promedio de los cuadrantes con capturas altas, apoyó la evidencia de que existe una sola población de dorado en el área de estudio (Díaz-Jaimes *et al.*, 2006; Tripp-Valdez *et al.*, 2010), ya que sugiere que este recurso realiza migraciones tanto latitudinales como longitudinales dentro del Pacífico mexicano, aunque estas migraciones aún no son del todo comprendidas (Martínez-Rincón *et al.*, 2009; Zuñiga-Flores, 2009).

Es conocido que el dorado tiende a asociarse a objetos flotantes; diversos autores mencionan que la mayoría de las capturas incidentales de dorado reportadas por barcos atuneros se realizaron al avistamiento de esta clase de objetos (Hampton y Bradley, 1999; Martínez-Rincón *et al.*, 2009). Otros autores han sugerido que este tipo de indicador en la pesca de atún tiene como consecuencia un alto número de dorados capturados en el Pacífico oriental tropical, especialmente en una franja de 10° al norte y al sur del Ecuador (Arenas *et al.*, 1999; Solana-Sansores, 2001). En el presente trabajo la relación de la captura incidental de dorado con los objetos flotantes no pudo ser explorada, debido a que la base de datos no incluyó el indicador de pesca sobre los cuales se realizaron los lances atuneros.

Durante el período de estudio, se capturaron más dorados de la clase chica y mediana durante los meses de marzo-abril y julio, mientras que los dorados de clase grande mostraron un notorio pico de capturas promedio durante el mes de octubre. De acuerdo a la curva de crecimiento reportada por Zuñiga-Flores (2009), los dorados de la clase chica tendrían tres o menos meses de edad, los de clase media tendrían alrededor de seis meses, y los de clase grande más de seis meses de edad. Como se mencionó anteriormente, el dorado alcanza su primera madurez a tallas de entre 50 y 80 cm (Alejo-Plata *et al.*, 2011; Zuñiga-Flores, 2009), por lo que muchos de los dorados capturados incidentalmente se encontraban en sexualmente inmaduros. Al respecto, Kraul (1999) sugirió que si bien el dorado parece reproducirse todo el año, se registran picos en su actividad reproductiva a lo largo del año, y las cohortes desovadas durante ciertos meses muestran una tasa de supervivencia mayor. Por lo que aparte de la aparente migración latitudinal y longitudinal del recurso, los picos de abundancia pudieran deberse a eventos reproductivos en los que las cohortes desovadas son más resistentes. Por ejemplo, el pico de dorados de clase chica encontrado durante los meses de primavera podría ser resultado de una cohorte desovada durante el otoño del año anterior, (por ejemplo, durante octubre), temporada en la que se encontró la mayor cantidad de organismos de la clase de talla grande, organismos presumiblemente maduros en su mayoría.

Sería demasiado arriesgado hacer inferencias sobre el posible origen reproductivo del pico de capturas de organismos de talla grande encontrado durante octubre, ya que la base de datos sólo incluye dorados de más de 60 cm en la clase de talla considerada como grande, y los organismos en esa clase podrían tener de seis meses a cuatro o más años de edad (Alejo-Plata *et al.*, 2011; Zuñiga-Flores, 2009), lo cual dificulta la interpretación de este resultado.

No se encontró una tendencia en las dos aproximaciones utilizadas para el análisis de series de tiempo, lo cual sugiere que las tasas de captura incidental se han mantenido constantes de 2004 a 2013. Diferentes estudios de dinámica

poblacional (edad y crecimiento, talla de primera madurez, etc.) podrían revelar el estado poblacional de este recurso.

El periodograma obtenido del análisis de Fourier mostró dos picos, un pico estacional, alrededor de los seis meses, y otro anual, alrededor de los doce, los cuales explicaron aproximadamente la misma cantidad de varianza. Zuñiga-Flores *et al.* (2008) reportaron un comportamiento similar en el periodograma extraído de series de tiempo de capturas de la flota deportiva en la zona de Cabo San Lucas, B.C.S. Estos picos, según los autores de ese trabajo, explicaron la mayor parte de la variación en las capturas (pico anual) y el cambio en el área de pesca debido a los patrones migratorios de la especie (pico estacional), en ese orden de importancia; sin embargo, en el presente estudio ambos picos presentaron una altura similar, lo que sugiere que dentro del Pacífico mexicano ambos ciclos tienen una importancia parecida, y que ambos ayudan a explicar la variación temporal de las capturas incidentales de dorado.

8.2. Medio ambiente

Se detectó un ciclo estacional marcado en el área de estudio: los valores más bajos (altos) de temperatura superficial del mar (Chl-*a*) se presentaron durante los meses de invierno – primavera, mientras que los valores más altos (bajos) se registraron durante los meses cálidos de verano. Esto se puede explicar debido que en un ciclo anual, existe una variación del gradiente de presión atmosférica entre latitudes templadas y latitudes ecuatoriales; este gradiente de presión se debilitó durante los meses de verano, debido a la inclinación del eje terrestre (Martínez-Álvarez, 2006), lo cual tiene como consecuencia una debilitación de los vientos que soplan del norte, principales impulsores de las corrientes polares, como la corriente de California. El debilitamiento de los vientos del norte promueve la intrusión de masas de agua ecuatoriales, caracterizadas por baja salinidad y alta temperatura (Torres-Orozco, 1993), hacia el área de estudio,

lo cual se ve reflejado en el notorio ciclo estacional de las variables ambientales utilizadas.

Las diferencias interanuales también mostraron ser significativas en el área y período de estudio, encontrándose que los valores más altos de temperatura superficial del mar y los más bajos de Chl-*a*, se presentaron durante el 2009. De acuerdo al Centro de Predicción del Clima de la NOAA (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml), durante el 2009 y 2010 se presentaron los valores más altos del índice oceánico del niño (ONI, por sus siglas en inglés). Si bien este es un fenómeno que tiene lugar en el Ecuador, su efecto puede percibirse en la costa del continente americano hasta latitudes templadas, ya que el agua cálida proveniente del Océano Pacífico Occidental se desplaza como una onda ecuatorial de Kelvin hacia el continente americano, y, al encontrarse con la línea de costa, se propaga tanto al sur como al norte en forma de una onda costera de Kelvin atrapada (Mcphaden, 1999); el aumento en la temperatura superficial inducido por esta onda costera puede ser la causa de las temperaturas significativamente mayores durante el 2009.

Tradicionalmente, el Océano Pacífico Tropical (OPT) se ha considerado como un océano oligotrófico, lo cual se refleja en sus aguas claras y la baja concentración de fitoplancton que en ellas habita (Stevenson, 1970); sin embargo, sostiene algunas de las pesquerías más importantes del mundo (López-Calderón *et al.*, 2006), por lo que estudios más recientes se han centrado más en la dinámica de mesoescala que en la dinámica de gran escala, con el fin de tener un mejor entendimiento de los procesos físicos y biológicos responsables de sostener esas pesquerías.

En distintas zonas del área de estudio se presentaron, a diferentes escalas espacio - temporales, algunos procesos oceanográficos capaces de producir este tipo de estructuras de mesoescala. Por ejemplo, durante los meses de marzo –

junio, se presenta una importante zona de surgencias en la costa occidental de la península de Baja California, eventos que duran normalmente de 10 a 14 días (Cervantes-Duarte *et al.*, 1993; Walsh *et al.*, 1977). Estos eventos, si bien son notorios tanto en imágenes de temperatura superficial como de Chl-a, resaltan más en aquellas imágenes de esta última variable, probablemente debido a dos razones: una es que las imágenes de Chl-a se presentan en escala logarítmica, y la otra es que usualmente los parches de Chl-a son más extensos que los de temperatura superficial fría, ya que al fitoplancton le lleva días asimilar los nutrientes inyectados en la zona eufótica por el efecto de la surgencia (Lara-Lara *et al.*, 1980).

De manera general, las surgencias son más intensas en la parte norte de la costa occidental de la península; sin embargo, durante el mes de junio, la porción sur de la península fue la región en donde el parche de Chl-a fue más extenso. Esto puede deberse a que los vientos fueron más intensos en la región del norte, pero existen otros factores además del viento, como la orientación de la línea de costa y la topografía del fondo, que pueden promover surgencias en la zona sur de la península bajo ciertas condiciones de viento (Zaytzev *et al.*, 2003). De estos eventos de surgencia pueden desprenderse filamentos de agua fría que pueden detectarse miles de kilómetros mar adentro, los cuales promueven hábitats de ciertos organismos como la langostilla (*Pleuronocodes planipes*), organismo señalado por Longhurst (2004) como responsable de mantener poblaciones de organismos tanto económicamente importantes, así como de organismo en peligro de extinción, como algunas especies de tortugas marinas (Etnoyer *et al.*, 2006).

En la parte centro y sur del Golfo de California, los valores más bajos de temperatura superficial del mar y más bajos de Chl-a se detectaron durante los meses de invierno, primavera y otoño. Durante estas estaciones, el viento sopla a lo largo del Golfo (Parés-Sierra *et al.*, 2004), provocando surgencias en toda la región, aunque dichas surgencias son más notorias en las costas de Sonora y Sinaloa (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978; Badán-Dagón *et al.*, 1985). Los valores más

altos de temperatura superficial y bajos de Chl-*a* se presentaron durante los meses de verano, ya que durante esta temporada ocurrió el monzón del Golfo de California, y la dirección del viento se invirtió, teniendo una componente hacia el este en la parte central, y hacia el noreste en la parte sur (Parés-Sierra *et al.*, 2004), lo que promueve la intrusión de agua cálida proveniente de latitudes más bajas. Aunque el viento tiene una dirección similar durante las épocas de invierno, primavera y verano, sopla con mayor intensidad durante la primera mitad del año (Parés-Sierra *et al.*, 2004), lo que explicaría por qué las surgencias durante esa época fueron más intensas.

Durante los meses de verano, en la parte sur del Golfo, la temperatura fue ligeramente mayor (~ 1°C) en la costa oriental, lo cual puede ser explicado debido a que en esta región la circulación en la boca del Golfo es ciclónica (Castro *et al.*, 2000; Marinone, 2003). Entonces, el agua cálida entraría al Golfo por las costas de Sinaloa, y saldría por las costas de Baja California Sur con una temperatura menor, quizá debido a la mezcla con la masa de agua central del Golfo, la cual se define con un rango de temperatura menor, y se forma en la región de las islas por mezcla de marea (Castro *et al.*, 2006)

Otra de las importantes zonas de surgencias es la región del Pacífico central mexicano, la cual incluye la boca del Golfo de California, la región de Cabo Corrientes, Jalisco, y las Islas Marías, Nayarit. En las imágenes de satélite promedio de los 10 años, en Cabo Corrientes (~20° N) se observó un parche de agua fría y de Chl-*a* durante los meses de febrero a mayo, siendo más notorio durante el mes de abril. Esto coincidió con lo reportado por Torres-Orozco *et al.* (2005) y López-Sandoval *et al.* (2009), quienes reportaron que durante esta temporada fue cuando se registró la mayor actividad de surgencias en la región, las cuales fueron provocadas principalmente por el viento que sopla hacia el ecuador, ya que durante esta época son más intensos (García-Reyes, 2005).

Una vez formada la surgencia, se desprenden de ella distintas estructuras de mesoescala, las cuales son capaces de viajar de cientos a miles de kilómetros mar adentro, llevando consigo nutrientes y otras propiedades de masas de agua costeras. Torres-Orozco *et al.* (2005) reportaron que después de un evento de surgencia, se desprende un filamento de agua helada, el cual se extiende hacia océano abierto, y es causado principalmente por efectos de la forma de la línea de costa, por inestabilidades baroclínicas. Ese filamento podría ser la causa de la deformación de la isolínea de 0.3 mg m^{-3} , la cual se observó durante los meses de febrero a abril. Por otra parte, Zamudio *et al.* (2007) sugirieron que esta zona es una importante zona de formación de remolinos, pero que ni las inestabilidades baroclínicas, la topografía del fondo ni el viento local son responsables de la formación de esas estructuras. Según estos autores, son las ondas costeras atrapadas y la orientación de la línea de costa los que más influyeron en la formación de los remolinos. Durante los meses de verano, algunas de estas estructuras parecen desprenderse de las isolíneas que van paralelas a la costa, quizá debido a los mecanismos propuestos por Zamudio *et al.* (2007).

Al sur de esta importante zona de surgencias, entre el Pacífico central y la parte sur del área de estudio, se encuentra una zona cálida poco estudiada, la cual según Kessler (2006) no tiene un nombre formal, por lo que él mismo la llamó “la depresión de Tehuantepec”, debido a la forma que tienen las isotermas en esa zona, ya que su principal característica es una termoclina profunda. Esta característica parece ser el extremo oriental de la cresta y valle de la termoclina, que definen los límites de la corriente norecuatorial a lo largo de la cuenca del Pacífico. Mientras que el valle está conectado al giro subtropical del Pacífico, la cresta se extiende desde los 9 a los 10°N, entre la corriente norecuatorial y la contra corriente norecuatorial, hasta las Filipinas (Wyrki, 1975; Kessler, 1990).

Esta depresión, o alberca cálida se debilita y se retrae hacia el océano abierto durante el verano, hacia donde parece desplazarse en forma de una onda de Rossby (Kessler, 2006), lo cual explicaría la intrusión de agua cálida oceánica

en la región suroeste y noroeste del área de estudio. Por otro lado, esta característica se encuentra más cerca de la costa y se ve mejor definida cuando inicia la temporada de surgencias en la otra región en la que se presentan este tipo de fenómenos: el Golfo de Tehuantepec.

En las imágenes de satélite se pudo observar que durante los meses de octubre a abril existió un parche de agua fría y con alta concentración de pigmentos fitoplanctónicos en la región del Golfo de Tehuantepec. Durante esta temporada, los frentes fríos que se desplazan desde el norte (Canadá y Estados Unidos) hacia el Golfo de México, a medida que viajan al sur y se intensifican, provocan eventos de vientos intensos conocidos como nortes, los cuales se transmiten hacia el Pacífico como vientos en chorro al pasar por el paso de Chivela, en el Istmo de Tehuantepec (Brennan *et al.*, 2009; Clarke, 1988; McCreary *et al.*, 1989; Romero-Centeno *et al.*, 2003;).

Estos eventos, también conocidos como Tehuanos, son eventos de duración relativamente corta (3-7 días), pero son capaces de transmitir una cantidad importante de energía al océano, lo cual tiene como consecuencia una lengüeta de agua fría que se puede observar varios cientos de km mar afuera (Trasviña *et al.*, 2003), y un sistema de remolinos, en el cual un remolino ciclónico se forma hacia el occidente del chorro de viento, y uno anticiclónico, de menor tamaño, que se forma al oriente (González-Silveira *et al.*, 2004; Trasviña y Barton, 2008). Después de un evento de esta clase, se desprende de la costa un giro anticiclónico, el cual acarrea propiedades de masa de agua costera hacia el océano abierto (Trasviña *et al.*, 2003).

Si bien la circulación durante los meses de surgencia en áreas cercanas al Golfo de Tehuantepec es comprendida, poco se sabe de la circulación durante los meses de verano. En las imágenes de satélite, tanto de Chl-*a* como de temperatura, se observó algo de actividad, indicada por la curvatura de las isólineas. Al respecto, Trasviña y Barton (2008) reportaron que aún durante estos

meses, los vientos que cruzan el paso Chivela por el Istmo de Tehuantepec son capaces de formar una serie de remolinos, lo cual quizá explica la actividad observada en las imágenes de satélite.

8.3. Relación recurso – ambiente y preferencia de hábitat

El dorado mostró una clara preferencia por un hábitat con temperatura superficial del mar entre 23°C y 29°C, concentración de Chl-*a* menores a 0.2 mg m⁻³, valores de altura del nivel del mar cercanos a cero, principalmente positivos, y una notoria afinidad por zonas cercanas a frentes térmicos (~ 5 – 10 km). Valores similares de preferencia temperatura han sido reportados para el dorado tanto dentro del área de estudio (Martínez-Rincón *et al.*, 2009; Zuñiga-Flores *et al.*, 2008) como para el océano atlántico occidental (Farrell *et al.*, 2014).

Distintos autores han mencionado que la principal variable ambiental que rige la distribución del dorado es la temperatura superficial del mar. Oro (1999) sugirió que temperaturas menores a 20°C limitan el metabolismo de estos peces, mientras que Hammond (2008) y Hernández-Tlapale (2015), mediante estudios de marcado, reportaron que el dorado se mueve principalmente en temperaturas de entre 26 y 30°C, principalmente sobre la termoclina.

Estos resultados, junto con la evidencia del número que resultaron ser significativas en el GAM, sugieren que el dorado es bastante sensible a cambios en el ambiente (Farrell *et al.*, 2014), lo cual seguramente refleja su preferencia del espacio y tiempo.

De manera general, el hábitat del dorado parece estar restringido por la isoterma de 21°C, y sus capturas ocurren a ambos lados de la isoterma de 25°C, por lo que los movimientos latitudinales y longitudinales parecen ser regidos por el desplazamiento estacional de estas isotermas. Así, el dorado parece asociarse con distintas estructuras oceánicas, como son los frentes térmicos. La definición

de frente es un tanto arbitraria desde el punto de vista oceanográfico, y es posible que los umbrales utilizados en los algoritmos de detección de frentes no reflejen las preferencias biológicas de ciertas especies marinas (Etnoyer *et al.*, 2006), por lo que la preferencia del dorado a ciertos gradientes horizontales de temperatura podría ser un interesante campo de investigación.

En el área de estudio, se detectaron capturas altas en la costa occidental de la península de Baja California durante los meses de verano (julio – septiembre). Al respecto, Martínez-Rincón *et al.* (2009) sugirieron que en esta zona existe una importante pesquería de atún, debido a la alta productividad biológica, producto de la intensa actividad de surgencias.

Existe un desfase entre el pico de actividad de surgencias (abril – junio) y las capturas altas de dorado (julio-septiembre) en la región, lo cual se debió probablemente al tiempo que le toma a la cadena trófica “madurar” desde un evento de surgencia hasta la proliferación de organismos de los cuales se alimenta el dorado. Por ejemplo, Blackburn (1963) reportó un desfase de tres meses entre la intensidad máxima del viento y la abundancia máxima de micronecton en el Golfo de Tehuantepec, mientras que Ortega-García y Lluch-Cota (1996) reportaron un desfase de tres meses entre los picos máximos de Chl-*a* y las abundancias de atún aleta amarilla; esto podría explicar por qué el dorado llega de uno a tres meses después del período de surgencia a la península de Baja California, ya que durante la temporada de surgencia se encuentra la máxima abundancia de la langostilla *Pleuronocodes planipes* (Blackburn, 1969; Aurioles-Gamboa y Balart, 1995), uno de los principales alimentos del dorado (Aguilar-Palomino *et al.*, 1998; Tripp-Valdéz *et al.*, 2010).

Durante el mes de junio se detectaron capturas altas al suroeste de la punta de la península, lo cual podría ser indicio de que el dorado migra hacia el norte, a lo largo de la península, para alimentarse de langostilla, cuya abundancia es producto de las surgencias ocurridas dos o tres meses antes (Martínez-Rincón *et*

al., 2009), lo cual explicaría las capturas altas reportadas durante los meses de verano.

Otra zona importante de la pesca de atún es la región de la entrada del Golfo de California, la cual abarca las islas Marías y Cabo Corrientes, Jalisco. En esta zona ocurren lances atuneros a lo largo de todo el año (Torres-Orozco *et al.*, 2005), por lo que uno esperaría que, de haber concentraciones importantes de dorado en la región, este fuera capturado de manera incidental por la flota atunera. Si bien se detectaron cuadrantes con capturas positivas prácticamente durante todos los meses del año (con excepción de diciembre), sólo durante el mes de octubre se detectó un cuadrante con capturas altas. Algo similar a lo que ocurrió en la península de Baja California podría estar presentándose en esta región, que las capturas altas durante un mes sean reflejo de procesos de mesoescala de algunos meses anteriores. López-Sandoval *et al.* (2009) mencionaron que en esta zona la máxima productividad primaria ocurre durante el mes de julio, exactamente tres meses antes del mes donde se reportaron las capturas más altas (octubre), lo cual pudiera deberse nuevamente al desfase mencionado por Blackburn (1963).

El área donde se detectaron las mayores capturas durante todo el período de estudio es un área oceánica, comprendida entre los 10 – 20°N y los 115 - 120°W. Esta zona abarca parte de la zona de divergencia tropical, en donde divergen la contracorriente ecuatorial y la corriente norecuatorial (Kessler, 2006), zona en donde tanto la divergencia como los vientos alisios fertilizan la capa afótica, lo cual tiene como consecuencia un aumento en la actividad biológica (Reilly, 1990). En esta región existe una termoclina bien definida y somera, además de presentar pocos cambios en la temperatura superficial del mar, lo cual promueve agregaciones de peces y otros organismos (Fiedler *et al.*, 1992).

En esta región las capturas máximas se dieron durante los meses de mayo a julio, misma época en donde la actividad de surgencias del Golfo de

Tehuantepec entran en su etapa de relajación. La Corriente de California es el brazo oriental del gran giro subtropical del Pacífico, el cual alcanza la costa Oeste de la Península de Baja California (Badán, 1997). El grosor de la corriente de California gira hacia el Pacífico central cerca de los 15°N y 112°W, para unirse al sistema ecuatorial de corrientes, formando parte de la Corriente Nor-ecuatorial (Fiedler y Talley, 2006; Karl, 1999). Esto crea una zona de convergencia entre la Corriente de California y la depresión de Tehuantepec. Adicionalmente, el gran giro subtropical del Pacífico es un giro anticiclónico, caracterizado por una baja productividad biológica (Lalli y Parsons, 2006). Entonces, se podría esperar que zonas biológicamente pobres existieran a ambos lados del brazo oceánico de la Corriente de California, una corriente que transporta agua fría, rica en nutrientes. Es en esta zona de convergencia donde el dorado se congrega durante los meses de mayo – junio, aproximadamente tres meses después de los meses de invierno, temporada durante la cual Corriente de California es más intensa. Nuevamente, la evidencia apoya la hipótesis de que el dorado migra hacia zonas de alta productividad biológica ~ 3 – 5 meses después de la actividad máxima de surgencia, cuando la temperatura superficial del mar se encuentra dentro de su rango preferencial. Adicionalmente, la evidencia presentada sugiere que el dorado se asocia a ciertas estructuras de mesoescala.

Kessler (2006) mencionó que durante el inicio de verano, la estructura conocida como depresión de Tehuantepec se retira de la costa hacia mar abierto. Es probable que el dorado se asocie a esta estructura de mesoescala, quizá alimentándose a lo largo de estos gradientes de temperatura y de Chl-*a*, ya que debido a su alta movilidad, es capaz de desplazarse distancias considerables en busca de presas dispersas (Farrell *et al.*, 2014), lo cual ha sido propuesto para otras especies altamente migratorias, como el marlin azul *Makaira nigricans* (Su *et al.*, 2008).

Alejo-Plata *et al.* (2014) reportaron que el dorado está disponible prácticamente todo el año, con excepción de los meses de junio a agosto, para la

flota artesanal, en el área del Golfo de Tehuantepec. En la base de datos analizada en la presente tesis, en esta zona se detectaron cuadrantes con capturas de dorado durante casi todos los meses, con excepción de diciembre. Las capturas más altas se detectaron durante marzo y abril, en ambos meses en la zona centro y norte del Golfo, lo cual coincide en espacio y tiempo con un parche de agua fría y de altas concentraciones de Chl-*a*. Estas variaciones en los campos superficiales de temperatura y Chl-*a* son reflejo de una estructura de mesoescala, un giro ciclónico que se forma durante la época de Tehuanos (Trasviña *et al.*, 2003), el cual promueve la actividad biológica, y sugiere una vez más que el dorado tiende a ocupar aguas cercanas a este tipo de estructuras de mesoescala.

8.4 Modelación estadística

8.4.1 Modelos Aditivos Generalizados

Existen distintos estudios en los que se ha empleado de manera exitosa la aproximación de modelado (GAMs) que se utiliza en la presente investigación, en donde algún indicador de abundancia (usualmente CPUE) es modelado en función de ciertas variables ambientales obtenidas mediante sensores remotos, para distintas especies tropicales, como el atún albacora (*Thunnus alalunga*; Zainuddin *et al.*, 2008) y el marlin azul (*Makaira nigricans*; Su *et al.*, 2008; Marín-Enríquez, 2012). Se eligió este tipo de modelos sobre los modelos lineales generalizados (GLMs), ya que parecen detectar mejor la relación no lineal entre las variables explicativas y la variable respuesta (Hastie y Tibshiriani, 1986), el cual parece ser el caso de la mayoría de las variables (Fig. 35), por lo cual la aproximación parece ser indicada para el análisis.

Uno de los principales inconvenientes de este tipo de aproximación es que tienden a sobreajustarse (demasiados parámetros para el número de observaciones) a los datos, lo cual puede causar que el poder predictivo del modelo sea pobre. Este problema puede ser superado utilizando una partición

aleatoria de los distintos sets de datos (Farrell *et al.*, 2014; Martínez-Rincón *et al.*, 2012), aproximación que se utilizó en el presente trabajo, obteniendo resultados satisfactorios (~ 80 – 90 % de certeza en predicción).

Uno de los criterios para evaluar el grado de ajuste de un modelo a los datos es el porcentaje de devianza total explicada, la cual puede interpretarse de manera similar a la suma de cuadrados de los residuales (Wood, 2006). El modelo ajustado para los datos de captura incidental del dorado explicó el 30% de la devianza total. En contraste con otro tipo de trabajos en los que se utilizó una aproximación de modelado similar, el porcentaje explicado fue similar al encontrado para marlin azul (~25 – 50% Su *et al.*, 2008 y ~40% Su *et al.*, 2011) y para el wahoo *Acanthocybium solandri* (~ 36%, Martínez-Rincón *et al.*, 2012) lo que sugiere que el porcentaje de devianza explicada en el modelo de la presente tesis es bueno.

El GAM ajustado resalta la preferencia de espacial, temporal y de hábitat del dorado, así como su notoria sensibilidad en cambios ambientales: capturas altas en temperaturas mayores a 25°C y menores a 29°C, valores de clorofila-*a* bajos, preferencia por alturas del nivel del mar cercanas a cero y principalmente positivas, mayores capturas durante primavera y a latitudes bajas.

Dos de los métodos más comunes para evaluar la precisión predictiva de un modelo son el porcentaje de clasificados correctamente y el área bajo la curva ROC (Fiedling y Bell, 1997). El primer método tiene la desventaja de que se le tiene que asignar un valor de umbral arbitrario, a partir del cual los valores de probabilidad (entre 0 y 1) son clasificados como correctos, mientras que el segundo es un método más directo y sencillo de entender, ya que arroja un porcentaje de precisión, independientemente de un umbral. Ambos métodos fueron aplicados a las predicciones del data set de validación, arrojando un precisión de entre 80 y 90%, lo cual sugiere que con este modelo se pueden hacer predicciones en data

sets distintos al data set de entrenamiento (por ejemplo el data set ambiental; Farrell *et al.*, 2014).

Las predicciones espaciales de la probabilidad de ocurrencia de dorado revelaron una serie de comportamientos interesantes, los cuales no habían sido reportados. Por ejemplo, estos peces migran dentro de la zona de estudio siguiendo un “corredor” migratorio, el cual sigue la dirección Golfo de Tehuantepec – zona oceánica de abundancias altas – península de Baja California, pasando por la zona ecuatorial de surgencia, y evitando la depresión de Tehuantepec.

El tema de los corredores migratorios en el océano es un tema de auge reciente. Morreale *et al.* (1996) reportaron que la tortuga laúd (*Dermochelys coraciaea*) realiza migraciones estacionales en el Océano Pacífico Tropical siguiendo uno de estos corredores, el cual es de aproximadamente 500 km de ancho. Los autores sugirieron que este patrón migratorio tan marcado puede estar definido por algunos factores ambientales, como corrientes o frentes térmicos persistentes. Block *et al.* (2011) sugieren que las migraciones de algunos depredadores tope, como los atunes, explotan el ambiente de maneras predecibles, ya que las rutas migratorias de algunos de estos organismos están influenciadas por procesos oceanográficos, preferencias térmicas propias de cada especie, y cambios en la distribución de sus presas.

Como se demostró en la presente tesis, el dorado tiene unas preferencias de hábitat claras. Entonces, algo similar puede estar ocurriendo en el Pacífico Oriental Tropical, en donde estos peces migran siguiendo uno de estos corredores migratorios; en el caso particular del Pacífico mexicano, el corredor migratorio del dorado parece estar regido por una compleja zona de transición entre distintas características oceanográficas de diferentes escalas, como el gran giro del Pacífico Norte, la Corriente de California, la Corriente Nor-ecuatorial, el sistema de surgencias del Golfo y la depresión de Tehuantepec. Esta zona de transición entre las distintas características crea una zona de frentes térmicos, los cuales resultan

ser muy atractivos para el dorado. Estudios de presas potenciales y de marcado satelital de estos peces podrían ayudar a confirmar la hipótesis de que este importante recurso ecológico/pesquero utiliza un corredor para realizar sus migraciones.

Otro de los resultados que resaltó mediante este análisis es que existen dos áreas que pueden considerarse como *hotspots* biológicos de dorado. Si bien las dos zonas presentan variaciones estacionales, el *hotspot* de la zona en el océano abierto se encuentra presente durante todo el año, lo cual sugiere que existe una importante zona de congregación del dorado. Estudios de la biología básica del dorado capturado en esta zona ayudarían a comprender mejor las causas de agregación de estos peces en esta zona oceánica.

8.4.2 Análisis Factorial de Nicho Ecológico

De manera general, los resultados de los modelos ENFA sugirieron preferencias de hábitat similares a los resultados de los GAMs: la temperatura superficial del mar y la concentración de Chl-*a* son las dos variables que más influyen en la distribución del dorado en el área de estudio; sin embargo, otros aspectos interesantes sobre cómo estos peces seleccionan su hábitat son resaltados mediante la aproximación ENFA. Por ejemplo, las variables que resultaron ser más importantes en la distribución del dorado variaron entre temporadas. Además, mediante esta aproximación se logró determinar, mediante los coeficientes de marginalidad y especialización, que el dorado va ocupando progresivamente, a lo largo del año, el hábitat disponible en el área de estudio, lo cual podría sugerir que estos peces migran hacia y dentro del área de estudio.

El hecho de que la importancia de las variables en la presencia del dorado varíe entre estaciones sugirió que el dorado selecciona su hábitat de distintas maneras en función de las condiciones ambientales presentes, y que existe una variación estacional en la relación entre las variables que influyen en la distribución de estos peces. Por ejemplo, durante invierno, el dorado mostró

preferencias por valores de SST más altos del promedio, y una intolerancia notoria a cambios en concentraciones de Chl-*a*.

Durante esta temporada, las capturas prácticamente se restringieron al Golfo de Tehuantepec y la zona sur del área de estudio. En estos meses, la corriente de California se encuentra en su máxima expresión, por lo que masas de agua con temperaturas menores a las preferidas por el dorado se esparcen sobre la mayoría de la zona costera y oceánica del Pacífico mexicano, lo que explicaría la restricción espacial de la captura incidental. Los resultados del ENFA apoya esta hipótesis, ya que el dorado prefiere masas de agua con temperaturas mayores a las disponibles (masas de agua de la corriente de California) en el área de estudio, lo que sugiere que estos peces habitan masas de agua de origen Tropical, las cuales son biológicamente pobres, y se encuentran principalmente en la zona sur del área de estudio, debido al forzamiento Norte-Sur de la corriente de California.

En primavera, la selección de hábitat por el dorado es similar, ocupando zonas donde la SST es mayor que el promedio del hábitat disponible, siendo esta variable la que influye más en la presencia de este organismo. La tolerancia a variaciones en concentración de Chl-*a* se vuelve mucho menos notoria, lo que sugiere que el dorado empieza a ocupar masas de agua con distintas propiedades.

Los valores de marginalidad y especialización parecen indicar que el dorado ocupa una porción mayor del hábitat disponible, en comparación con la temporada anterior. En estos meses, el dorado ocupa la región sur del área de estudio, y la zona oceánica de abundancias altas, región que resalta como *hotspot* biológico para estos peces. Nuevamente, la influencia de las masas de agua frías de la corriente de California fue notoria, ya que el dorado aún selecciona aguas con temperaturas ligeramente mayores a aquellas disponibles; sin embargo, la influencia de esta corriente parece ser menor que durante la temporada de

invierno, ya que la correlación entre la SST y el factor de marginalidad fue menor durante primavera que durante invierno.

En verano, la SST fue la variable ambiental que más influyó en la presencia del dorado; sin embargo, en comparación con las dos temporadas anteriores, el dorado selecciona aguas con valores de SST menores a los valores promedio. Este es uno de los resultados más interesantes que resaltan con este análisis y que no pudo ser apreciado mediante la aproximación GAM. Durante esta temporada, las masas de agua de origen tropical, caracterizadas por altas temperaturas, se desplazan hacia el norte (Torres-Orozco, 1993), debido al debilitamiento de la corriente de California. Masas de agua con temperaturas superiores a las preferidas por estos peces ($>28^{\circ}\text{C}$) ocupan la mayor parte del área de estudio, por lo que el dorado selecciona aquellas zonas con valores de SST menores al promedio.

La longitud fue la variable espacial que más influyó en la captura incidental durante los meses más cálidos del año. En estos meses, el dorado ocupa zonas con longitudes menores a las promedio, pero muestra un grado aceptable de tolerancia a cambios en esta variable espacial. El hecho de que el mes de julio sea un mes de transición entre las zonas de abundancias altas (oceánica y en la península de Baja California) ayudó a explicar el aporte de la longitud a la presencia del dorado, ya que durante este mes se capturaron organismos tanto en aguas cercanas a la costa como en aguas oceánicas.

Latitud también presentó un aporte notorio en la explicación de la selección de hábitat del dorado durante verano, encontrándose que estos peces se encuentran restringidos a latitudes mayores a las promedio y son intolerantes a cambios en esta variable, lo que sugirió una restricción del recurso hacia latitudes altas.

Durante otoño, la proporción del hábitat ocupado por el dorado con respecto al hábitat disponible fue mayor con respecto a las otras temporadas. Durante los

tres últimos meses del año, la SST deja el rol de la variable ambiental más importante, encontrándose que el dorado es altamente sensible a cambios en la temperatura, y habita aguas con valores de SST ligeramente mayores al promedio disponible; esto pudiera señalar que la temperatura deja de ser un factor limitante para la distribución de estos peces, o dicho de otra manera, las condiciones térmicas son las idóneas para el dorado durante esta temporada, en donde las aguas templadas de los vientos Tehuanos, los cuales empiezan a hacerse notorios (Trasviña y Barton, 2008) y de la corriente de California se mezclan con las aguas cálidas ($>28^{\circ}\text{C}$) de origen ecuatorial.

La concentración de Chl-a y la SSH fueron las variables más importantes en otoño, presentando una importancia muy similar. El dorado habita aguas con concentraciones de Chl-a y alturas del nivel del mar menores al promedio disponible, mostrando una tolerancia relativamente laxa a cambios en estas variables. El dorado selecciona aquellas zonas oceánicas con valores de Chl-a bajos, característicos de algunas masas de agua que provienen de latitudes bajas, y viajan al norte cuando la corriente de California se debilita. Durante esta temporada, se esperaría observar remanentes de estas masas de agua en la zona norte del área de estudio, ya que es una temporada de transición entre los meses cálidos de verano y los fríos de invierno. Como se comentó anteriormente, esto ayudaría a explicar por qué el dorado habita una mayor porción del hábitat disponible.

Para el caso de la SSH, el dorado busca zonas con alturas del nivel del mar menores a las promedio disponibles. La correlación entre la SST y la SSH fue débil (0.19), por lo que una explicación podría ser que los giros ciclónicos, durante esta temporada de transición, tienen valores de SST por encima de los encontrados en otras temporadas, y que el dorado aprovecha estas zonas de alta productividad con temperaturas aún dentro de sus preferencias, para buscar alimento, evitando un gasto energético innecesario. Esta hipótesis es puramente

especulativa, y podría resolverse mediante un análisis detallado de la variación estacional entre la SST y la SSH.

La latitud fue la variable que presentó la importancia mayor durante los meses de otoño; el dorado ocupa zonas en latitudes menores al promedio, lo que sugiere que durante esta temporada del año, estos peces migran hacia el SW del área de estudio, cuando la corriente de California empieza tomar fuerza, y las masas de agua con temperaturas menores a las preferenciales empiezan a ocupar el área de estudio.

9. CONCLUSIONES

- Las capturas de dorado presentaron una variación espacio-temporal notoria en el área de estudio. Se presentaron capturas mayores durante los meses de marzo, junio y octubre, y durante 2004. Se observaron dos zonas con capturas altas, una en la costa occidental de la península de Baja California, la cual se vuelve importante en los meses de verano, y otra en el océano abierto, la cual se encontró presente a lo largo del año, volviéndose más importante durante primavera.
- Existe una tendencia positiva en el esfuerzo pesquero dentro del período de estudio. Febrero y abril son los meses donde se presentan el mayor número de lances atuneros. Si bien el esfuerzo pesquero se presentó en toda el área de estudio, una mayor cantidad de lances ocurrieron en la porción sur durante la primera mitad del año, mientras que durante los meses de verano, el esfuerzo pesquero fue mayor en la porción norte del Pacífico mexicano.
- La zona de estudio es, desde el punto de vista ambiental, una zona de transición compleja, en donde distintas características oceanográficas de meso y macroescala pudieron ser identificadas. Entre estas características destacan la corriente de California, la alberca de agua cálida, los vientos en chorro del golfo de Tehuantepec, y la corriente Nor-ecuatorial, entre otros. La intensidad con que se presentan estas características varía espacio-temporalmente.
- Se calcularon los frentes térmicos en el área de estudio, utilizando un algoritmo de detección frontal. Este algoritmo sirvió para elucidar complejas zonas de frentes oceánicos, zonas que resultaron ser atractivas para el dorado.
- Los modelos estadísticos resultaron ser una herramienta útil para resaltar las preferencias ambientales del dorado. De igual forma, el GAM construido

permitió mapear el hábitat potencial del dorado, lo cual resultó ser una parte esencial de la presente tesis.

- De manera general, los patrones migratorios anuales del dorado parecen ser menos simples que una simple migración costera sur-norte-sur. La evidencia presentada en esta tesis sugirió que, dentro del Pacífico mexicano, las migraciones del dorado están reguladas por un complejo sistema de características oceanográficas. Este patrón migratorio involucró una zona en el océano abierto, en donde capturas altas de dorado se presentaron durante todo el año. Dicho lo anterior, no se pudo comprobar la hipótesis propuesta, la cual sugería que el dorado migra siguiendo la línea de costa.

Con base en estas conclusiones, se recomienda 1) obtener muestras de dorados capturados en la zona oceánica de capturas altas, ya que la mayoría de los estudios se basan en organismos capturados por flotas costeras, 2) dirigir esfuerzo de muestreo a identificar hasta nivel especie los dorados capturados, ya que la información científica de *C. equiselis* es escasa, 3) promover la investigación interinstitucional, con el fin de recabar mejor información científica, y 4) volver disponibles bases de datos con una mayor resolución espacial, con el fin de tener un mejor poder predictivo en los modelos estadísticos.

10. LITERATURA CITADA

Abecassis, M., H. Dewar, D. Hawm, J. Polovina. 2012. Modelling swordfish daytime vertical habitat in the North Pacific Ocean from pop up archival tags. *Mar. Ecol-Prog. Ser.* 452:219-236.

Aguilar-Palomino, B., F. Galván-Magaña, L.A. Abitia-Cárdenas, A.F. Muhlia-Melo, J. Rodríguez-Romero. 1998. Feeding aspects of the dolphin *Coryphaena hippurus* Linnaeus, 1758 in Cabo San Lucas, Baja California Sur, Mexico. *Cienc. Mar.* 24(3): 253 – 265.

Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE trans. Aut. Contr.* 19 (6): 716 – 723.

Alejo-Plata, C., P. Díaz-Jaimes, I.H. Salgado-Ugarte. 2011. Sex ratios, size at sexual maturity, and spawning seasonality of dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) captured in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Fish. Res.* 110:207-216.

Alejo-Plata, C., J.L. Gómez, S.J. Serrano-Guzmán. 2014. Variabilidad en la abundancia relativa, estructura por tallas y proporción de sexos del dorado *Coryphaena hippurus* (Pisces: Coryphaenidae) en el Golfo de Tehuantepec, México. *Rev. Biol. Trop.* 62(2): 611-626.

Álvarez-Borrego S., J.A .Rivera,G. Gaxiola-Castro, M.J Acosta-Ruíz, R.A. Schwartzlose. 1978. Nutrientes en el Golfo de California. *Cienc. Mar.* 6:13-22.

Amezcu-Gómez C.A. 2007. Relaciones tróficas entre el pez vela (*Istiophorus platypterus*) y el dorado (*Coryphaena hippurus*) en la costa de los estados de Jalisco y Colima, México. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional.. 93 pp.

Arenas, P., M. Hall, M. García.1999. Association of fauna with floating objects in the eastern Pacific Ocean. *IATTC Special Report.* 11:285-326.

Aurioles-Gamboa, D., E.F. Balart. 1995. La Langostilla: Biología, Ecología y Aprovechamiento. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, México, 233 pp.

Badán-Dangon A., D.J. Koblinsky, T. Baumgartner. 1985. Spring and summer in the Gulf of California: observations of surface thermal patterns. *Oceanol. Acta.* 8: 13–22.

Badán, A. 1997. La corriente costera de Costa Rica en el Pacífico Mexicano. En: Lavín, M.F. (Ed.), Contribuciones a la Oceanografía en México. Monografía 3, Unión Geofísica Mexicana. 99-112.

- Bakun, A. 1996. Patterns in the Ocean. Ocean Processes and Marine Population Dynamics. Cal. Sea. Grant. 323 pp.
- Basille, M., C. Calenge, E. Marboutin, R. Andersen, J. Gaillard. 2008. Assessing habitat selection using multivariate statistics: Some refinements of the Ecological Niche Factor Analysis. *Ecol. Modell.* 211: 33 – 240.
- Beltrán P. R. 1995. Análisis sobre las capturas de dorado en Mazatlán, Sinaloa. Informe Técnico, Inst. Nal. Pesca, CRIP-Mazatlán, Sinaloa, México. 14 pp.
- Blackburn, M. 1963. Distribution and abundance of tuna related to wind and ocean conditions in the Gulf of Tehuantepec, México. *FAO. Fisheries Technical Report.* 6(3):1,557-1,583 pp.
- Blackburn, M. 1969. Conditions related to upwelling which determine distribution of tropical tunas off western Baja California. *Fish. Bull.* 68 (1):147-175.
- Block, B.A., I.D. Jonsen, S.J. Jorgensen, A.J. Winship, S.A. Shaffer, S.J. Bograd, E.L. Hazen, D.G. Foley, G.A. Breed, A.-L. Harrison, J.E. Ganong, A. Swithenbank, M. Castleton, H. Dewar, B.R. Mate, G.L. Shillinger, K.M. Schaefer, S.R. Benson, M.J. Weise, R.W. Henry, D.P. Costa. 2011. Tracking apex marine predator movements in a dynamic ocean. *Nature* 475: 86-90.
- Brennan, M.J., D. Hugh, III Cob, R.D. Knabb. 2009. Observations of Gulf of Tehuantepec gap winds from QuikSCAT: an updated event climatology and operational model evaluation. *Weather Forecast.* (25): 646-658.
- Calenge, C. 2006. The package adehabitat for the R software. A tool for the analysis of space and habitat use by animals. *Ecol. Modell* 197: 516 – 519.
- Calenge, C. 2011. Exploratory analysis of habitat selection by the Wildlife in R: The adehabitatHS package. Office National de la Chasse et de la fuane sauvage. Saint Benoist, 78610 Auffargis, France. 60 pp.
- Carrasco-Águila, M.A., R. Macías-Zamora, A.L. Vidaurri-Sotelo, O. Miranda-Carrillo. 2012. Análisis del recurso dorado (*Coryphaena hippurus*) en torneos de pesca deportiva en tres puertos del Pacífico centro Mexicano, de 2000 a 2010. *En: Espino-Barr., E., M.A. Carrasco-Águila, S. Sarmiento-Náfate, O. Miranda-Carrillo (Ed). Memorias del VI foro científico de pesca ribereña. Instituto Nacional de la Pesca. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 293-294.*
- Castro, J.J., J.A. Santiago, V. Hernández-García, C. Pla. 1999. Growth and reproduction of the Dolphinfish (*Coryphaena hippurus* and *Coryphaena equiselis*)

in the Canary Islands, Central-East Atlantic (preliminary results). *Sci. Mar.* 63 (3-4):317-325.

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. *Cienc. Mar.* 26(4): 561-583.

Castro, R., R. Durazo, A. Mascarenhas, C.A. Collins, A. Trasviña. 2006. Thermohaline variability and geostrophic circulation in the southern portion of the Gulf of California. *Deep-Sea Res. I* (53): 188-200.

Cervantes-Duarte, R., S. Aguiñiga-Garcia, S. Hernández-Trujillo. 1993. Upwelling conditions associated to the distribution of zooplankton in San Hipolito. *Cienc. Mar.* 19(1):117-135.

Chien-Chi, Wu, S. Wei-Cheng, T. Kawasaki. 2001. Reproductive biology of the dolphinfish *Coryphaena hippurus* on the east coast of Taiwan. *Fish. Sci.* 67: 784-793.

Clarke, A. J. 1988. Inertial wind path and sea surface temperature patterns near of the Gulf of Tehuantepec and Gulf of Papagayo. *J. Geoph. Res.* 93: 12491-15501.

Damián-Guillén, M.I., S.R. Soriano-Velázquez, C.E. Ramírez-Santiago, D.E. Acal-Sánchez. 2010. Captura incidental de la flota artesanal tiburonera del puerto de Zihuatanejo, Guerrero. *En: Espino-Barr., E., M.A. Carrasco-Águila, E. Romero-Hernández, H. Aguirre-Villaseñor, O. Miranda-Carrillo (Ed). Memorias del V foro científico de pesca ribereña. Instituto Nacional de la Pesca. Boca del Río, Veracruz.* 45-46.

Díaz-Jaimes, P., M. Uribe-Alcocer, S. Ortega-García, J.D. Durand. 2006. Spatial and temporal mitochondrial DNA genetic homogeneity of dolphinfish populations (*Coryphaena hippurus*) in the eastern central Pacific. *Fish. Res.* 80: 333-338.

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 res. II* (53): 340-358.

Farrell, E.R. (2009). The habitat, movements and management of dolphin, *Coryphaena hippurus*, in the Western North Atlantic, Caribbean and Gulf of Mexico. Nicholas School of the Environment, Duke University. Master's degree thesis. 55 pp.

Farrell, E.R., A.M. Boustany, P.N. Halpin, D.L. Hammond. 2014. Dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) distribution in relation to biophysical ocean conditions in the northwest Atlantic. *Fish. Res.* 151: 177-190.

Fedorov, K.N. 1986. The physical nature and structure of oceanic fronts. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, Vol. 19., 1st Ed. Springer, Berlín. 333 p.

Fiedler, P.C., F.P. Chavez, D.W. Behringer, S.B. Reilly. 1992. Physical and biological effects of Los Niños in the eastern tropical Pacific, 1986–1989. *Deep-Sea Res.* 39 (2): 199-219.

Fiedler, P.C., L.D. Talley. 2006. Hydrography of the Eastern tropical Pacific: A review. *Progr. Oceanogr.* 69: 143-180.

Fiedling, A.H., J.F. Bell. 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environ. Conserv.* 24(1): 38 – 49.

Freeman, E., G. Moisen. 2008. PresenceAbsence: an R package for Presence-Absence model analysis. *Jour. Stat. Softw.* 23(11): 1-31.

García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto Nacional de Geografía, Serie de libros No. 6. Universidad Nacional Autónoma de México. 90 p.

García-Reyes M. 2005. Procesos físicos que controlan la variabilidad estacional de la temperatura superficial del mar y de la concentración de clorofila en la entrada al Golfo de California. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 78 pp.

Genin, A., J.S. Jaffe, R. Reef, C. Richter, P.J.S. Franks. 2005. Swimming against the flow: a mechanism of zooplankton aggregation. *Science.* 308: 860-862.

Gibbs, R.H., B.B. Collette. 1959. On the identification, distribution and biology of dolphins, *Coryphaena hippurus* and *C. equiselis*. *B. Mari. Sci. Gulf Car.* 9(2): 117 – 152.

González-Silveira, A., E. Santamaría del Ángel, R. Millán- Núñez, H. Manzo-Monroy. 2004. Satellite observations of mesoscale eddies in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo (Eastern Tropical Pacific). *Deep-Sea Res.* 51: 587-600.

Hammond, D. 2008. Using pop-off satellite archival tags to monitor and track dolphinfish and cobia. En línea, de <http://dolphintagging.homestead.com/2007SatelliteTagCompletionRpt.pdf>

Hampton, J., K. Bailey. 1999. Fishing for tunas associated with floating objects: review of the western Pacific fishery. IATTC Special Report, 11, pp. 222–284.

Hastie, T., R. Tibshiriani. 1986. Generalized Additive Models. *Stat. Sci.* 1(3):297 – 318.

Hernández-Tlapale, C. 2015. Patrones de comportamiento en los movimientos verticales y horizontales del dorado *Coryphaena hippurus* (Linnaeus, 1758) en la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México. Tesis de Maestría. Centro de investigaciones biológicas del noroeste. 69 pp.

Hirzel, A.H., J. Hausser, D. Chessel, N. Perrin. 2002. Ecological-Niche Factor Analysis: how to compute habitat suitability maps without absence data? *Ecol.* 83(7): 2027-2036.

Karl, D.M. 1999. A Sea of Change: Biogeochemical Variability in the North Pacific Subtropical Gyre. *Ecosystems*, 2: 181-214.

Kessler, W.S., 1990. Observations of long Rossby waves in the northern tropical Pacific. *J. Geoph. Res.* 95:5183-5217.

Kessler, W. 2006. The circulation of the Eastern tropical Pacific: a Review. *Prog. Ocean.* 69: 18-217.

Kleisner, K.M. 2008. A spatio temporal analysis of dolphinfish *Coryphaena hippurus* abundance in the western Atlantic: implications for stock assessment of a data-limited pelagic resource. University of Miami. Doctoral thesis. 331 pp.

Kraul, S. 1999 Seasonal abundance of dolphinfish *Coryphaena hippurus* in Hawaii and the tropical Pacific Ocean. *Sci. Mar.* 63 (3 – 4): 261-266.

Lalli, C.M., T.R. Parsons. 2006. Biological Oceanography, an introduction. 2nd Ed. The open University. Elsevier. 314 pp.

Lara-Lara J.R., S. Álvarez-Borrego, F.S. Lawrence. 1980. Variability and tidal exchange of ecological properties in a coastal lagoon. *Estuar. Coast. Mar. Sci.* 11: 613–637.

Lasso, J., L. Zapata. 1999. Fisheries and biology of *Coryphaena hippurus* (Pisces: Coryphanidae) in the Pacific Coast of Colombia and Panama. *Sci. Mar.* 63 (3-4):387-399.

Longhurst, A. 2004. The answer must be red crabs, of course. *Oceanogr.* 17 (2): 6–7.

López-Calderón, J., H. Manzo-Monroy, E. Santamaría-del-Ángel, R. Castro, A. González-Silveira, R. Milán-Núñez. 2006. Mesoscale variability of the Mexican Tropical Pacific using TOPEX and Sea-WiFS data. *Cienc. Mar.* 32(3): 539-549.

López-Sandoval, D.C., J.R. Lara-Lara, M.F. Lavín, S. Álvarez-Borrego, G. Gaxiola-Castro. 2009. Primary productivity in the Eastern tropical Pacific off Cabo Corrientes, Mexico. *Cienc. Mar.* 35 (2):169-182.

Manooch, I. I. I., C.S., D. L. Mason, R. S. Nelson. 1984. Food and gastrointestinal parasites of dolphin *Coryphaena hippurus* collected along the southern and Gulf coast of the United States. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, 50: 1511-1525.

Marín-Enríquez, E. 2012. Variabilidad de las tasas de captura de marlin azul (*Makaira nigricans*) en la entrada del Golfo de California, y su relación con algunas variables oceanográficas. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional. 67 pp.

Marinone, S.G. 2003. A three-dimensional model for the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *J. Geoph. Res.* 108, C10. 27 pp.

Martínez-Álvarez, G.E. 2006. Caracterización de las zonas de interés forestal. Características físicas: clima y suelo. La Salada, Centro Nacional Agropecuario. 62 pp.

Martínez-Rincón, R.O., S. Ortega-García, J.G. Vaca-Rodríguez 2009. Incidental catch of dolphinfish (*Coryphaena* spp.) reported by the Mexican tuna purse seiners in the eastern Pacific Ocean. *Fish. Res.* 96: 296-302.

Martínez-Rincón, R.O., S. Ortega-García, J.G. Vaca-Rodríguez. 2012. Comparative performance of generalized additive models and boosted regression trees for statistical modeling of incidental catch of wahoo (*Acanthocybium solandri*) in the Mexican tuna purse-seine fishery. *Ecol. Modell.* 233: 20-25.

Massutí, E. 1997. Biology of *Coryphaena hippurus* Linnaeus 1758 (Pisces: Coryphaenidae) in the Western Mediterranean. Tesis de Doctorado. Universidad de las Islas Baleares, España. 169 pp.

Massutí, E., B. Morales-Nin. 1997. Reproductive Biology of dolphinfish (*Coryphaena hippurus* L.) off the island of Majorca (Western Mediterranean). *Fish. Res.* 30:57 – 65.

Massutí, E., S. Deudero, P. Sánchez, B. Morales-Nin. 1998. Diet and Feeding of dolphin (*Coryphaena hippurus*) on Western Mediterranean waters. *Bull. Mar Sci.* 63(2): 329-341.

Massutí, E., B. Morales-Nin, J. Moranta. 1999. Otolith microstructure , age, and growth patterns of dolphin, *Coryphaena hippurus*, in the western Mediterranean. *Fish Bull.* 97: 891-899.

McCreary, J. P., H.S. Lee, D.B. Enfield. 1989. The response of the coastal to strong offshore winds: with application to circulation in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo. *J. Mar. Res.* 47: 81-109.

Mcphaden, M.J. 1999. Genesis and evolution of the 1997-98 El Nino. *Science* 283: 950-954.

Morreale, S., E.A. Standora, J.R. Spotila, F.V. Paladino. 1996. Migration corridor for sea turtles. *Nature.* 384:319-320.

Norton., J.G. 1999. Apparent habitat extensions of dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) in response to climate transients in the California Current. *Sci. Mar.* 63 (3-4): 239-260.

Olson, D.B., G.L. Hitchcock, A.J. Mariano, C.J. Ashjan, G. Peng, R.W. Nero, G.P. Podesta 1994. Life on the edge: Marine life and fronts. *Oceanogr.* 7(2): 52- 60.

Ortega-García, S., S. Lluch-Cota. 1996. Distribución de la abundancia de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) y su relación con la concentración de pigmentos fotosintéticos medidos por satélite en aguas al sur de México. *Inv. Geogr.* 4: 85-93.

Oxenford, H. A., W. Hunte. 1986. A preliminary investigation of stock structure of the dolphin *Coryphaena hippurus* in the Western Central Atlantic. *Fish. Bull.* 84(2): 451-459.

Oxenford, H.A. 1999. Biology of the dolphinfish *Coryphaena hippurus* in the western central Atlantic: a review. *Sci. Mar.* 63(3-4): 277-301.

Palko, B.J., G.L. Beardsley, W.J. Richards. 1982. Synopsis on the biological data of dolphin-fishes, *Coryphaena hippurus* Linnaeus and *Coryphaena equiselis* Linnaeus. .U. S. Dep. Commer. NOAA Tech. Rep. NMFS. Circ. 443,28 pp.

Parés-Sierra, A., A. Mascarenhas, S.G. Marinone, R. Castro. 2004. Temporal and spatial variation of the Surface winds in the Gulf of California. *Geoph. Res. Lett.* 30(6): 1-4.

- Patterson, K.R., J. Martínez. 1991. Exploitation of dolphin-fish *Coryphaena hippurus* L. off Ecuador: Analysis by Length-based Virtual Population Analysis. *Fishbyte* 9(2): 21 – 23.
- Peralta-Bravo, M.R. 2006. Análisis comparativo de los parámetros de crecimiento del dorado *Coryphaena hippurus* en dos áreas del Pacífico central oriental. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional.. 60 pp.
- Pla, C., J. Martí-Pujolar. 1999. Genetic homogeneity of dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) in the western Mediterranean and eastern Atlantic. *Sci. Mar.* 63 (3-4):337-341.
- Reilly, S.B. 1990. Seasonal changes in distribution and habitat differences among dolphins in the eastern tropical Pacific. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 66:1-11.
- Resnick, R., D. Halladay, K.S. Krane. 2001., Física Vol.1, 4^{ta} edición. Continental. 658 p.
- Rocha-Olivares, A., M. Bobadilla-Jiménez, S. Ortega-García, N. Saavedra-Sotelo, J.R. Sandoval-Castillo. 2006. Variabilidad mitocondrial del dorado *Coryphaena hippurus* en poblaciones del Pacífico. *Cienc. Mar.* 32(3): 596-578.
- Romero-Centeno, R., J. Zavala-Hidalgo, A. Gallegos, J.J. O'Brien. 2003. Tehuantepec isthmus wind climatology and ENSO signal. *J. Climate.* 16:2628-2639.
- Rosales-Morales, A. 2007. Estructura genética del dorado (*Coryphaena hippurus*) en el Pacífico mexicano, inferida mediante marcadores de ADN nuclear. Tesis de Licenciatura. Universidad del Mar. 62 pp.
- Rose, C. D., W. W. Hassler. 1974. Food habits and sex ratios of the dolphin *Coryphaena hippurus* captured in the western Atlantic Ocean off Hatteras, North Carolina. *Trans. Am. Fish. Soc.* 103: 94-100.
- Sakamoto, R., S. Kojima. 1999. Review of dolphinfish biological and fishing data in Japanese waters. *Sci. Mar.* 63(3-4):375-385.
- Santana-Hernández, H., J.J. Valdéz-Flores, I.M. Gómez-Humarán 2009. Distribución espacial y temporal de las capturas que conforman las capturas objetivo e incidental por barcos palangreros de altura en el Pacífico mexicano: 1983 - 2002. *Cienc. Pesq.* 2 (17):87-96.
- Schwenke, K.L., J.A. Buckel. 2008. Age, growth and reproduction of dolphinfish *Coryphaena hippurus* caught off the coast of North Carolina. *Fish Bull.* 106: 82-92.

Sing, T., O. Sander, N. Beerenwinkel, T. Lengauer. 2005. ROCr: Visualizing classifier performance in R. *Bioinformatics* 21(20): 7881.

Solana-Sansores, R. 2001. Spatial patterns of the epipelagic species caught incidentally in the tuna fishery on floating objects, in the eastern Pacific Ocean. *Cienc. Mar.* 27 (3):445–479.

Su, N.J., C.L. Su, A.E. Punt, S.Z. Yeh. 2008. Environmental and spatial effects on the distribution of blue marlin (*Makaira nigricans*) as inferred from data for longline fisheries in the Pacific Ocean. *Fish Oceanogr.* 17 (6): 432-445.

Su, N.J., C.L. Su, A.E. Punt, S.Z. Yeh, G. DiNardo. 2011. Modeling the impacts of environmental variation on the distribution of blue marlin (*Makaira nigricans*), in the Pacific Ocean. *ICES J. Mar. Sci.* 68(6):1072-1080.

Torres-Orozco E. 1993. Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. División de Oceanología. Departamento de Oceanografía Física. 92 pp.

Torres-Orozco, E., A. Trasviña, A. Muhlia-Melo, S. Ortega-García. 2005. Dinámica de mesoescala y capturas de atún aleta amarilla en el Pacífico mexicano. *Cienc. Mar.* 31(4): 671-683.

Trasviña, A., E.D. Barton, H.S. Vélez, J. Brown. 2003. Frontal subduction of a cool surface water mass in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Geofis. Int.* (42): 101-114.

Trasviña, A., E.D. Barton. 2008. Summer circulation in the Mexican tropical Pacific. *Deep-Sea Res. Pt. I.* 55: 587-607.

Tripp-Valdéz, A. F. Galván-Magaña, S. Ortega-García. 2010. Feeding habitats of dolphinfish *Coryphaena hippurus* in the Southeastern Gulf of California, Mexico. *J. Appl. Ichtyol.* 26: 578-582.

Tripp-Valdéz, M.A., F.J. García de León, S. Ortega-García, D. Lluch-Cota, J. López-Martínez, P. Cruz. 2010. Population genetic structure of dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) in the Gulf of California, using microsatellite loci. *Fish. Res.* 105:172-177.

Uda, M. 1938. Researches on “siome” or current rip in the seas and oceans. *Geophys. Mag.* 11 (4): 307-372.

Uchida, R.N., J.H. Uchiyama. 1986. Fishery atlas of the Northwestern Hawaiian islands. NOAA. Tech. Report. NMFS. Circ.38:248.

Walsh, J. J., T. E. Whitley, J. C. Kelly, S. A. Huntsman, R. D. Pillsbury. 1977. Further transition states of Baja California upwelling ecosystem. *Limnol. Oceanogr.*, 22(2):264-280.

Winston, W.L. 2000. Simulation modeling using @Risk. Duxbury(C) 270 p.

Wood, S. 2006. Generalized Additive Models. An Introduction with R. Chapman & Hall/CRC. 392 pp.

Wyrtki, K. 1975. Fluctuations of the dynamic topography in the Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.* 5:450-459.

Zainuddin, M., K. Saitoh, S. Saitoh. 2008. Albacore (*Thunnus alalunga*) fishing ground in relation to oceanographic conditions in the western North Pacific Ocean using remotely sensed satellite data. *Fish. Oceanogr.* 17(2):61-73.

Zamudio L,H.E. Hurlburt, J.E. Metzger, C.E. Tilburg . 2007. Tropical wave-induced oceanic eddies at Cabo Corrientes and the María Islands, Mexico. *J. Geoph. Res.* 112(C05048), doi: 10.1029/ 2006jc004018.

Zaytzev, O., R. Cervantes-Duarte, O. Montanate, A. Gallegos-García. 2003. Coastal upwelling activity on the Pacific shelf of the Baja California peninsula. *J. Oceanogr.* 59: 489-502.

Zuñiga-Flores, M.S. 2009. Dinámica poblacional del dorado (*Coryphaena hippurus*) en Baja California Sur, México: implicaciones para su manejo. Tesis de Doctorado. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional. 203 pp.

Zuñiga-Flores, M.S., S. Ortega-García, A. Klett-Trauslen. 2008. Interannual and seasonal variation of dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) catch rates in the southern Gulf of California, Mexico. *Fish. Res.* (94):13-17.

Zuñiga-Flores, M.S., S. Ortega-García, M.D.C. Rodríguez-Jaramillo, J. López-Martínez. 2011. Reproductive dynamics of common dolphinfish *Coryphaena hippurus* in the Southern Gulf of California. *Mar. Biol. Res.* 7: 677-689.

Zuñiga-Flores, M.S., S. Ortega-García, H. Santana-Hernández, M.D.C. Rodríguez-Jaramillo. 2011. First evidence of pompano dolphin (*Coryphaena equiselis*) spawning in the Central Mexican Pacific. *Pan. Am. Jour. Aquat. Sci.* 6(4): 260-263.