

**Instituto de
Investigación
Pesquera**

**Av. Colón 2780,
Casilla 350
Talcahuano
Tel: +56-41-2920410
Fax: +56-41-2920411
inpesca@inpesca.cl
www.inpesca.cl**

INFORME FINAL

FIPA N° 2016-55

**“Dinámica poblacional de la
anchoveta XV-II regiones a través
de modelación biofísica, año
2016”**

Talcahuano, Marzo 2019

TITULO DEL PROYECTO : Dinámica poblacional de la anchoveta XV-II regiones a través de modelación biofísica, año 2016

REQUIRENTE : Consejo de Investigación Pesquera, CIP
Fondo de Investigación Pesquera
Presidente CIP: Eduardo Riquelme Portilla

UNIDAD EJECUTORA Departamento de Pesquerías
Instituto de Investigación Pesquera
Director: Aquiles Sepúlveda Oróstica

UNIDADES SUBCONTRATADAS Universidad Arturo Prat
Jefe de Grupo: Gabriel Claramunt Quiñones

Centro de Investigaciones Aplicadas del Mar
Jefe de Grupo: Juan Mauricio Braun Alegría

JEFE PROYECTO : Sebastián Vásquez Pastene
Biólogo Marino
Instituto de Investigación Pesquera
Casilla 350, Talcahuano, Chile
Tel.: 56-41-2920410
Fax: 56-41-2920411
E-mail: svasquez@inpesca.cl

FIP N° 2014-35

**“DINÁMICA POBLACIONAL DE LA ANCHOVETA XV-II
REGIONES A TRAVÉS DE MODELACIÓN BIOFÍSICA, AÑO
2016”**



**Instituto de
Investigación
Pesquera
Octava Región**

Jefe Proyecto

Sebastián Vásquez Pastene

AUTORES

Sebastián Vásquez Pastene

Cristian Salas Domínguez

Sergio Núñez Elías

Aquiles Sepúlveda Oróstica

Marcos Arteaga Vásquez

Claudio Gatica Molina

Lilian Cisterna Aguayo

Luis Soto Mardones

Patric Contreras

Gabriel Claramunt Quiñones

Liliana Herrera Campo

Mauricio Braun Alegría

Jorge Oliva López

Talcahuano (Chile), 2019

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL	1
INDICE DE TABLAS	6
INDICE DE FIGURAS	7
INDICE DE ANEXOS	16
1.- RESUMEN EJECUTIVO	17
EXECUTIVE SUMMARY	20
2.- DESCRIPCION DE ACTIVIDADES DEL EQUIPO DE TRABAJO.....	23
3. OBJETIVOS DEL PROYECTO	28
4.- ANTECEDENTES.....	30
4.1. Antecedentes biológicos y pesqueros de la anchoveta en la zona norte de Chile	30
4.2. Principales procesos oceanográficos asociados a la zona norte de Chile y sur de Perú.....	33
4.3. La población de anchoveta del norte de Chile y sur de Perú como objeto de estudio mediante modelación biofísica	36
5. METODOLOGÍA DE TRABAJO	39
5.1. Modelo Hidrodinámico.....	42
5.1.1. Configuración del modelo hidrodinámico ROMS	42
5.1.2. Configuración del MH padre.....	43
5.1.3. Downscaling estadístico para el forzante viento	47
5.1.4. Configuración del MH hijo	48
5.1.5. Descripción de las variables de salida del modelo hidrodinámico.....	51
5.1.6. Implementación piloto del modelo biogeoquímico PISCES.....	51
5.1.7. Validación del modelo hidrodinámico	53
5.1.7.1. Validación basada en información satelital	53
5.1.7.2. Evaluación del forzante mejorado mediante downscaling	55
5.1.8. Plataforma computacional para la implementación del modelo ROMS	56
5.2. Modelo de acoplamiento biofísico	58
5.2.1. Modelo conceptual y revisión histórica.....	58
5.2.2. Implementación de un modelo biofísico para anchoveta en el norte de Chile	61
5.2.2.1. Variables de estado del modelo biofísico	62

5.2.2.2. Acoplamiento modelo hidrodinámico a modelo biofísico	62
5.2.3. Compartimentos biológicos y submodelos.....	63
5.2.3.1. Submodelo de movimiento por estadío	64
5.2.3.2. Submodelo de distribución espacial del desove	66
5.2.3.3. Submodelo de sincronización temporal del desove.....	70
5.2.3.4. Submodelo de crecimiento	73
5.2.3.5. Submodelo de mortalidad y superindividuo.....	74
5.2.3.6. Procesos estocásticos.....	75
5.2.4. Simulaciones y experimentos de simulación.....	75
5.2.5. Variables de salida y procesos modelados	76
5.2.6. Plataforma computacional para la implementación del modelo biofísico.....	77
5.3. Índices de reclutamiento a partir de modelación biofísica comparados con índices de reclutamiento provenientes de la evaluación de stock.....	77
5.3.1 Indicadores de reclutamiento, definición de criterios.....	77
5.3.2. Definición de área de crianza	78
5.3.3. Índice de reclutamiento obtenido mediante modelación biofísica	79
5.3.4. Índices de transporte-advección	81
5.3.5. Piezas de información para contrastar los resultados biofísicos	81
5.3.5.1. Índices de reclutamiento provenientes de la evaluación de stock de anchoveta	81
5.3.6. Patrones de conectividad, crecimiento y mortalidad.....	82
5.4. Identificación de forzantes oceanográficos-atmosféricos hacia crecimiento, sobrevivencia, transporte de huevos y larvas de anchoveta.	85
5.4.1. Datos satelitales	86
5.4.1.1. Temperatura superficial del mar.....	86
5.4.1.2. Viento satelital.....	86
5.4.1.3. Corrientes geostróficas y energía cinética.....	87
5.4.1.4. Clorofila superficial del mar.....	87
5.4.2. Datos hidrográficos	88
5.4.3. Datos de estaciones costeras.....	89
5.4.4. Índices climáticos	90
5.4.5. Procesamiento y análisis de la información	90

5.4.5.1. Procesamiento y análisis de datos satelitales.....	91
5.4.5.2. Climatologías.....	94
5.4.5.3. Funciones Ortogonales Empíricas (Feos).....	94
5.4.5.4. Diagramas de variabilidad espacio-temporal (Diagramas de Hovmöller)	97
5.4.5.5. Correlación cruzada.....	97
5.4.5.6. Transformada de Wavelet.....	97
5.4.5.7 Hidrografía (CTDO data)	98
5.5. Modelo conceptual de la dinámica poblacional de la anchoveta en la zona norte de Chile	99
6.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	101
6.1. Estructura y validación del modelo hidrodinámico	101
6.1.1. Implementación de modelo hidrodinámico con forzantes mejorados	101
6.1.2. Validación estacional e interanual por medio del uso de información satelital	104
6.1.3. Validación de la estructura vertical a través del uso de datos in situ	110
6.1.4. Implementación piloto del modelo biogeoquímico PISCES.....	117
6.2. Síntesis de la información biológica que sustenta el sistema de modelación biofísica: Sub-modelos	121
6.2.1. Sub-modelo de distribución espacial del desove, generación de drifters	121
6.2.2. Submodelo de sincronización temporal del desove.....	126
6.2.3. Submodelo de crecimiento temperatura-dependiente.....	129
6.2.4. Submodelo de movimiento por estadio	132
6.3. Índices de reclutamiento a partir de la modelación biofísica comparados con índices de reclutamiento provenientes de otras fuentes de información	135
6.3.1. Índices de pre-reclutamiento temporal desde modelación biofísica.....	138
6.3.2. Índice de reclutamiento proveniente de la evaluación de stock de anchoveta	141
6.3.3. Contrastación de índices de reclutamiento biofísico respecto a otros indicadores relevantes.	142
6.4. Identificación de forzantes físicos hacia el reclutamiento de anchoveta.....	147
6.4.1. Identificación de forzantes físicos	147
6.4.2. Análisis de climatologías.....	149
6.4.2.1. Temperatura superficial del mar.....	150

6.4.2.2. Clorofila superficial.....	151
6.4.2.3. Esfuerzo del viento superficial	152
6.4.2.4. Velocidad de la Deriva de Ekman Superficial.....	153
6.4.2.5. Distribución vertical de la velocidad de la Deriva de Ekman	154
6.4.2.6. Velocidad geostrófica	155
6.4.2.7. Energía cinética asociada a remolinos (EKE)	156
6.4.2.8. Frentes térmicos.....	157
6.4.2.9. Remolinos	158
6.4.3. Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs)	164
6.4.3.1. Temperatura superficial del mar.....	164
6.4.3.2. Clorofila superficial del mar.....	166
6.4.3.3. Esfuerzo del viento superficial	167
6.4.3.4. Velocidad de la Deriva de Ekman Superficial.....	168
6.4.3.5. Velocidad geostrófica	171
6.4.3.6. Energía cinética asociada a remolinos (EKE)	172
6.4.3.7. Frentes térmicos.....	173
6.4.4 Series de estaciones costeras	174
6.4.5. Escala anual. Diagramas de Hovmöller.....	178
6.4.5.1. Temperatura superficial del mar.....	178
6.4.5.2. Clorofila superficial.....	179
6.4.5.3. Esfuerzo del Viento Superficial.....	180
6.4.5.4. Velocidad de la Deriva de Ekman	182
6.4.5.5. Velocidad Geostrófica	183
6.4.5.6. Energía cinética asociada a remolinos (EKE)	184
6.4.5.7. Frentes térmicos.....	185
6.4.6. Escala interanual. Diagramas de Hovmöller	187
6.4.6.2. Anomalías de la clorofila.....	189
6.4.6.3. Anomalías del Esfuerzo del Viento Superficial	190
6.4.6.4. Anomalías de la velocidad de la deriva de Ekman	191
6.4.6.5. Anomalías de la velocidad geostrófica.....	191
6.4.6.6. Anomalías de la EKE	193

6.4.7. Correlaciones cruzadas	195
6.4.7.1. Correlación cruzada entre TSM y clorofila	195
6.4.7.2. Correlaciones cruzadas mediante Wavelet	196
6.4.8. Indicadores derivados del modelo hidrodinámico ROMS	197
6.4.8.1. Dinámica de corrientes verticales.....	199
6.5. Identificación de zonas de crianza/reclutamiento.....	204
6.5.1. Índice de pre-reclutamiento espacial y patrón de transporte	205
6.6. Utilidad de la modelación biofísica hacia el manejo pesquero	218
6.7. Perspectivas de investigación aplicada en modelación biofísica anchoveta norte	224
6.8. Modelo conceptual para la dinámica espacial de la anchoveta en el norte de Chile..	229
7. CONCLUSIONES	235
7.1. Modelación Hidrodinámica	235
7.2. Aspectos Oceanográficos	235
7.3. Modelación biofísica	236
8. TALLERES Y REUNIONES.....	240
9. REFERENCIAS	243

INDICE DE TABLAS

Tabla I. Herramientas utilizadas en el proceso de modelación biofísica para la obtención de índices de reclutamiento.	40
Tabla II. Listado de proyectos que cuentan con datos respecto a la distribución espacial del desove de anchoveta en el norte de Chile.	69
Tabla III. Información satelital utilizada en el análisis de forzantes oceanográficos-atmosféricos en la región norte de Chile y sur de Perú.	88
Tabla IV. Datos de CTDO obtenidos para el proyecto, provenientes de cruceros desarrollados en el marco de la evaluación directa de anchoveta en la región norte de Chile. Fuente: Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura.	89
Tabla V. Resultados de la estimación de temporada reproductiva de anchoveta: a, b y c son los parámetros de la función sigmoidea; 25% y 75% representan el inicio y termino de la actividad reproductiva en año biológico. Las columnas en rojo indican los estimados de inicio y término de la modelación biofísica.	128
Tabla VI. Principales forzantes o variables críticas que caracterizan la variabilidad física de la región costera y oceánica del norte de Chile, en las componentes estacional e interanual.	149
Tabla VII. Matriz de conectividad para el área de desove de anchoveta para el periodo 1995-2016. En rojo destacan las interacciones que sobrepasan el 50% de conexión. El diagrama a la derecha muestra los cuadrantes considerados y destaca en rojo la región fuente (desove).	210
Tabla VIII. Matriz de conectividad para el área de desove de anchoveta en cada año para el periodo 1995-2016 considerando la distribución regional en el centro norte de Chile. En rojo destacan las interacciones que sobrepasan el 50% de conexión. El diagrama a la derecha muestra los cuadrantes considerados y destaca en rojo la región fuente (desove).	213
Tabla IX. Estadísticas para el modelo lineal generalizado parsimonioso aplicado a los resultados de la modelación biofísica para la variable dependiente reclutamiento respecto a las condiciones iniciales de desove considerando área conjunta de crianza Perú Chile. ...	215
Tabla X. Estadísticas para el modelo lineal generalizado parsimonioso aplicado a los resultados de la modelación biofísica para la variable dependiente reclutamiento respecto a las condiciones iniciales de desove considerando área crianza Chile.	217

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de trabajo para el estudio de la historia de vida temprana de anchoveta orientado a la dinámica del reclutamiento en la zona norte de Chile bajo un enfoque de modelación biofísica.....	41
Figura 2. Dominios de modelos hidrodinámicos generados. Recuadro color rojo representa el dominio padre del modelo ROMS con resolución espacial de 10 km, el recuadro azul corresponde al dominio hijo con resolución espacial de ~3 km, el cual es utilizado para el acoplamiento biofísico.....	44
Figura 3. Metodología para generar archivos de entrada en MH “hijo”.	51
Figura 4. Diagrama de Clúster INPESCA, 128 procesadores y 48 TB de almacenamiento.58	
Figura 5. Modelo conceptual para el ciclo de vida de la anchoveta (<i>Engraulis ringens</i>) en el norte de Chile entre las XV-II Regiones.	60
Figura 6. Ichthyop, modelo para configurar modelos biofísicos acoplados a modelos hidrodinámicos, http://www.ichthyop.org/). En este sitio se encuentra disponible la documentación y descarga de archivos.	62
Figura 7. Marco de referencia espacial para la determinación de matrices de conectividad para evaluar las relaciones fuente-sumidero; A1: área costera de Chile (50 mn), A2: área costera de Perú (50 mn), A3: área entre las 70 y 200 mn desde la costa de Chile. A3: área entre las 70 y 200 mn desde la costa de Perú, A5: área oceánica frente a Chile y Perú.....	84
Figura 8. Temperatura superficial del mar promedio periodo 1994-2016 para a) datos satelitales Pathfinder-Modis, b) climatología COADS, c) modelo ROMS NCEP2 PLUS 6hrs (ROMS 1) y b) modelo ROMS NCEP2 PLUS FRC (ROMS 2).	102
Figura 9. Secciones verticales de la corriente meridional media promediada entre los 7°S y 13°S para a) modelo ROMS NCEP2 6hrs (periodo 1994-2014), b) modelo ROMS PLUS FRC (periodo 1994-2016), c) extraída de Cambon <i>et al.</i> , 2013. Correspondiente a la secciones verticales de la corriente meridional modelada en la misma banda, forzada con datos de esfuerzo de viento observado ERS (escaterómetro).....	103
Figura 10. Secciones verticales de la corriente meridional media promediada entre los 30°S y 35°S para a) modelo ROMS NCEP2 6hrs (periodo 1994-2014), b) modelo ROMS PLUS FRC (periodo 1994-2016), c) extraída de Cambon <i>et al.</i> , 2013. Correspondiente a la secciones verticales de la corriente meridional modelada (en la misma banda), forzada con datos de esfuerzo de viento observado ERS (escaterómetro).....	104
Figura 11. Ciclo estacional de la anomalía de la temperatura superficial del mar para datos de satélite Pathfinder-ModisAqua (panel izquierdo), modelo ROMS2 (panel centro-	

izquierdo), el sesgo de cálculo (panel centro-derecho) y el error cuadrático medio espacial (panel derecho). La estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera. 106

Figura 12. FOE del primer modo de variabilidad de la Temperatura superficial del mar. Dominio espacial para a) Datos satélite Pathfinder-ModisAqua y b) modelo ROMS2, c) serie de tiempo 1994 – 2016 para datos de satélite y modelo ROMS, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada..... 107

Figura 13. Ciclo estacional de la anomalía del Nivel del Mar para datos de satélite AVISO (panel izquierdo), modelo ROMS2 (panel centro-izquierdo), el sesgo de cálculo (panel centro-derecho) y el error cuadrático medio espacial (panel derecho). La estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera..... 108

Figura 14. FOE del primer modo de variabilidad de la Anomalía del nivel del mar. Dominio espacial para a) Datos satélite AVISO y b) modelo ROMS2, c) serie de tiempo 1994 – 2016 para datos de satélite y modelo ROMS, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada..... 109

Figura 15. Distribución espacial de las transectas WOCE utilizadas para la validación vertical del modelo ROMS..... 110

Figura 16. Análisis de la estructura vertical de la temperatura en el modelo ROMS respecto a observaciones in situ realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de Perú (16°45'S)..... 111

Figura 17. Análisis de la estructura vertical de la salinidad en el modelo ROMS respecto a observaciones in situ realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de Perú (16°45'S). 112

Figura 18. Diagrama de Taylor para las a) temperatura y b) salinidad en el crucero WOCE realizado frente a Perú durante abril y mayo de 2009 considerando las profundidades 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad..... 113

Figura 19. Diagrama TS obtenido desde a) datos oceanográficos WOCE y b) ROMS para la transecta realizada frente a Perú (16°45'S). 114

Figura 20. Análisis de la estructura vertical de la temperatura en el modelo ROMS respecto a observaciones in situ realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de Chile central (32°30'S)..... 115

Figura 21. Análisis de la estructura vertical de la salinidad en el modelo ROMS respecto a observaciones in situ realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de Chile central (32°30'S)..... 115

- Figura 22. Diagrama de Taylor para las a) temperatura y b) salinidad en el crucero WOCE realizado frente a Chile central durante enero y febrero de 2010 considerando las profundidades 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad. . 116
- Figura 23. Diagrama TS obtenido desde a) datos oceanográficos WOCE y b) ROMS para la transecta realizada frente a Chile central (32°30'S)..... 117
- Figura 24. Climatología estacional de la temperatura superficial del mar obtenida desde el modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES para el periodo 2000-2010..... 118
- Figura 25. Climatología estacional del oxígeno disuelto a 200 metros de profundidad obtenida desde el modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES para el periodo 2000-2010..... 118
- Figura 26. Climatología estacional de la clorofila en diatomeas obtenida desde el modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES para el periodo 2000-2010..... 120
- Figura 27. Climatología estacional de la nano clorofila obtenida desde el modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES para el periodo 2000-2010..... 120
- Figura 28. Climatología estacional de la nano clorofila obtenida desde el modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES para el periodo 2000-2010..... 120
- Figura 29. Distribución espacial de los desoves de anchoveta en la zona norte de Chile identificados a través de los cruceros orientados a la evaluación de biomasa desovante por medio del Método de producción Diaria de Huevos (MPDH)..... 122
- Figura 30. Desove observado de anchoveta año periodo 1995-2016 (panel superior); y desove modelado de anchoveta periodo 1995-2016, cada punto corresponde a individuos simulados para la liberación en ICHTHYOP, en colores la batimetría del modelo hidrodinámico..... 123
- Figura 31. Identificación de las zonas de desove de anchoveta en el norte de Chile: a) promedio espacial periodo 1995-2016; b) desviación estándar del promedio espacial; c) identificación de zonas recurrentes de desove..... 125
- Figura 32. a) Variabilidad interanual del centro de gravedad del desove de anchoveta en el norte de Chile; b) Frecuencia de ocurrencia de desove de anchoveta por región administrativa, periodo 1995-2016..... 126
- Figura 33. a) comienzo, máximo y fin de la temporada reproductiva de anchoveta en la zona norte de Chile y regresión lineal para cada serie de tiempo; b) duración de la temporada de desove de la anchoveta calculada como el tiempo transcurrido entre el inicio y el termino estimado, y; c) esquema gráfico de la extensión del periodo reproductivo, el punto rojo indica el máximo estimado. 129

- Figura 34. a) Desarrollo de huevos de anchoveta bajo distintos regímenes de temperatura (modificado de Claramunt *et al.*, 2007); b) curvas de crecimiento temperatura-dependiente para larvas y juveniles de anchoveta (modificado de Llanos-Rivera, 2005)..... 130
- Figura 35. Función de crecimiento individual considerada en ICHTHYOP basada en lo propuesto por Moreno *et al.*, (2011) en relación a otros estudios de crecimiento temprano de anchoveta en el norte de Chile..... 131
- Figura 36. Ejemplo de crecimiento individual temperatura-dependiente para un pulso de desove biofísico de anchoveta realizado el 17/08/1995. 132
- Figura 37. Distribución vertical de larvas de anchoveta desde datos observados (puntos grises) y esquema de migración diurno-nocturna usada en el modelo biofísico (línea roja) para: a) larvas bajo 10 mm de longitud total y b) larvas sobre 10 mm de longitud total. .. 134
- Figura 38. Esquema de movimiento vertical de larvas de anchoveta como resultado de la modelación biofísica. Incluye flotabilidad de huevos y migración diferenciada por edad para larvas y juveniles. El último patrón mostrado se extendió hasta el final de la simulación..... 135
- Figura 39. Ejemplo de simulación del transporte de individuos liberados en la zona de desove de anchoveta en el norte de Chile. Los paneles corresponden a resultados rescatados cada 5 y 10 días (t). El color de cada partícula es proporcional a la talla estimada en cada edad bajo el submodelo de crecimiento..... 136
- Figura 40. Diagrama de distancias de dispersión de estadios tempranos de anchoveta hasta la edad de reclutamiento biofísico (60 días) obtenidos a través de modelación en el período 1995-2016..... 137
- Figura 41. Series temporales de la sobrevivencia de estadios tempranos de anchoveta hasta 60 días de edad que indican la proporcionalidad en los destinos de los desoves ocurridos en Chile norte (transportados hacia Perú y Chile), obtenida mediante un esquema de modelación biofísica en el período 1995-2016..... 140
- Figura 42. Serie temporal del índice de reclutamiento biofísico para el período 1996-2017. Las líneas rojas presentan la identificación de periodos de cambio a lo largo de la serie. 141
- Figura 43. Serie temporal del índice de reclutamiento estimado por el modelo estadístico edad-estructurado para el período 1996-2017 y obtenido de Espínola *et al.*, (2017). Las líneas rojas presentan la identificación de periodos de cambio a lo largo de la serie. 142
- Figura 44. Serie de tiempo de sobrevivencia biofísica (línea sólida negra) contrastada con estimaciones de reclutamiento del primer semestre del año siguiente provenientes de la evaluación de stock de anchoveta obtenida de Espínola *et al.*, (2017). 144
- Figura 45. Regresión lineal entre el índice de reclutamiento biofísico y el índice de reclutamiento proveniente de la evaluación de stock edad estructurada. En negro se indica

la correlación para todo el periodo evaluado (1995-2016) y en rojo el periodo 2003-2017.	145
Figura 46. Climatología de la TSM (julio 2002 hasta diciembre 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud.....	150
Figura 47. La climatología de la Clorofila superficial (julio 2002 hasta junio 2017) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud.	151
Figura 48. La climatología del Esfuerzo del Viento (julio 1987 hasta mayo 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud.	152
Figura 49. La climatología de la deriva de Ekman (cm s-1) (julio 1987 hasta mayo 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud.....	153
Figura 50. Climatología satelital CCMP (serie 1987-2016) de la deriva de Ekman zonal en la sección vertical transversal a la costa situada en los 18,6°S. Paneles de la izquierda corresponde a la componente zonal. Paneles de la derecha corresponde a la componente meridional. Valores positivos hacia el Este y hacia el Norte, respectivamente.	155
Figura 51. La climatología de la velocidad geostrófica (cm s ⁻¹) (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud.	156
Figura 52. La climatología de la EKE en cm ² s ⁻² (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud.	157
Figura 53. Climatología de frentes de surgencia derivados de gradientes térmicos superficiales determinados a partir de imágenes de TSM MODIS. Los contornos muestran los valores asociados a los colores indicando que los rojos son las zonas de mayor presencia de frentes durante los meses del año. En el periodo de desove (junio-diciembre) con máximo en agosto los frentes son débiles, aunque mayores en la costa de Chile y especialmente asociados a la zona de desove de del Loa. Los valores que se observan están entre 0 y 10 °C/Km escalados x10 ⁻²	158
Figura 54. Climatología de Remolinos detectados mediante el índice de Okubo-Weiss(W). Los colores azules envuelto en contorno negro indican la presencia típica de remolinos en diferentes zonas. Los cálculos se realizaron en base a imágenes diarias por lo que son estructuras que prevalecen en el tiempo. Los contornos representan valores menores al 20% de la desviación estándar del campo analizado (Wo=-0.2*std(W)) que definen remolinos de mesoescala persistentes.	159
Figura 55. Remolinos de mesoescala y sub-mesoescala modelados por ROMS. El campo de colores indica la altimetría obtenida para el período de cada crucero de evaluación del desove de anchoveta. Los perímetros de los remolinos anticiclónicos se muestran en negro y los ciclónicos en gris. En puntos se muestran las estaciones positivas para huevos de anchoveta: puntos rojos estaciones positivas al interior de remolinos. Se muestran los radios estimados para evaluar el tamaño de cada remolino detectado.	161

Figura 56. Tamaño de remolinos detectados en el área de desove de anchoveta durante el periodo de ejecución de cada crucero de evaluación separados pro polaridad del giro: remolinos anticiclónicos (panel superior) y remolinos ciclónicos (panel inferior). 162

Figura 57. Proporción entre remolinos anticiclónicos (rojo) y ciclónicos (azul) detectados en el área de desove de anchoveta durante el periodo de ejecución de cada crucero de evaluación para el periodo 1997-2016..... 162

Figura 58. Análisis cuantitativo del desove de anchoveta asociado a remolinos de meso y submesoescala considerando el número de estaciones positivas (rojo) y la densidad de huevos de anchoveta (negro) para el periodo 1997-2016..... 163

Figura 59. Análisis cuantitativo del desove de anchoveta asociado a remolinos de meso y submesoescala considerando el número de estaciones positivas y el tipo de polaridad del giro para el periodo 1997-2016: remolinos anticiclónicos (rojo) y ciclónicos (azul). 164

Figura 60. Funciones Empíricas Ortogonales de la TSM (julio 2002 hasta diciembre 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud. Estructuras espaciales: (a) Modo 1, (b) modo 2, (c) modo 3. Estructuras temporales (d) Modo 1, (e) modo 2, (f) modo 3. 166

Figura 61. Funciones Empíricas Ortogonales de la Clorofila (julio 2002 hasta junio 2017) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud. Estructuras espaciales: (a) Modo 1, (b) modo 2, (c) modo 3. Estructuras temporales (d) Modo 1, (e) modo 2, (f) modo 3. 167

Figura 62. Funciones Empíricas Ortogonales complejas del esfuerzo del viento superficial (CCMP 1987-2016) para la región entre los 10°S-30°S y costa-80°W. Estructuras espaciales y temporales de los dos primeros modos..... 168

Figura 63. Funciones Empíricas Ortogonales de la velocidad superficial de Ekman (CCMP 1987-2016) para la región entre los 10°S-30°S y costa-80°W. Estructuras espaciales y temporales de los dos primeros modos..... 169

Figura 64. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas de la deriva de Ekman zonal de la serie CCMP 1987-2016. Las estructuras espaciales de (a) Primer y (b) Segundo modo. Las estructuras temporales de (c) Primer y (d) Segundo modo. 170

Figura 65. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas de la deriva de Ekman meridional de la serie CCMP 1987-2016. Las estructuras espaciales de (a) Primer y (b) Segundo modo. Las estructuras temporales de (c) Primer y (d) Segundo modo..... 171

Figura 66. Funciones Empíricas Ortogonales de la velocidad geostrofica (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S y costa-80°W. Estructuras espaciales y temporales de los dos primeros modos..... 172

Figura 67. Funciones Empíricas Ortogonales de la EKE (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud. Estructuras espaciales: (a) Modo 1, (b) modo 2, (c) modo 3. Estructuras temporales (d) Modo 1, (e) modo 2, (f) modo 3.....	173
Figura 68. Funciones Empíricas Ortogonales de los frentes térmicos (2002-2017)) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud. Estructuras espaciales: (a) Modo 1, (b) modo 2, (c) modo 3. Estructuras temporales (d) Modo 1, (e) modo 2, (f) modo 3.....	174
Figura 69. Distribución temporal de la TSM (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 1990-2015), para las estaciones costeras de Arica, Iquique y Antofagasta.....	176
Figura 70. Distribución temporal del nivel del mar (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 1990-2015), para las estaciones costeras de Arica, Iquique y Antofagasta.	176
Figura 71. Distribución temporal del viento (DMC, 2000-2017) en estación costera de Iquique y de Antofagasta.....	177
Figura 72. Distribución temporal interanual de la anomalía de la TSM (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 1990-2015), para las estaciones costeras de Arica, Iquique.....	177
Figura 73. Distribución temporal interanual de la anomalía del nivel del mar (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 1990-2015), para las estaciones costeras de Arica, Iquique y Antofagasta, en conjunto con la serie de tiempo e índice ONI (El Niño oceánico).....	178
Figura 74. Diagrama Hovmöller de TSM a lo largo de la costa (julio 2002 hasta diciembre 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud.	179
Figura 75. Diagrama de Hovmöller de Clorofila a lo largo de la costa (julio 2002 hasta junio 2017) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud.	180
Figura 76. Diagrama de Hovmöller del Esfuerzo del Viento a lo largo de la costa (julio 1987 hasta mayo 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud. Los contornos de colores son las magnitudes del EVS.....	181
Figura 77. Diagrama de Hovmöller de la deriva de Ekman a lo largo de la costa (julio 1987 hasta mayo 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud. Los contornos de colores son las magnitudes del EVS.....	182
Figura 78. Diagrama de Hovmöller de la deriva de Ekman a lo largo de la costa (julio 1987 hasta mayo 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud. Los contornos de colores son las magnitudes del EVS. (a) Zonal y (b) Meridional.	183

Figura 79. Diagrama de Hovmöller de la velocidad geostrofica a lo largo de la costa (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud.....	184
Figura 80. Diagrama de Hovmöller de la EKE a lo largo de la costa (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud.	185
Figura 81. Evolución temporal de los gradientes térmicos (°C/km*10 ⁻²) a lo largo de la costa sur de Perú y norte de Chile entre 2002 y 2017. El panel de la derecha es el promedio temporal (y rango).	186
Figura 82. Evolución temporal de los gradientes térmicos promedios(°C/km*10 ⁻²) de la banda entre los 18°S y 24°S, que representa la zona de mayor presencia de estas estructuras entre 2002 y 2017.	187
Figura 83. Índice Oceánico de El Niño para el período comprendido entre 1984 y 2016.	188
Figura 84. Diagrama Hovmöller de las anomalías de la TSM a lo largo de la costa (julio 2002 hasta diciembre 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud.	189
Figura 85. Diagrama de Hovmöller de las anomalías de la Clorofila a lo largo de la costa (julio 2002 hasta junio 2017) para la región entre los 10°S-30°S de latitud.	190
Figura 86. Diagrama de Hovmöller de anomalías del Esfuerzo del Viento a lo largo de la costa (julio 1987 hasta mayo 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud.	191
Figura 87. Diagrama de Hovmöller de las anomalías de la velocidad de Ekman a lo largo de la costa (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S de latitud....	192
Figura 88. Diagrama de Hovmöller de las anomalías de velocidad geostrofica a lo largo de la costa (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S de latitud.	193
Figura 89. Diagrama de Hovmöller de las anomalías de EKE a lo largo de la costa (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S de latitud.....	194
Figura 90. Evolución temporal promedio de la Energía Cinética de Remolinos (cm ² /s ²) de la banda entre los 18°S y 30°S entre 1992 y 2017.	194
Figura 91. Correlación cruzada entre la TSM y la Clorofila, el EVS y la TSM, y el EVS y Clorofila.....	196
Figura 92. Correlación cruzada mediante wavelet entre las series temporales EVS y TSM.	197
Figura 93. Corriente superficial modelo ROMS2 promedio mensual.....	199
Figura 94. Sección vertical corriente meridional promedio mensual, latitud 14°S.....	202

Figura 95. Sección vertical corriente meridional promedio mensual, latitud 18°S.....	202
Figura 96. Sección vertical corriente meridional promedio mensual, latitud 22°S.....	203
Figura 97. Sección vertical corriente meridional promedio mensual, latitud 26°S.....	203
Figura 98. Gráfica de espacio-tiempo (Diagrama Hovmöller) para la temperatura del mar modelada (°C) para estaciones situadas en la región costera (<20 mn) a las latitudes de 18°30'S, 21°S y 23°S, donde se verifican áreas de desove permanentes de anchoveta.....	204
Figura 99. Distribución espacial de anchovetas de 60 días de edad simulada mediante modelación biofísica para el periodo 1995-2016.	207
Figura 100. Distribución espacial de las capturas comerciales anuales de anchoveta en la zona norte de Chile, período 2000-2016 (fuente: Böhm <i>et al.</i> , 2017).....	209
Figura 101. Efecto de los factores que constituyen condiciones iniciales sobre el éxito del reclutamiento individual. Se muestran los factores estadísticamente significativos.	216
Figura 102. Efecto de los factores que constituyen condiciones iniciales sobre el éxito del reclutamiento individual. Se muestran los factores estadísticamente significativos.	217
Figura 103. Modelo conceptual de la historia de vida temprana del stock de anchoveta del norte de Chile y sur del Perú con énfasis en procesos biofísicos relevantes para el control de la sobrevivencia. En negro se muestran los procesos abordado en el presente estudio, en gris procesos no abordados y que constituyen focos de estudio hacia el futuro.	233
Figura 104. Modelo conceptual de la dinámica espacio-temporal de unidad poblacional de anchoveta distribuida en el sur de Perú y norte de Chile (17° - 26°S) con énfasis en la historia de vida temprana de la especie.	234

INDICE DE ANEXOS

Anexo I. Acta de reunión de coordinación con Subsecretaría de Pesca.....	257
Anexo II. Acta resumen reunión de organización inter-institucional, Iquique, mayo de 2017.	264
Anexo III. Taller de discusión de resultados inter-institucional INPESCA, CIAM, UNAP.	281
Anexo IV. Taller de presentación y discusión de resultados, Iquique, 03 de julio de 2018.	285
Anexo V. Evaluación experta del proyecto realizada por el Dr. Andrés Ospina Álvarez de Mediterranean Institute for Advanced Studies (IMEDEA) y Spanish National Research Council (CSIC).....	291
Anexo VI Trayectorias de transporte de huevos y larvas de anchoveta simuladas mediante modelación biofísica en el norte de Chile: desoves generados en la región de Arica y Parinacota.	305
Anexo VII. Trayectorias de transporte de huevos y larvas de anchoveta simuladas mediante modelación biofísica en el norte de Chile: desoves generados en la región de Tarapacá. .	328
Anexo VIII. Trayectorias de transporte de huevos y larvas de anchoveta simuladas mediante modelación biofísica en el norte de Chile: desoves generados en la región de Antofagasta.....	353

1.- RESUMEN EJECUTIVO

En el presente informe se entregan los resultados obtenidos en el contexto del proyecto FIP 2016-55 “Dinámica poblacional de la anchoveta XV-II regiones a través de modelación biofísica, año 2016”. Los principales focos de este informe son la implementación de un modelo hidrodinámico de alta resolución para la región del norte de Chile y sur de Perú, el esquema de acoplamiento físico-biológico para modelar la historia de vida temprana de la anchoveta, el establecimiento de sub-modelos biológicos iniciales para la modelación, la descripción de aspectos oceanográficos asociados a zona de desove y reclutamiento y la descripción de información asociada a la dinámica del reclutamiento desde un modelo de dinámica poblacional que se utilizó como contraste de los resultados de la modelación biofísica.

El proceso de modelación hidrodinámica estableció que la zona norte de Chile y sur de Perú es una zona compleja de modelar, debido a limitaciones en la detección de variables atmosféricas por efectos principalmente orográficos. En este proyecto, la implementación de mejoras en los forzantes atmosféricos (vientos y flujos de calor) permitió subsanar dichas complejidades y obtener un modelo regional (ROMS) con mayor nivel de precisión. El modelo hidrodinámico tridimensional ROMS, de resolución horizontal ~3 km para la zona del norte de Chile y sur de Perú, demostró un buen desempeño reproduciendo los rasgos oceanográficos más importantes de la zona de estudio y su variabilidad tanto espacial como temporal (estacional e interanualmente), además de reproducir la influencia de eventos extremos ecuatoriales de tipo El Niño. Estos aspectos permitieron proceder con confianza hacia el acoplamiento con el modelo biofísico.

Se presenta un completo análisis descriptivo y cuantitativo de los principales procesos oceanográficos asociados al desove y transporte de estadíos tempranos de anchoveta que en su conjunto caracterizan a la región como una zona con bajos niveles advectivos y una dinámica de circulación preferentemente hacia el norte. Los principales hallazgos asociados a este punto indican que en la zona costera entre la XV y II Regiones se verificó una menor ventilación (menor esfuerzo del viento y deriva de Ekman) en relación a las áreas

inmediatamente al norte y al sur, no obstante, el viento presentó un claro dominio hacia el norte. La velocidad de Ekman evidenció un flujo meridional costero ($<73^{\circ}\text{W}$) y somero ($<20\text{-}30\text{ m}$) hacia el norte, en tanto se observan velocidades de Ekman zonales muy bajas en la región más costera, las que se intensifican hacia el océano interior a partir de los 75°W . Además, se observó una clara banda meridional entre los $17\text{-}24^{\circ}\text{S}$, que distingue a la región de estudio de las regiones inmediatamente adyacentes, en el sur del Perú y al sur de los $24\text{-}26^{\circ}\text{S}$. Esta banda meridional se caracterizó por presentar aguas superficiales más cálidas, baja ventilación costera, menores concentraciones de clorofila, y menor dinámica (velocidades de Ekman, velocidades geostroficas, y EKE). Por otra parte, la región muestra una circulación geostrofica dominada por meandros y giros durante todo el año, así como la presencia de frentes térmicos costeros. Esta menor dinámica costera verifica a esta región como una zona menos advectiva, especialmente al término del invierno (desove) que favorece la retención de estadíos tempranos de anchoveta. El incremento del viento favorece las corrientes hacia el norte después del período de desove, reforzadas por la presencia de los frentes a lo largo de la costa.

Además, se presentan los resultados asociados a un complejo esquema de modelación que incluyó la simulación del desove y del transporte de huevos, larvas y juveniles desde las zonas de desove (1995-2016). Este modelo identificó que la zona de desove de la anchoveta muestra mayor actividad y recurrencia en tres focos espaciales: i) al sur de Arica en torno a $18^{\circ}20'\text{S}$, ii) al sur de Iquique entre 20° y 22°S siendo el de mayor abundancia y extensión, y; iii) el área costera adyacente a Antofagasta entre 23° y 24°S . En general el área de desove se caracteriza por ser un sistema de menor dinámica producto de un menor estrés de viento, lo que se ve acentuado durante la época de desove (invierno-primavera temprana). Además, los centros de gravedad del desove de anchoveta muestran variabilidad interanual, con una tendencia de largo plazo a desplazarse hacia el norte. Posterior a 2006 en un 60% de los años se registró el centro de gravedad al norte de los 21°S , mientras que previo a 2006 sólo un 10% de los años evidenció este rasgo. Por otra parte, la temporada reproductiva de anchoveta muestra máxima actividad en los meses de agosto y septiembre. Sin embargo, existe variabilidad interanual en la sincronización del desove (inicio, máximo

y término). Este aspecto demográfico puede causar (des)acoplamiento con las condiciones propicias para la retención y el éxito reproductivo.

De acuerdo a la modelación biofísica, la dispersión obtenida para anchoveta, está dentro de los márgenes previamente establecidos para peces de estas características (~250 km), sin embargo el sistema muestra rasgos dinámicos mayormente retentivos. Las matrices de conectividad que evalúan la relación "fuente-sumidero" identificaron los siguientes aspectos: i) el extremo norte del área de desove (norte de 19°S) está mayormente conectado con el sector costero y la zona oceánica adyacente de Perú, producto de un mayor transporte norte y noreste; ii) la región de desove ubicada entre 19° y 24°S funciona como una zona de retención y conecta con el extremo norte del área de desove, convirtiéndose en la región que sustenta el reclutamiento larval en el área de estudio; iii) la zona de desove del norte de Chile (Arica-Antofagasta) no presenta conectividad, vía transporte de huevos y larvas, con las regiones ubicadas inmediatamente al sur de los 26°S y al aporte de individuos pre-reclutas a esta región sería excepcional.

Uno de los principales objetivos de este proyecto es la generación de indicadores asociados al reclutamiento, en este contexto se concluye que la manifestación espacial del índice de sobrevivencia muestra un área de pre-reclutamiento continuo entre la zona centro-sur de Perú y el norte de Chile; y una dinámica meridional altamente variable y asociada a procesos oceanográficos regionales. Se propone un nuevo índice relacionado con el pre-reclutamiento que asocia la magnitud del desove con la sobrevivencia de estadíos tempranos hasta los 60 días de edad. Este índice es independiente de las estimaciones de reclutamiento obtenidas desde cruceros acústicos y de aquellas obtenidas por el modelo estadístico de evaluación de stock. El índice de (pre) reclutamiento biofísico mostró correspondencia respecto a índices de reclutamiento provenientes de modelos estadísticos edad-estructurados (MEE), principalmente para el periodo 2003-2017 ($R^2=0,601$). Asumiendo a los MEE como referencia del reclutamiento conocido, el esquema que integra el desove más la sobrevivencia de estadíos tempranos (hasta 60 días de edad) explica un importante porcentaje de la variabilidad del reclutamiento.

EXECUTIVE SUMMARY

The Final report shows the results of the project FIPA 2016-55 "Population dynamics of the anchovy between XV and II regions through biophysical modeling, 2016". The main focuses of this report are the implementation of a high resolution hydrodynamic model for the circumscribed region of northern Chile and southern Peru, the presentation of a physical-biological coupling scheme to model the early life history of the anchoveta, the establishment of initial biological sub-sections for modeling, the description of oceanographic aspects associated with the spawning and recruitment area of the anchoveta and the description of information associated with recruitment from a statistical model of population dynamics that was used as a contrast to the results of biophysical modeling.

The hydrodynamic modeling process presented complications associated with limitations in the detection of atmospheric variables by mainly orographic effects. In this project, the implementation of improvements in atmospheric forcing (winds and heat fluxes) made it possible to correct these complexities and obtain a regional model (ROMS) with a higher level of precision. The three-dimensional horizontal resolution ROMS (~3 km) showed a satisfactory performance reproducing the most important oceanographic features of the study area and its spatial and temporal variability (seasonal and interannual), as well as reproducing the influence of extreme equatorial events such as El Niño. These results provided an accurate hydrodynamic model to be used in biophysical modeling.

The main findings associated with the oceanographic dynamics of the study area were: i) the coastal zone between XV and II Regions was characterized by less wind stress and Ekman transport in relation to the areas immediately north and south; ii) the predominant wind is northerly throughout the year; iii) the net surface transport (0-30 m) is northward with a gradient of current velocities that increase towards the deep ocean; iv) the band between 17-24°S was distinguished from the adjacent regions (southern Peru and south of 25 ° S) showing warmer surface waters, lower coastal ventilation, lower concentrations of chlorophyll, and lower surface dynamics (Ekman velocities, geostrophic velocities, and Eddy Kinetic Energy); v) the study region shows a geostrophic circulation dominated by

meanders and stationary eddies throughout the year, as well as the presence of coastal thermal fronts.

In addition, the results related to the biophysical modeling (1995-2016) that included the simulation of the spawning and transport of eggs, larvae and juveniles of anchoveta from the spawning areas to all the possible nursery grounds are presented. This model identified that the spawning area of the anchoveta shows greater activity and recurrence in three spatial foci: i) to the south of Arica around 18°20'S, ii) to the south of Iquique between 20° and 22° S being the one of greater abundance and extension, and; iii) the coastal area adjacent to Antofagasta between 23° and 24°S. In general, the spawning area is characterized by a pattern of low velocity surface circulation resulting from low local wind stress, which is accentuated during the spawning season (early winter-spring). After 2006, in 60% of the years the centre of gravity of spawning was registered north of 21° S, while before 2006 only 10% of the years showed this trait. On the other hand, the anchoveta spawning season shows maximum activity in August and September. However, there is interannual variability in the timing of spawning (start, maximum and end). This demographic aspect can cause (dis)coupling with the appropriate conditions for retention and reproductive success.

According to the biophysical modeling, the dispersion obtained for anchoveta is within the range previously established for fish of these characteristics (~250 km), however the oceanographic system shows dynamic features mostly retentive. The connectivity matrices that evaluate the "source-sink" relationship identified the following aspects: i) the northern edge of the spawning area (north of 19°S) is mostly connected to coastal Peru and its adjacent oceanic zone, as product of a net northward transport; ii) the spawning region located between 19 ° and 24 ° S works as a retention zone and connects with the northern edge of the spawning area, becoming the region that sustains the larval recruitment in the study area; iii) the spawning area of northern Chile (Arica-Antofagasta) has no connectivity, via egg and larval transport, with the regions immediately south of 26°S and the contribution of pre-recruits to this region would be exceptional.

One of the main objectives of this project is the generation of indicators associated with anchoveta recruitment dynamics. In this context, it is concluded that the spatial component of the survival index suggests a continuous pre-recruitment area between central-southern Peru and northern Chile, and highly variable latitudinal dynamics associated with regional oceanographic processes. We propose a new index related to pre-recruitment that associates the magnitude of spawning with the survival of early stages up to 60 days of age. This index is independent of the recruitment estimates obtained from acoustic cruises and those obtained by the statistical model of stock assessment. The biophysical (pre) recruitment index showed correspondence with respect to recruitment indices from age-structured statistical models (ASSM), mainly for the period 2003-2017 ($R^2=0.601$). Assuming the ASSM as a reference of known recruitment, the scheme that integrates spawning plus the survival of early stages (up to 60 days of age) explains an important percentage of the variability of recruitment.

2.- DESCRIPCION DE ACTIVIDADES DEL EQUIPO DE TRABAJO

A continuación se define la composición del equipo de trabajo y sus principales funciones durante la ejecución del proyecto.

Personal profesional	Título académico	Función
Sebastián Vásquez P.	Magíster en Pesquerías	Jefe Proyecto, coordinación general del proyecto. Reuniones consultivas con FIPA. Desarrollo e implementación del modelo biofísico para anchoveta. Validación del modelo hidrodinámico. Asistencia logística en todos los talleres. Confección de informes. Redacción de publicación.
Aquiles Sepúlveda O.	PhD Oceanography	Discusión del modelo conceptual de la historia de anchoveta en Chile norte. Inclusión de resultados provenientes de la modelación biofísica en el ordenamiento pesquero nacional. Modelo conceptual de la historia de vida de anchoveta.
Cristian Salas D.	Dr. en Ciencias Físicas	Encargado de modelación hidrodinámica. Análisis de los forzantes físicos asociados al proceso de transporte y conectividad de la población de anchoveta. Descripción, análisis y validación del modelo hidrodinámico. Corridas de modelos y la generación de las variables de salidas. Presentación en talleres. Confección de Informes
Sergio Núñez E.	Magíster en Oceanografía	Oceanografía física e identificación de forzantes para el transporte y conectividad de la población de anchoveta. Coordinación logística del grupo de trabajo asociado al objetivo específico 4. Presentación en talleres. Confección de Informes.

Claudio Gatica M.	Magíster en Pesquerías	Descripción de modelos de evaluación de stock y discusión de la interacción con modelos biofísicos. Revisión bibliográfica. Elaboración de un modelo conceptual que incluya resultados provenientes de la modelación biofísica en el ordenamiento pesquero. Modelo conceptual de la historia de vida de anchoveta. Elaboración de informes. Presentación en talleres.
Marcos Arteaga V	Magíster en Pesquerías	Revisión de modelos de evaluación de stock y discusión de la interacción con modelos biofísicos. Participación en la elaboración del modelo conceptual de la historia de vida de anchoveta en la zona norte de Chile. Generación de indicadores de reclutamiento basado en capturas. Elaboración de informes.
Lilian Cisterna A.	Magíster en Pesquerías	Establecimiento de modelos de crecimiento para alimentar el modulo de crecimiento del modelo biofísico. Elaboración de informes
Nicolás Alegría L.	Biólogo Marino	Análisis de la estructura espacial del desove y distribución de reclutas de anchoveta. Generación de índices espaciales de reclutamiento basado en información acústica. Elaboración de informes.
Patric Contreras	Técnico en Administración de redes y soporte computacional	Implementación, mantención y funcionamiento de las unidades computacionales necesarias para cumplir los distintos objetivos del proyecto asociados a la modelación hidrodinámica y modelación biofísica

A continuación se define la composición del equipo de trabajo y sus principales funciones durante la ejecución del proyecto. Universidad Arturo Prat.

Personal profesional	Título académico	Función
Gabriel Claramunt	Magíster en Pesquerías	Coordinador subgrupo UNAP. Dinámica reproductiva de anchoveta. Asociación de la información asociada al método de producción de huevos con la modelación biofísica. Modelo conceptual de la historia de vida de anchoveta. Presentación en talleres. Confección de Informes
Paola Moreno G.	Bióloga Marina	Distribución espacial del desove de anchoveta en el norte de Chile. Crecimiento de larvas de anchoveta en condiciones de laboratorio. Desarrollo y análisis de flotabilidad de huevos de anchoveta.
Miguel Araya	Dr. en Ciencias Aplicadas	Discusión del crecimiento temperatura-dependiente de anchoveta. Discusión respecto al proceso de reclutamiento. Modelo conceptual de la historia de vida de anchoveta. Elaboración de informes.
Lilian Herrera	Dr. en Oceanografía	Análisis de la sincronía reproductiva de anchoveta respecto a cambios ambientales. Discusión y análisis del proceso de reclutamiento de la anchoveta en la zona norte de Chile. Desarrollo del modelo conceptual basado en rasgos biofísicos.
Cristian Azocar	Biólogo Pesquero	Aspectos reproductivos de la anchoveta en el norte de Chile. Estimación de parámetros asociados a la duración de la temporada reproductiva para inicializar el modelo biofísico.

A continuación se define la composición del equipo de trabajo y sus principales funciones durante la ejecución del proyecto. Centro de Investigación Aplicada del Mar.

Personal profesional	Título académico	Función
Juan Braun A.	Licenciado en Biología	Coordinador del subgrupo CIAM. Distribución espacial del desove de anchoveta en el norte de Chile. Modelo conceptual de la historia de vida de anchoveta. Presentación en talleres. Confección de Informes
Jorge Oliva L.	Magíster en Medio Ambiente	Dinámica reproductiva de la anchoveta en el norte de Chile. Obtención y análisis de información asociada a la actividad pesquera. Modelo conceptual de la historia de vida de anchoveta. Presentación en talleres. Confección de Informes

Composición del equipo de trabajo y sus principales funciones durante la ejecución del proyecto. Expertos consultores independientes.

Personal profesional	Título académico	Función
Vincent Echevin	PhD., Climate Sciences	Experto internacional. Asesor en modelación hidrodinámica del pacífico suroriental. Participación en talleres de trabajo y discusión.

Andrés Ospina-Álvarez	PhD. Marine Sciences	Participación como asesor experto especialista en modelación biofísica y en dinámica poblacional. Consultor para el diseño e implementación de ICHTHYOP. Evaluación externa de los resultados del proyecto.
-----------------------	----------------------	---

Luis Soto	Dr. en Oceanografía Física	Participación como experto especialista en modelación hidrodinámica y experto en el modelo ROMS. Análisis descriptivo de la dinámica oceanográfica del área de estudio. Revisión de desempeño de la configuración y validación del modelo
-----------	----------------------------	---

3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo general del proyecto es “Determinar la dinámica del reclutamiento de anchoveta en el norte de Chile, a partir de modelos espacialmente explícitos que integren y conecten procesos ontogenéticos y ambientales”.

Para el cumplimiento del objetivo general, se aborda la problemática con un enfoque multidisciplinario que incluye la modelación hidrodinámica, biofísica y de dinámica poblacional, la oceanografía física y pesquera, ecología larval, evaluación de stock, estadística y análisis espacial que permite abordar la problemática de forma integral en términos de la dinámica del reclutamiento para la población de anchoveta en la zona norte de Chile.

Los objetivos específicos son los siguientes:

3.1. Desarrollar e implementar un sistema de modelación biofísica para la anchoveta del stock compartido Chile-Perú, que acople y conecte modelos biológicos con un modelo hidrodinámico de alta resolución costera para la zona de estudio, validado para la región norte de Chile que integre los forzantes físicos de alta frecuencia (marea, vientos, entrada de agua dulce, etc), en escalas adecuadas que reproduzcan las condiciones oceanográficas de la distribución de anchoveta en la región en el periodo 1994-2016.

3.2. Modelar el proceso de transporte, crecimiento y sobrevivencia de estadios tempranos de anchoveta, y su efecto sobre la variabilidad del reclutamiento, identificando regiones fuente y sumidero de juveniles y reclutas de anchoveta.

3.3. Obtener índices asociados al reclutamiento de la anchoveta, independientes de la estimación acústica, entre la XV y II Regiones, y comparar con índices de reclutamiento provenientes de otras fuentes de información (e.g. modelos estadísticos para la evaluación de stock, indicadores asociados a la pesquería).

3.4. Identificar los principales forzantes biofísicos y oceanográficos-atmosféricos que modulan el proceso de crecimiento, sobrevivencia, transporte de huevos y larvas de anchoveta y finalmente la variabilidad del reclutamiento.

3.5. Identificar patrones de conectividad desde la(s) zona(s) de desove hacia todas las posibles áreas de crianza/reclutamiento, incluyendo el área costera de Chile y Perú.

3.6. Proponer un modelo conceptual de la historia de vida de la anchoveta entre la XV y II Regiones, dando énfasis a procesos biofísicos relevantes en la historia temprana de la especie.

4.- ANTECEDENTES

4.1. Antecedentes biológicos y pesqueros de la anchoveta en la zona norte de Chile

El desembarque de recursos pesqueros en Chile está sustentado principalmente por las especies pelágicas, de éstas han dominado históricamente (en cuanto a niveles de desembarque) el jurel *Trachurus murphyi*, el cual en la década de los años 90 reportó más de cuatro millones de toneladas (Arcos *et al.*, 2001). Secundariamente, la explotación de pequeños pelágicos constituidos por la sardina común *Strangomera bentincki* y la anchoveta *Engraulis ringens* han redituado importantes niveles de desembarque para el país. En el norte de Chile, la anchoveta constituye un stock transfronterizo, compartido con el sur del Perú, donde sustenta una de las pesquerías más importantes a nivel global, y constituye una unidad de stock que se distribuye entre los 16°LS (Perú) y 24°LS (Chile) (Serra, 1983; Chirichigno & Vélez, 1998). Este recurso sustenta la pesquería pelágica más importante de la zona norte de Chile, entre la XV y II regiones, siendo capturada principalmente por la flota cerquera que ha reportado capturas promedio en torno a las 800 mil toneladas anuales desde el año 2004, representando una actividad socio-económica clave para la región.

Los niveles de desembarques de la anchoveta en Chile han mostrado fuertes variaciones en la historia de la pesquería. En este contexto, las capturas se incrementaron desde 609 mil toneladas en 1990 hasta un máximo histórico de 2 millones 276 mil toneladas en 1995, desde cuando se observó un decaimiento sostenido hasta un mínimo de 145 mil toneladas en 1998. Desde 1999 a 2006 se observó alta variabilidad en las capturas en torno a las 922 mil toneladas. En los últimos años, las capturas mostraron una disminución entre 2009 y 2010 con un déficit en torno al 50% respecto al promedio histórico del periodo 1984-2012 de 800 mil toneladas. Esta situación también se registró en la pesquería del sur de Perú donde en particular el año 2010 se observó una disminución de la capturas de más de un 50% bajo el promedio 1984-2012 de 560 mil toneladas. No obstante los desembarques de ambos países evidenciaron un incremento relativo el año 2011, durante el 2012, 2013 y 2014 las capturas se situaron levemente por sobre de las 700 mil toneladas para decaer a 456 mil en el año 2015.

De acuerdo con Serra (1978) y Serra *et al.* (1979), la anchoveta presenta un amplio rango distribucional desde el norte de Perú hasta el sur de Chile (Serra, 1983). En la zona norte de Chile esta especie se distribuye en zonas cercanas a la costa, llegando ocasionalmente en los inviernos hasta las 60 millas náuticas (Castillo *et al.*, 1993; Braun *et al.*, 1994), asociándose a la zona de mayor productividad biológica, la cual es generalmente alta por eventos de surgencia, principalmente entre los meses de septiembre a marzo. Durante el verano esta especie incrementa su presencia y densidad en áreas costeras concentrándose las mayores densidades principalmente en una franja que llega hasta las 3 mn de la costa, situación que se vincula a la influencia de intensos gradientes térmicos y salinos que se producen en zonas cercanas a la costa (Castillo *et al.*, 1996; Córdova *et al.* 1995; Castillo *et al.*, 2000). De forma contraria, cuando los gradientes frontales térmicos y salinos se relajan debido al enfriamiento de la zona, aumentan los límites occidentales de la distribución. Además, cabe señalar que forma cardúmenes relativamente densos con un ciclo diario marcado y caracterizado por una alto nivel de agregación durante el día y dispersión en la noche con agregaciones superficiales menos densas (Castillo *et al.*, 2001).

La anchoveta se caracteriza por presentar un ciclo de vida corto, con cinco años de longevidad (Cubillos *et al.*, 2001), rápido crecimiento (Cubillos & Arancibia. 1993, Cubillos *et al.* 2001), una alta tasa de mortalidad natural (Cubillos *et al.*, 1999) y por estar marcadamente influenciada por factores ambientales en todas las etapas de su ciclo vital (Yáñez *et al.* 1990, 1992; Cubillos & Arcos, 2002; Arcos *et al.*, 2004; Gómez, 2008; Cubillos *et al.*, 1999; Castillo-Jordán *et al.* 2010). En este contexto, por su ubicación geográfica la zona norte está altamente influenciada por la dinámica ecuatorial y procesos atmosféricos - oceanográficos tipo El Niño - La Niña, además de procesos de oscilación decadal y ondas atrapadas a la costa. En esta zona ocurren procesos de surgencia y están presentes estructuras oceanográficas como giros de mesoescala (Hormazábal *et al.*, 2004), es así como esta dinámica oceanográfica, influencia de manera importante la distribución espacial de los recursos y su abundancia a través de la modulación del reclutamiento y la historia de vida temprana (García, 1993). Por otro lado, y paralelamente al ciclo anual, fluctuaciones en *timing*, duración o intensidad de la surgencia, como también la presencia

de giros de mesoescala, podrían afectar la distribución y el transporte de huevos, larvas y juveniles de anchoveta (Bakun, 2006).

Desde el punto de vista reproductivo, esta especie es considerada como desovante parcial activa durante todo el año, con desoves fraccionados y mayor actividad reproductiva entre julio y septiembre (Castillo *et al.*, 2000). Sin embargo, el proceso reproductivo presenta variabilidad en cuanto a su inicio y duración, lo que además implica un cambio en la asociación con las condiciones del hábitat (Böhm *et al.*, 2011). El reclutamiento se observa en forma masiva entre noviembre y marzo, en un rango de tallas entre 6 y 12 cm de longitud total, siendo calificados como pre-reclutas aquellos individuos con tallas menores a los 6 cm y como reclutados aquellos con una longitud superior a los 12 cm (Fisher, 1958; Einarsson & Rojas de Mendiola, 1963; Martínez *et al.*, 2007).

Las capturas de anchoveta son variables y altamente dependientes de los pulsos de reclutamiento anual y está caracterizado por peces de menos de un semestre de edad (Castillo *et al.*, 2012). La administración pesquera ha establecido vedas para asegurar la viabilidad de nuevos contingentes de adultos jóvenes al stock en el período de reclutamiento principal, las cuales operan en el periodo estival y se han extendido de manera adaptativa dependiendo de la presencia y recurrencia de ejemplares juveniles en las capturas (SUBPESCA, 2016). La evaluación directa del reclutamiento de anchoveta en la región norte de Chile se ha realizado desde 1996 mediante métodos hidroacústicos por medio de dos cruceros llevados a cabo entre los meses de noviembre y febrero dependiendo del año (Canales *et al.*, 2013), en tanto que la evaluación de la biomasa desovante se ha llevado a cabo desde el año 1992 por medio de la aplicación del método de producción diaria de huevos (Reyes *et al.*, 2014), que incorpora la dinámica reproductiva y la producción de huevos. A través de este tipo de proyectos se ha obtenido información valiosa acerca de la distribución espacial de diferentes estadios de desarrollo de anchoveta para la región norte Chile, así como la cuantificación de la abundancia, y la caracterización espacial del desove y del reclutamiento.

A partir de las evaluaciones acústicas realizadas para este recurso, Castillo *et al.* (2012) entregan evidencias de una estratificación espacio-temporal en el proceso de reclutamiento asociado a la variabilidad estacional del proceso reproductivo, sugiriendo diferencias latitudinales en el ingreso de reclutas, iniciándose éste en Arica durante noviembre para finalizar hacia fines de febrero en Mejillones. Sin embargo, hasta la fecha no existen estudios que relacionen mecanísticamente la distribución espacio-temporal del desove con el proceso de reclutamiento de la especie en la zona norte de Chile.

4.2. Principales procesos oceanográficos asociados a la zona norte de Chile y sur de Perú

La variabilidad ambiental física en latitudes intermedias del Pacífico suroriental puede ser explicada principalmente por las fluctuaciones intra-anales asociadas a la estacionalidad del proceso de surgencia costera (Strub *et al.*, 1998; Leth & Shaffer 2001, Rutllant *et al.*, 2004), y la variabilidad interanual relacionada con la alternancia de eventos climático-oceanográficos cálidos-fríos (El Niño/La Niña) (Enfield, 1989; Glantz, 1996; McPhaden, 2001; Shaffer *et al.*, 1999; Hormazábal *et al.*, 2001; Escribano *et al.*, 2004), incluyendo ondas Kelvin ecuatoriales, ondas atrapadas a la costa y ondas de Rossby (Strub *et al.*, 1998; Fuenzalida *et al.*, 2008).

El océano costero del norte de Chile forma parte del Sistema de la Corriente de Humboldt. El dominio de la surgencia costera en el Sistema de la Corriente de Humboldt no es uniforme, evidenciando tres sub-sistemas de surgencia bien definidos: a) un sistema muy productivo de surgencias estacionales en el centro-sur de Chile, b) un sistema menos productivo de surgencias semi-permanentes en el norte de Chile y sur del Perú, y c) un sistema altamente productivo durante todo el año de surgencias permanentes en el centro y norte del Perú (Montecinos & Lange 2009).

La región cuenta con surgencias persistentes impulsada por el viento durante la mayor parte del año, con un máximo de surgencia en verano y en invierno más débil surgencia (Strub *et al.*, 1998; Blanco *et al.*, 2001). Las condiciones medias, basado en 30 años de datos, junto

con una descripción de los procesos más importantes y la caracterización de las masas de agua fueron descritos por Blanco *et al.* (2001).

El Sistema de la Corriente de Humboldt se ve fuertemente afectado por la interacción con la dinámica ecuatorial en escalas que van desde las ondas atrapadas a la costa, ondas intra-estacionales, (ondas de Rossby), anuales, escala interanual (El Niño-La Niña), hasta multi-decenal (Oscilación Decadal del Pacífico) (Chávez *et al.* 2003; Montecinos *et al.*, 2007). Por otra parte, se reconoce el efecto de fluctuaciones de baja frecuencia asociadas a El Niño Oscilación del Sur (ENOS) como una de las principales fuentes de variabilidad interanual en la región costera del Pacífico Suroriental, producto del choque y propagación a lo largo de la costa de ondas de Kelvin atrapadas al Ecuador (Maturana *et al.*, 2004). El paso de estas ondas producen una serie de anomalías bio-físicas (climático-oceanográficas) en los sistemas de borde oriental (Rutllant & Fuenzalida, 1991; Pizarro & Montecinos, 2004; Maturana *et al.*, 2004), tales como, el incremento de la temperatura superficial del mar y del nivel del mar en la costa, la intensificación de la corriente sub-superficial hacia el polo, el debilitamiento del anticiclón subtropical, el incremento en el transporte hacia la costa, así como el hundimiento de la termoclina y nutriclina que implica un ascenso de aguas pobres en nutrientes durante la surgencia activa. (Enfield, 1989; Glantz, 1996; Pizarro 1999; McPhaden, 2001).

En general, la costa de Chile septentrional y central (18°S hasta ~40°S) verifica algunas características geográficas que producen mayor heterogeneidad espacial, e influyen en las condiciones oceanográficas de la región. Promontorios y salientes topográficas favorecen la generación de corrientes en chorro, así como el desplazamiento de aguas superficiales mar adentro; así como los sistemas de bahías encontrados a largo de la costa de Chile centro-norte establecen patrones de circulación complejos (Valle-Levinson *et al.*, 2000) que afectan el transporte y la retención de huevos y larvas (Palma *et al.*, 2006). Por el contrario, grandes extensiones que configuran una línea de costa expuesta, sin cabos o bahías, como por ejemplo en el norte de Chile (entre 20-22°S), favorecen las corrientes a lo largo de la costa y verifican condiciones relativamente homogéneas y el transporte hacia latitudes menores (Palma *et al.*, 2006).

Entre los 5°S y los ~ 35°S, los vientos medios mensuales favorecen a la surgencia durante todo el año, y son más débiles a lo largo de la costa del norte de Chile ~ 17-23°S (Shaffer *et al.*, 1999; Thomas *et al.*, 2001a). Diferencias de fases distintas en los máximos anuales se evidencian en función de la latitud (Thomas *et al.*, 2001b), donde el máximo de surgencia cambia del otoño-invierno frente al centro-norte del Perú (Bakun & Nelson 1991), a la primavera-verano frente al norte de Chile (Blanco *et al.*, 2001) y al verano al sur de los ~ 30°S (Shaffer *et al.*, 1999).

La región costera del norte de Chile, específicamente en la curvatura de la línea de costa entre Chile y Perú (15°S a 25°S), se verifica una dinámica oceanográfica dominada por la interacción entre la surgencia costera casi permanente y la influencia ecuatorial, donde la variabilidad interanual ha sido asociada mayormente con fenómenos de origen ecuatorial, mientras la variabilidad estacional por vientos forzados local y remotamente (Pizarro *et al.*, 1994; Huyer *et al.*, 1987; Pizarro, 1999; Soto-Mardones *et al.*, 2004). La surgencia genera una banda costera de aguas frías (~20-60 Km), donde las Aguas subantárticas y Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales ascienden hacia la superficie levantando la pincoclina y alejando las aguas subtropicales de la costa. Esta dinámica tiene una variabilidad estacional de mucho menor intensidad que en el centro-sur de Chile debido a la menor variabilidad de los vientos a lo largo de la costa (Letelier *et al.*, 2009). Estos patrones de variabilidad son modificados por la influencia ecuatorial de baja frecuencia que alteran el patrón de circulación a lo largo de la costa (Pizarro *et al.*, 1999), las corrientes costeras y la surgencia (Strub *et al.*, 1995).

La presencia del codo de Arica genera una situación local muy poco estudiada, donde se observa una menor intensidad de las corrientes y acumulación de aguas cálidas (Soto-Mardones *et al.*, 2004; Letelier *et al.*, 2010). En esta región particular, las fluctuaciones ecuatoriales se intensifican durante periodos cálidos (El Niño), cuando el frente costero se debilita, las aguas surgentes son más superficiales y las aguas subtropicales penetran hacia la costa y hacia el sur, cambiando las condiciones hidrográficas de toda la zona norte del país (Hill *et al.*, 1998; Hormazábal *et al.*, 2001; Letelier *et al.*, 2010; Letelier 2010). En este contexto, Soto-Mardones *et al.* (2004) muestran en la escala estacional una importante

alteración de las anomalías cálidas y frías en la costa por efectos locales del transporte de Ekman, y cuyo enfriamiento está fuera de fase con otros forzantes en la escala interanual (e.g., radiación, ondas Kelvin), en tanto que Del Pino (2009) ha mostrado el debilitamiento del esfuerzo del viento meridional en la zona de la curvatura, revelando que los vientos costeros disminuyen a medida que se acercan al codo de Arica (15°-25°S), exhibiendo un comportamiento no estacional y una correlación en fase opuesta entre la TSM y el esfuerzo del viento meridional, indicando que en esta región la TSM deja de ser ventilada por el esfuerzo del viento meridional, fenómeno que ocurre solo en la zona de la curvatura y se debe principalmente al rol que juega la línea de costa.

En esta región, el flujo principal de la corriente de Humboldt se desvía hacia la alta mar en el sur del Perú, y una rama costera más débil fluye hacia el Ecuador (Chaigneau & Pizarro 2005b). En el sur de Perú, el viraje de la rama principal de la corriente de Humboldt hacia la alta mar, permite ventilar el sistema y constituye el principal impulsor de una intensa zona de mínima de oxígeno, a la que contribuye además el hundimiento y remineralización de la materia orgánica proveniente de los estratos superficiales. Frente a Perú y el norte de Chile, las condiciones de oxígeno disuelto (<0,5 mL L⁻¹) determinan la naturaleza del proceso de desnitrificación (aeróbico o anaeróbico).

4.3. La población de anchoveta del norte de Chile y sur de Perú como objeto de estudio mediante modelación biofísica

Los procesos climático-oceanográficos que operan en las escalas intra-anual (estacional) e interanual y que modulan la variabilidad oceanográfica de la región costera del sistema de surgencia del norte de Chile, tienen efecto sobre diferentes procesos en la historia de vida de peces pelágicos pequeños en esta región (Martínez *et al.*, 1995; Yáñez *et al.*, 1995; Yáñez *et al.*, 2001; Yáñez *et al.*, 2005, Böhm *et al.*, 2012).

Estudios previos han sugerido el acoplamiento del período de desove durante el término del invierno e inicios de primavera con la alternancia entre convergencias/divergencias en la región norte Chile, que permite aminorar las pérdidas larvales por el transporte mar afuera, y establecer un enriquecimiento primaveral que posibilite a juveniles crecer a altas tasas y

reclutar a la pesquería al término del verano (Castillo *et al.*, 2000; Swartzman *et al.*, 1994). Por otra parte, se ha establecido que los juveniles de anchoveta se distribuyen preferentemente entre la costa y el borde interno de los frentes costeros, asociados a altos rangos de clorofila (Castillo *et al.*, 1997 y 1998; Gómez *et al.*, 2012) sugiriendo una relación entre la distribución espacial de los reclutas y los centros de surgencia, lo que también ha sido registrado para la anchoveta en la zona centro-sur de Chile (Cubillos *et al.*, 2013).

Si bien se han establecido esfuerzos por entender las fluctuaciones de variables climático-oceanográficas y biológicas que impactan en el reclutamiento de pelágicos pequeños como anchoveta en la región norte de Chile, la mayoría de estos estudios no han abordado de manera consistente las escalas en que las posibles variables operan, así como tampoco de que manera afectan a la historia de vida de esta población. Así mismo, estos estudios no han permitido generar un esquema de estudio que incorpore la variabilidad ambiental de forma mecanística hacia el entendimiento de la dinámica del reclutamiento. Por otra parte, al ser la anchoveta un stock que excede espacialmente los límites nacionales, existe una discusión abierta sobre la conectividad existente entre el desove de la anchoveta en el norte de Chile y el reclutamiento tanto en esta zona como en aguas territoriales de Perú. En este contexto, el transporte de huevos y larvas desde el área de desove hacia las zonas de crianza constituyen un factor crítico que afecta la sobrevivencia larval y el subsecuente reclutamiento en peces pelágicos y modula la conectividad entre áreas de desoves y las probables áreas de crianza y reclutamiento (Hare & Cowen, 1993; Nakata *et al.*, 2000). En Chile, estudios recientes basados en modelación biofísica han contribuido a entender patrones de transporte y distribución de estadios tempranos de anchoveta, sardina común y jurel en la zona centro-sur de Chile a través de la incorporación explícita de la variabilidad ambiental en el esquema de modelación (Parada *et al.*, 2012; Soto-Mendoza *et al.*, 2012; Vásquez, 2012; Vásquez *et al.*, 2016). En estas contribuciones se ha entendido la modelación biofísica como el acoplamiento de un modelo hidrodinámico que simula los principales rasgos oceanográficos del sistema estudiado con un modelo basado en el individuo que incorpora información de la dinámica reproductiva y el comportamiento de estadios tempranos de desarrollo. Estas aproximaciones son altamente informativas para

entender la conectividad entre zonas de desove y crianza/pre-reclutamiento, información que puede ser utilizada para explorar medidas de manejo que apoyen de manera eficiente a la administración de estos recursos en Chile, así como también abren la posibilidad de nuevas hipótesis para explicar la relevancia de zonas de crianza y acerca de la estructura de los stocks pesqueros.

En este contexto, en el presente proyecto se pretende implementar un sistema de modelación biofísica para anchoveta en el norte de Chile, de manera de poder entender la dinámica espacial y temporal del reclutamiento de forma independiente a la pesquería incorporando de manera explícita el efecto de señales ambientales y su variabilidad espacio-temporal.

5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La implementación de un modelo biofísico espacialmente explícito que permita el estudio de la dinámica del reclutamiento y probar hipótesis relacionadas con la historia de vida de la anchoveta requiere de la implementación de un sistema de modelación complejo (**Figura 1**). Un sistema biofísico comprende un modelo hidrodinámico (que debe ser validado) que se acopla a un modelo biológico que necesariamente debe contener información realista y continua asociada a la población de anchoveta. Este modelo acoplado permite conocer la historia de vida de cada uno de los individuos modelados (desde huevo a juvenil) y en conjunto generar índices vinculados al reclutamiento a nivel poblacional. Posteriormente, estas estimaciones serán contrastadas con otras piezas de información asociadas al reclutamiento (e.g. estimaciones desde modelos de dinámica edad estructurados, mediciones acústicas, proporción de juveniles presentes en la captura, etc.) y en conjunto permitirán generar lineamientos hacia el sistema de administración pesquera. Las herramientas computacionales que se utilizaron en la modelación se enumeran en la Tabla I.

Tabla I. Herramientas utilizadas en el proceso de modelación biofísica para la obtención de índices de reclutamiento.

Herramienta	Función	Sitio web	Referencia
ROMS agrif	Modelación hidrodinámica	http://romsagrif.org	Penven <i>et al.</i> , 2006; Shchepetkin & McWilliams, 2005
PISCES	Modelación biogeoquímica	http://www.geosci-model-dev.net/8/2465/2015/gmd-8-2465-2015.pdf	Aumont <i>et al.</i> , 2003, 2006.
Ichthyop	Modelación biofísica	http://www.ichthyop.org	Lett <i>et al.</i> , 2008
AD Model Builder	Modelación no lineal para estimación de parámetros en modelos de dinámica poblacional y evaluación de stock	http://admb-project.org	Fournier <i>et al.</i> , 2012
R	Lenguaje y ambiente de programación que será utilizado en el análisis estadístico de los resultados de la modelación	http://www.r-project.org	Dalgaard, 2008
Matlab	Lenguaje y ambiente de programación que será utilizado en el análisis estadístico de los resultados de la modelación y en la graficación de resultados biofísicos y oceanográficos	http://www.mathworks.com	Moler, 1984

El trabajo ha sido organizado en función de un equipo de trabajo conformado por 3 grupos de trabajo: modelación hidrodinámica, modelación biofísica y forzantes físicos, oceanográficos y climáticos; y dinámica poblacional. Este trabajo ha sido apoyado por expertos internacionales de vasta experiencia, los que han contribuido de manera significativa en diferentes etapas de la investigación para el logro de los objetivos. Todos los grupos, en conjunto, han definido las hipótesis a probar respecto al modelo conceptual de la población de anchoveta y han generado un análisis comprensivo final hacia la dinámica del reclutamiento de esta especie en el norte de Chile con énfasis en la conectividad poblacional asociada a la discusión del stock compartido entre Chile y Perú.

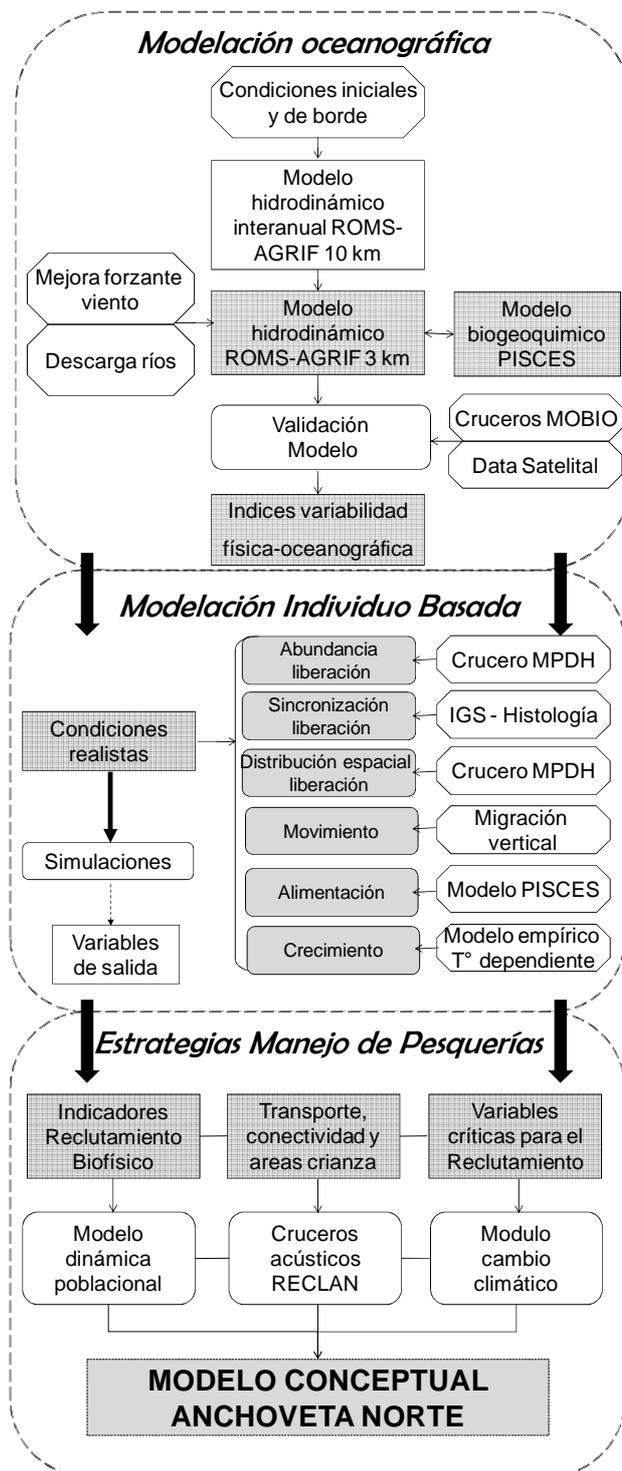


Figura 1. Esquema de trabajo para el estudio de la historia de vida temprana de anchoveta orientado a la dinámica del reclutamiento en la zona norte de Chile bajo un enfoque de modelación biofísica.

5.1. Modelo Hidrodinámico

El desarrollo e implementación de un sistema de modelación biofísica, metodológicamente, comprende el acoplamiento de un modelo hidrodinámico de la región de interés y un modelo biológico que represente la historia de vida de anchoveta en la zona norte de Chile. A continuación, se describe el modelo hidrodinámico que se utilizó en el presente proyecto.

5.1.1. Configuración del modelo hidrodinámico ROMS

El modelo hidrodinámico utilizado en la modelación biofísica constituye un componente esencial, pues las condiciones que experimentan los individuos modelados en cada paso de tiempo (ubicación espacial, condiciones físicas del ambiente, etc.) son producto de la interacción del comportamiento individual (movimiento, natación) con el modelo hidrodinámico que simula el ambiente oceánico donde habita, en este caso, la anchoveta. En consecuencia es altamente necesario contar con un modelo validado que represente los principales rasgos del sistema oceanográfico donde se desarrolla la población de anchoveta. En el presente estudio se ha utilizado el modelo regional ROMS (Regional Ocean Model System), cuyos detalles del modelo son descritos en Shchepetkin & McWilliams (2003) y Shchepetkin & McWilliams (2005). Específicamente se utilizó la versión ROMS_AGRIF v3.0 desarrollada por el IRD en Francia (www.romsagrif.org) e implementado por expertos nacionales en el marco de el presente proyecto para el Pacífico suroriental con énfasis en la zona costera del norte de Chile, el cual ha sido validado por medio de diversas aplicaciones metodológicas. El modelo ROMS resuelve las ecuaciones primitivas de la hidrodinámica numéricamente, almacenando la información de las variables requeridas, para cada paso de tiempo y durante todo el periodo que se desea modelar. El algoritmo ROMS estuvo paralelizado, lo que permitió correrlo en varios procesadores por medio de su memoria compartida o memoria distribuida y así optimizar el tiempo computacional utilizado. El modelo ROMS ha sido ampliamente utilizado por la comunidad científica para realizar estudios de circulación del océano. El modelo resuelve la circulación asociada al hábitat de los lugares de desove y desarrollo temprano de la anchoveta utilizado un modelo regionalizado. La modelación mediante ROMS tuvo varias etapas en su desarrollo, destacando en este proyecto el mejoramiento de los forzantes atmosféricos y la realización de un anidamiento off-line de dominios mediante el método roms2roms (Mason *et al.*,

2010), el cual permitió obtener a partir de un dominio amplio (llamado dominio padre), un dominio acotado de mayor resolución espacial (llamado dominio hijo). A continuación se presentan las configuraciones del modelo hidrodinámico dominio padre (MH padre) y el modelo hidrodinámico dominio hijo (MH hijo).

5.1.2. Configuración del MH padre

La primera etapa dentro de la modelación hidrodinámica correspondió a la configuración del dominio padre. Se creó la grilla y máscara de la zona a modelar (tamaño de las celdas de la grilla), se incorporó la batimetría del fondo marino, los forzantes atmosféricos (esfuerzo del viento) y superficiales (e.g. flujo y transporte superficial del calor, flujo de agua dulce), y por último las condiciones iniciales y las condiciones de bordes laterales, tales como temperatura, salinidad, corrientes y elevación de la superficie del mar. Esta modelación desarrollada mediante ROMS fue del tipo interanual, abarcando más de 2 décadas (1993-2016) que corresponden al periodo con disponibilidad de forzantes, condiciones de borde e iniciales ininterrumpidas provenientes de un mismo producto.

La grilla de modelación hidrodinámica base utilizada para este estudio involucró un amplio dominio espacial, generado estratégicamente para contar un modelo hidrodinámico padre con una gran fuente de información y con una descripción global de los procesos de circulación oceanográfica. El dominio padre, de 10 km de resolución espacial, comprendió desde los 10°N hasta los 50°S y desde los 68°W hasta los 132°W (**Figura 2**). Este dominio tiene 374 x 211 puntos de grilla. La configuración del MH padre comprende 32 niveles verticales, niveles que se distribuyen de manera más densa en la superficie. Cabe destacar que el procesamiento de los archivos de entrada se realizó mediante la herramienta MATLAB ROMSTOOLS (Penven *et al.*, 2006).

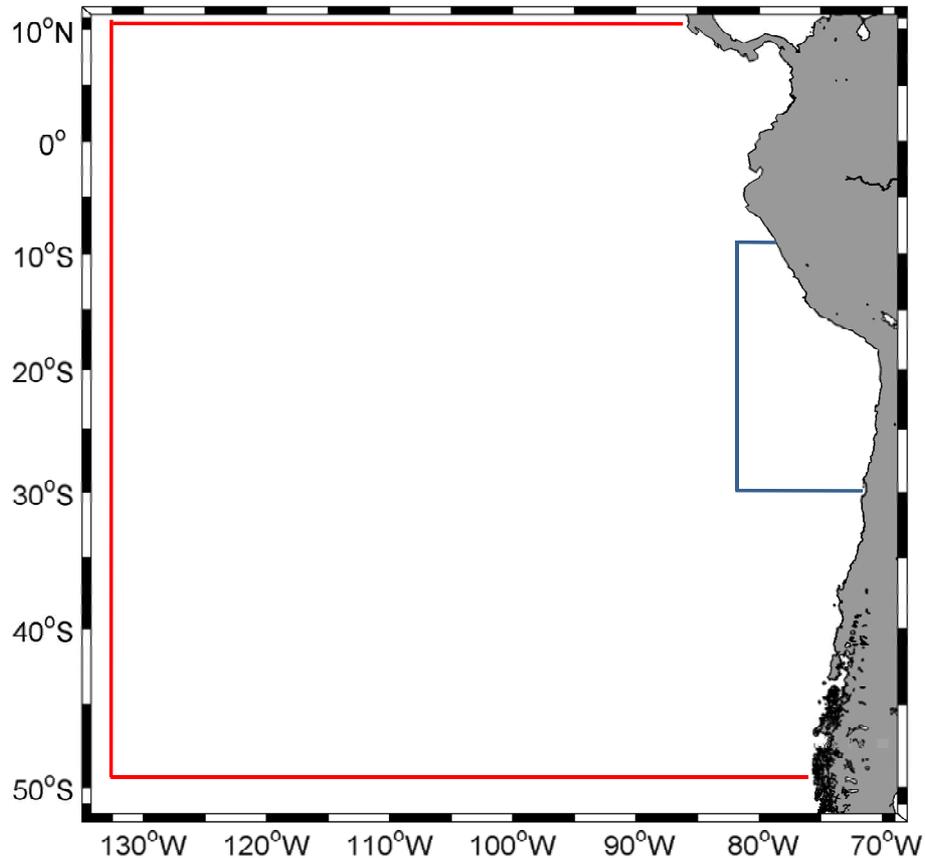


Figura 2. Dominios de modelos hidrodinámicos generados. Recuadro color rojo representa el dominio padre del modelo ROMS con resolución espacial de 10 km, el recuadro azul corresponde al dominio hijo con resolución espacial de ~3 km, el cual es utilizado para el acoplamiento biofísico.

Las condiciones iniciales y de borde que utilizó el MH padre correspondieron al producto global ECCO Kalman Filter (kf080), que consiste de un sistema de asimilación de datos oceánicos global, ECCO está basado en el modelo de circulación general del MIT (MITgcm). Este modelo global incorpora datos altimétricos, tales como altura superficial del mar del modelo TOPEX/Poseidon y altimetría del modelo ERS-1/2. Además, ECCO utiliza forzantes hidrográficos obtenidos de diferentes métodos observacionales, tales como datos CTD de temperatura y salinidad provenientes de secciones del proyecto The World Ocean Circulation Experiment (WOCE), Batitermógrafos reemplazables (XBT) para perfiles verticales de temperatura, temperatura superficial del océano y salinidad superficial del océano del análisis de Reynolds (Reynolds, 1988), boyas ARGO para temperatura y

salinidad, campos de temperatura y salinidad de Levitus. La resolución temporal de estos datos es de 10 días, la resolución espacial es de 1° con 46 niveles de resolución vertical.

Por otro lado, los forzantes atmosféricos utilizados por MH padre provinieron del producto NCEP2, el cual utiliza un sistema de análisis/pronóstico para realizar asimilación de datos usando datos del pasado a partir de 1979 hasta el año 2016. Estos datos fueron proporcionados por el PSD (Physical Sciences Division) NOAA/OAR/ESRL, ubicado en Boulder, Colorado, EE.UU. desde su sitio web: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>. Los datos tienen una resolución temporal de 6 horas y resolución espacial de ~1,9°. La información que contiene estos forzantes corresponden a la temperatura a 2 metros de la superficie del mar, el flujo medio de radiación de onda larga ascendente y descendente en la superficie, el flujo medio de radiación solar ascendente y descendente en superficie, la tasa de precipitación en superficie, la humedad específica a 2 metros de la superficie, la temperatura superficial del mar, las componentes del viento perpendicular y paralelas (U y V) a 10 metros de altura. El MH padre no incorporó el forzante marea. La batimetría del fondo marino que se utilizó en este modelo proviene del producto ETOPO2 con una resolución espacial de 4 km.

La simulación de la circulación oceánica en las zonas de surgencia de borde oriental es un desafío debido a la escasez de productos de estrés del viento con una resolución espacial suficientemente alta para simular la dinámica observada de la surgencia en el extremo costero (Colas *et al.*, 2008). Además, diversos estudios han recalcado que los registros de observación satelital son relativamente cortos para productos de viento (menos de 10 años tanto para ERS como para QuikSCAT), los cuales generan cierta limitación a los estudios de simulación de variabilidad de larga escala (e.g. Colas *et al.* 2011; Aguirre *et al.*, 2012). Para acceder a forzantes atmosféricos de una escala temporal larga, son necesarios modelos de re-análisis global o simulaciones climatológicas. Sin embargo su limitada resolución espacial (típicamente ~2-3°) no permite la adecuada representación de procesos dinámicos regionales, como lo es la influencia de la cordillera de Los Andes en la circulación atmosférica, o procesos locales influenciados por interacciones tierra-océano-atmósfera (Cambon *et al.*, 2013). Esta última limitación es particularmente válida para el sector

costero del norte de Chile y sur de Perú, donde por efectos orográficos de la detección de la dinámica del viento se ve limitada para los productos satelitales que sirven de forzantes para el modelo hidrodinámico de circulación.

Para eludir o mejorar esta problemática asociada a la resolución, métodos de *downscaling* pueden ser utilizados para representar características clave en las escalas espaciales y temporales adecuadas. El método de *downscaling* implementado en este proyecto se basó en el trabajo de Goubanova *et al.* (2011) quienes demostraron que mediante esta metodología los productos de re-análisis proporcionan vientos costeros mejorados durante largos períodos de tiempo, este método básicamente consiste en remover los procesos de baja frecuencia del producto NCEP2 y utilizar climatologías de mejor calidad para variables como esfuerzo del viento y flujos de calor. Más recientemente, Cambon *et al.* (2013) usaron este método para analizar hasta que punto dicha mejora resultaba valiosa para las simulaciones regionales oceánicas a largo plazo tipo ROMS, demostrando mejoras significativas en la reproducción de estructuras oceanográficas y sobre procesos de circulación costera. Considerando estas limitaciones para la zona de estudio, donde se sitúa el área de desove de anchoveta en el norte de Chile, en este estudio se ha realizado una mejora del forzante atmosférico viento, esfuerzo del viento y flujos de calor siguiendo los lineamientos propuestos por Cambon *et al.* (2013).

El MH padre se corrió íntegramente en el clúster que posee el Instituto de Investigación Pesquera. El tiempo de modelación, para el dominio padre, por mes fue aproximadamente de 5 horas, por lo tanto para el periodo completo de modelación de este dominio se necesitaron dos meses de modelación continua e ininterrumpida. La configuración del MH padre contempló seleccionar algunas opciones en el archivo `cppdefs.h`, las cuales se presentan a continuación:

- Paralelización: OPENMP.
- Bordes abierto: OBC_WEST, OBC_NORTH, OBC_SOUTH.
- Configuración de la grilla: CURVGRID, SPHERICAL, MASKING.
- Dinámica del modelo: SOLVE3D, UV_COR, UV_ADV.

- Advección de trazadores laterales: TS_HADV_RSUP3.
- Nudging: ZNUDGING, M2NUDGING, M3NUDGING, TNUDGING, FRC_BRY, Z_FRC_BRY, M2_FRC_BRY, M3_FRC_BRY, T_FRC_BRY
- Mezcla vertical: LMD_MIXING, LMD_SKPP, LMD_BKPP, LMD_RIMIX, LMD_CONVEC, LMD_NONLOCAL.
- Ecuaciones de estado: SALINITY, NONLIN_EOS, SPLIT_EOS.
- Forzante superficial: BULK_FLUX, BULK_FAIRALL, BULK_LW, BULK_EP, BULK_SMFLUX.
- Capa esponja: SPONGE, SPONGE_GRID.
- Forzante fondo: ANA_BSFLUX, ANA_BTFLUX.
- Condiciones de borde: OBC_M2FLATHER, OBC_M3ORLANSKI, OBC_TORLANSKI.

Las corridas del MH padre son mensuales, es decir se tiene un archivo de salida para cada mes que contiene la información diaria de las salidas hidrodinámicas.

5.1.3. Downscaling estadístico para el forzante viento

Se realizó un mejoramiento del forzante atmosférico viento y esfuerzo del viento del producto NCEP2, en sus componentes zonal y meridional, el cual proviene de un re-análisis de baja resolución espacial con incertidumbre en la representación de los vientos en la zona costera. El mejoramiento del forzante mediante *downscaling* es un procedimiento serial, que genera una nueva versión del forzante, llamado en adelante NCEP2PLUS, el cual está compuesto por las siguientes etapas metodológicas: i) generación de una climatología del producto NCEP2 mensual sobre el periodo 2000-2010 (periodo de cobertura del producto satelital climatológico SCOW proveniente de QuikSCAT); ii) interpolación de la climatología NECP2 mensual a una escala diaria-horaria (365 días, cada 6 horas, NCEP_clim); iii) cálculo de la diferencia NCEP2-NCEP_clim, para la obtención de una serie temporal de anomalías cada 6 horas de un año (365 días), NCEP_anomalía, luego se interpoló la climatología de QuikSCAT (SCOW) mensual para los 365 días de un año, cada 6 horas, SCOW_clim, obteniendo todos los productos en una misma escala espacio-

temporal; iv) suma del el producto SCOW con las anomalías NCEP2 (SCOW_clim + NCEP2_anomalia), reemplazando el ciclo anual del producto de re-análisis de baja resolución por un ciclo anual proveniente de observaciones satelitales en una escala mayor, y; v) finalmente con estos nuevos forzantes se lanzó el modelo ROMS para realizar análisis comparativos y determinar si el producto NCEP2PLUS tenía un mejor desempeño en la zona costera de norte de Chile y sur de Perú respecto al forzante original NCEP2.

5.1.4. Configuración del MH hijo

El proceso de configuración del modelo hijo se describe en la **Figura 3**. Una vez que se compiló y lanzó el MH padre, se inició la obtención de las respectivas salidas que se utilizaron para la generación del MH hijo. Se realizó la configuración del MH hijo, se creó la grilla y se incorporó la respectiva batimetría heredada de MH padre. Luego, se utilizaron las salidas del MH padre, para generar las condiciones de borde e iniciales que requiere el MH hijo, los forzantes atmosféricos se obtuvieron de una interpolación de los forzantes mejorados (NCEP2PLUS) utilizados por el MH padre. El MH hijo es de tipo interanual, abarcó más de 2 décadas (1993-2016) que corresponden al periodo con disponibilidad de forzantes, condiciones de borde e iniciales ininterrumpidas provenientes de un mismo producto. La resolución temporal de las salidas del MH hijo es diaria, lo cual es suficiente para resolver los fenómenos oceanográficos que modulan la dinámica del transporte de estadios tempranos de la anchoveta.

El MH hijo tiene ~3 km de resolución espacial, y resolución temporal diaria, comprende desde los 8°S hasta los 31°S y desde los 68°W hasta los 82°W (**Figura 2**). El dominio hijo tiene 397 x 742 puntos de grilla. La configuración del MH hijo comprende 32 niveles verticales, niveles que se distribuyen de manera más densa en la superficie. A diferencia del MH padre, el MH hijo incluyó las mareas provenientes del modelo global TPX07, el cual a su vez asimila datos de anomalías del nivel del mar provenientes del modelo TOPEX/Poseidon, estos modelos de marea proporcionan amplitudes complejas de la elevación de la superficie del mar para los 8 armónicos constituyentes primarios (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1), así mismo incorpora los armónicos de periodo largo (Mf, Mm) y

los no lineales (M4, MS4, MN4), estos datos tienen resolución de $1/4^\circ$. El MH hijo utilizó las componentes de marea: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf y Mm.

Como se ha descrito, el MH padre utilizó condiciones de borde e iniciales provenientes del producto ECCO, sin embargo el MH hijo utilizó condiciones de borde e iniciales provenientes del proceso de anidamiento *off-line* ROMS2ROMS explicado anteriormente. Las variables que utilizó el MH hijo para generar las condiciones de borde e iniciales son salinidad, temperatura, velocidad zonal y meridional, velocidad vertical y nivel del mar. Además, el MH hijo incluyó la descarga de agua dulce a través del caudal medio mensual provenientes del río Loa que resulta ser el más importante en términos de caudal dentro del dominio estudiado. Para generar las series temporales de los caudales medios mensuales en la desembocadura de los ríos, se trabajó con datos de la Dirección General de Aguas (DGA) de Chile, sin embargo para el trabajo con brechas en la serie se realizaron estudios mediante técnicas numéricas, estadístico-espectrales y dinámicas (modelos hidrológicos) para reconstruir las series de caudal. El procesamiento de los archivos de entrada, al igual que en MH padre, se realizó mediante la herramienta MATLAB ROMSTOOLS (Penven *et al.*, 2007). En general, esta herramienta permite interpolar espacialmente los forzantes a la grilla del modelo ROMS, suavizar la batimetría y seleccionar las zonas de descarga de ríos.

El tiempo de modelación por mes para el MH hijo fue aproximadamente de 12 horas, lo que involucra un tiempo efectivo de cálculo de 144 días de forma no interrumpida. La configuración del MH hijo contempló seleccionar algunas opciones en el archivo `cppdefs.h`, las cuales se presentan a continuación:

- Paralelización: OPENMP.
- Bordes abierto: OBC_WEST, OBC_NORTH, OBC_SOUTH.
- Mareas: SSH_TIDES, UV_TIDES, TIDERAMP.
- Configuración de la grilla: CURVGRID, SPHERICAL, MASKING.
- Dinámica del modelo: SOLVE3D, UV_COR, UV_ADV.
- Advección de trazadores laterales: TS_HADV_RSUP3.

- Nudging: ZNUDGING, M2NUDGING, M3NUDGING, TNUDGING, FRC_BRY, Z_FRC_BRY, M2_FRC_BRY, M3_FRC_BRY, T_FRC_BRY
- Mezcla vertical: LMD_MIXING, LMD_SKPP, LMD_BKPP, LMD_RIMIX, LMD_CONVEC, LMD_NONLOCAL.
- Ecuaciones de estado: SALINITY, NONLIN_EOS, SPLIT_EOS.
- Forzante superficial: BULK_FLUX, BULK_FAIRALL, BULK_LW, BULK_EP, BULK_SMFLUX.
- Capa esponja: SPONGE, SPONGE_GRID.
- Forzante fondo: ANA_BSFLUX, ANA_BTFLUX.
- Condiciones de borde: OBC_M2FLATHER, OBC_M3ORLANSKI, OBC_TORLANSKI.

Para el proceso anidamiento *off-line*, primero se lanzó el MH padre y a medida que se fueron obteniendo sus salidas se fueron utilizando para generar las condiciones de bordes e iniciales del MH hijo, no fue necesario esperar que terminara de correr el MH padre. Debido a las capacidades de cómputo del Clúster de INPESCA se pudo correr simultáneamente el MH padre e hijo. Los archivos forzantes para el MH hijo (“roms_frc”) tienen un tamaño cada uno de 731 Mb, los forzantes de volumen (“roms_blk”) 3.3 Gb, para el periodo total de modelación se necesitó 1.9 Tb de almacenamiento, disponible en el sistema de almacenamiento de INPESCA.

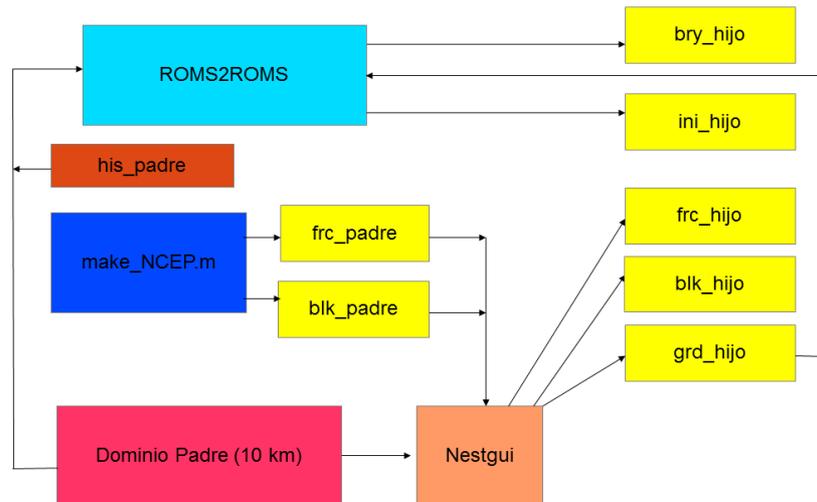


Figura 3. Metodología para generar archivos de entrada en MH “hijo”.

5.1.5. Descripción de las variables de salida del modelo hidrodinámico

Finalmente, los archivos de salida tanto del MH padre como MH hijo están en el formato NetCDF. Estos resultados fueron procesados para el análisis que permiten hacer el diagnóstico del modelo. Al término del proceso se realizó la validación, comparando los resultados del modelo con los datos empíricos. Las salidas del MH hijo fueron utilizadas en la modelación biofísica. Las variables de las salidas del MH hijo corresponden a dos tipos, las salidas “his” (históricas) las cuales tienen resolución diaria, estas son: Temperatura, Salinidad, Corrientes U y V a diferentes profundidades y Nivel del mar, cada una de estas salidas mensuales pesa 4.2 Gb. Por otro lado, existen las variables “avg” (promedios) que corresponden a un promedio mensual para cada una de las variables anteriores, cada una de estas salidas tiene un tamaño de 214 Mb aproximadamente. Por lo tanto, para todo el periodo de modelación se requirió de un almacenamiento aproximado de 1.5 Tb.

5.1.6. Implementación piloto del modelo biogeoquímico PISCES

No obstante, es una actividad no contemplada en los objetivos específicos del proyecto, la implementación de un modelo biogeoquímico acoplado a un modelo hidrodinámico supone un avance mayor para la modelación biofísica y ecosistémica. De esta manera, en el marco del presente proyecto se implementó de forma piloto el modelo biogeoquímico PISCES

(*Pelagic Interaction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies*; Aumont *et al.*, 2003; Aumont & Bopp 2006) el cual se espera contribuya a dar respuestas futuras a la interacción de poblaciones de peces como la anchoveta con el medio ambiente, en particular su respuesta ante cambios en la productividad del ecosistema. El diseño e implementación de PISCES requirió la generación de un modelo hidrodinámico acoplado a un módulo que incorpore los ciclos biogeoquímicos de gran escala, el cual tiene la potencialidad de generar dominios más acotados de mayor resolución mediante un proceso de anidamiento para describir procesos hidrodinámicos y biogeoquímicos en ambientes más complejos como el costero. El proceso de acoplamiento entre el modelo hidrodinámico ROMS y el modelo PISCES se realizó siguiendo a Echevin *et al.*, 2008. El funcionamiento de PISCES acoplado a ROMS produjo un aumento aproximado de cuatro veces el tiempo de cálculo que tarda solo el modelo hidrodinámico ROMS, debido al aumento en 24 variables más que debe calcular cuando se activa el módulo biogeoquímico. En consecuencia, la modelación ROMS_PISCES que desarrollada tuvo una resolución global de 30 km orientada a los procesos de mesoescala. El modelo biogeoquímico PISCES simula la productividad biológica y los ciclos biogeoquímicos del Carbono y de los principales nutrientes (Fosfato, Nitrato, Amonio, Silicato y Fierro), donde se asume que el crecimiento del fitoplancton está directamente limitado por la disponibilidad externa de nutrientes, así mismo incluye dos clases de fitoplancton (nanoplancton y diatomeas), dos tipos de zooplancton (microzooplancton y mesozoplancton), dos tipos de detritus además del oxígeno. Este modelo biogeoquímico es derivado del modelo Hamburg para el ciclo de Carbono, versión 5 HAMOCC5 (Aumont *et al.*, 2003). El modelo PISCES tiene 24 compartimientos, donde el crecimiento del fitoplancton está limitado por cinco nutrientes: Nitrato, Amonio, Fosfato, Silicato y Fierro. También presenta dos tipos de fitoplancton (nanofitoplancton y diatomeas) así como dos tipos de zooplancton (micro y meso zooplancton). En la presente implementación se generó un modelo ROMS-PISCES climatológico para el periodo 2000-2010 con el objetivo de generar la primera aproximación a la modelación de la variabilidad de la productividad del ecosistema.

5.1.7. Validación del modelo hidrodinámico

Los modelos de circulación reproducen procesos oceanográficos en distintas escalas, pero generalmente no reproducen eventos específicos. En este contexto, es altamente necesario realizar un proceso insesgado que contraste datos de campo con resultados de los modelos para evaluar el desempeño de los modelos e identificar posibles falencias que podrían afectar el resultado final de la modelación biofísica y las estimaciones de reclutamiento. Debido al amplio dominio espacial requerido en el presente estudio y la alta periodicidad de las mediciones, datos satelitales resultan apropiados para ser utilizados como información de referencia. No obstante, se analizó la estructura vertical del modelo, en relación a datos observados *in situ*. En este estudio se realizó una validación del modelo hidrodinámico ROMS desde i) una perspectiva satelital interanual, ii) un análisis comparativo mediante el muestreo del modelo ROMS en la misma escala temporal y espacial que cruceros oceanográficos realizados al interior del dominio modelado, y iii) un análisis de los resultados del mejoramiento de forzantes realizado para la zona de estudio.

5.1.7.1. Validación basada en información satelital

La primera etapa para evaluar el desempeño del modelo hidrodinámico respecto a observaciones realizadas por satélites involucra el análisis de las señales estacionales, las cuales están definidas como la señal media a lo largo de todo el dominio analizado. Se analizaron tres variables relevantes generadas por ROMS, la temperatura superficial del mar (TSM), la energía cinética (*eddy kinetic energy*, EKE) y la anomalía en el nivel medio del mar (ANM). Así, con el objeto de analizar el ciclo anual y la variabilidad interanual del modelo respecto a información observada se obtuvo información de la TSM desde los programas internacionales PATHFINDER (1/10° de resolución espacial) (www.pathfinder.nodc.noaa.gov; periodo 1994-2012) y MODIS-Aqua (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>; periodo 2013-2016), los cuales fueron llevados a una misma resolución espacial (1/10°) para obtener un producto único. La ANM mensual se obtuvo a partir de registros diarios desde el programa internacional AVISO (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/my-aviso.html>; periodo 1994-2016). La EKE fue calculada desde los campos de velocidad de las corrientes geostroficas superficiales

provistas por AVISO (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/my-aviso.html>; periodo 1994-2016), siguiendo la siguiente ecuación:

$$EKE = \frac{u^2 + v^2}{2}$$

donde,

u = componente zonal de velocidad de corriente

v = componente meridional de velocidad de corriente

Se analizó comparativamente el patrón espacial estacional y la correspondencia entre modelo y observación se verificó a través del nivel y significancia de la correlación entre ambas señales. Para explorar el desempeño del modelo ROMS en la escala interanual se removió la media climatológica mensual desde los datos observados y modelados para todas las variables. La validación y contraste de modelos hidrodinámicos se ha hecho siguiendo la metodología propuesta por Keister *et al.* (2011) y Vásquez (2012), la cual se basa en el uso de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF de su sigla en inglés) que permiten cuantificar el desempeño de los modelos en reproducir la variabilidad oceánica en tiempo y espacio. La metodología además permite probar la significancia de la correlación entre los componentes principales del modelo y de los datos observados por medio de una aproximación Montecarlo que permite cuantificar la autocorrelación en las series de tiempo.

Para aplicar la metodología de validación basada en EOF, la información original proveniente del satélite y de las salidas del modelo dominio hijo deben ser reorganizadas en matrices tiempo-espacio, de esta forma se obtiene la matriz de datos modelada (simulada) S ($m \times n$) y la observada por satélites O ($m \times n$), donde n es la longitud de la serie de tiempo en cada localidad m las matrices S y O pueden tener distinta resolución espacial y temporal, sin embargo es altamente recomendable que estas matrices estén construidas con datos observados y modelados sobre la misma región geográfica y el mismo periodo de tiempo. La media, la desviación estándar y la tendencia son removidas desde ambas matrices (S y O). Subsecuentemente, las matrices son desglosadas en un número limitado de funciones

ortogonales (*nofes*), cuya magnitud depende de la capacidad de procesamiento disponible, a través de:

$$(S * S') * ES = ES * \lambda S \quad (1)$$

$$AS = ES' * S \quad (2)$$

donde ES son las matrices de vectores propios (*eigenfunctions*) o funciones ortogonales desde la información modelada, λS son los valores propios (*eigenvalues*), AS son los componentes principales de las variables modeladas, * denota un producto matricial y ' es la matriz transpuesta.

Para testear la significancia de la correlación entre los componentes principales observados y modelados se utiliza una aproximación Montecarlo, la cual permite cuantificar la autocorrelación en las series de tiempo. Para cada uno de los componentes principales se calcula la autocorrelación, la que se utiliza en un modelo auto-regresivo de orden 1 para generar 10.000 realizaciones de series de tiempo de ruido rojo que tienen la misma pendiente espectral y los mismos grados de confianza que la serie original. Posteriormente se calcula la correlación para cada una de las 10.000 realizaciones y se construye una distribución de probabilidad de la correlación cruzada entre los componentes principales. Desde dicha distribución se estima la significancia de la correlación. Si la correlación sobrepasa del 95% de ocurrencias se considera la correlación estadísticamente significativa.

5.1.7.2. Evaluación del forzante mejorado mediante downscaling

Para analizar las salidas del modelo ROMS padre, el cual utilizó los forzantes atmosféricos mejorados, se analizó: i) señal media de la temperatura superficial del mar; ii) la estructura vertical de la corriente paralela a la costa (corrientes superficiales y contracorrientes subsuperficiales).

5.1.8. Plataforma computacional para la implementación del modelo ROMS

Uno de los aspectos claves en este tipo de estudio es la plataforma computacional, la cual debe tener los recursos necesarios para ejecutar modelos de alta complejidad como lo son los modelos hidrodinámicos y biofísicos. En este contexto, se ha utilizado un nodo de cálculo de última generación para dar cumplimiento a las demandas de estos modelos. El nodo de cálculo contó con:

- 4 Procesadores AMD Opteron 6376 de 16 núcleos de 2.3GHz/16MB (64 núcleos)
- 128GB de Memoria RAM (16x 8GB Dual Rank Registered)
- 1x Discos Duros SAS de 1TB en 7.2K rpm
- Dispositivo DVD/RW Interno
- Incluye dos puertos Gigabit Ethernet e interfaz IPMI
- Fuente de Poder Redundante
- Tarjeta PCIe Infiniband Mellanox ConnectX-2 QDR, 1 puerto, HCA Gen 2
- Sistema Operativo CentOS 6

Por otro lado INPESCA cuenta con un sistema de almacenamiento expandible hasta 24 discos, el cual cuenta actualmente con:

- 2 procesadores Intel Xeon E5-2603 de 4 núcleos de 1.8GHz/10MB (8 núcleos)
- 32GB de Memoria RAM (8x 4GB Dual Rank Registered)
- 12x Discos Duros SATA de 1TB en 7.2K rpm (RAID 0, 1, 5, 6, 10, 50, 60)
- Incluye dos puertos Gigabit Ethernet e interfaz IPMI
- Tarjeta PCIe Infiniband Mellanox ConnectX-2 QDR, 2 puertos, HCA Gen 2 (Incluye 1 Cable IB)

En el marco del presente proyecto se ha adquirido un nuevo nodo de cálculo, el cual se ha sumado al descrito anteriormente para generar un sistema de *cluster* para mejorar la eficiencia en el cálculo numérico (**Figura 4**). El nuevo nodo de cálculo cuenta con los siguientes componentes:

Nuevo nodo de cálculo, Servidor Supermicro Modelo AS-2042G-72RF4:

- 4 Procesadores AMD Opteron 6376 de 16 núcleos de 2.3GHz/16MB (64 núcleos)
- 128GB de Memoria RAM (16x 8GB)
- 2 Discos Duros 3.5" 1TB SAS 6Gb/s 7.2K RPM 128M

Servidor de Almacenamiento

- 2 procesadores Intel Xeon E5-2603V2 de 4 núcleos de 1.8GHz/10MB (8 núcleos)
- 32GB de Memoria RAM (8x 4GB)
- 24x Discos Duros SATA de 1TB en 7.2K RPM 64M.
- Tarjeta PCI controladora de discos RAID con capacidad de niveles: 0, 1, 10, 5.

Kit Infiniband:

- 1 Switch Infiniband Mellanox InfiniScale IV QDR (8 puertos)
- 2 Tarjetas PCIe IB Mellanox ConnectX-2 (1 puerto)
- 3 Cables IB Mellanox de cobre

Expansión para el antiguo Sistema de almacenamiento:

- Kit de upgrade de 12 discos Seagate 2.5" 1TB SATA 6Gb/s 7.2K RPM 64M

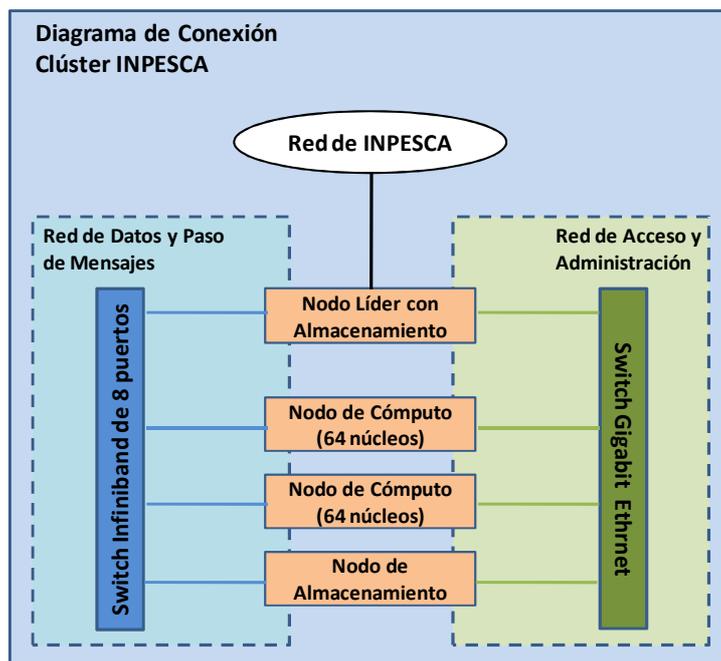


Figura 4. Diagrama de Clúster INPESCA, 128 procesadores y 48 TB de almacenamiento.

5.2. Modelo de acoplamiento biofísico

La modelación de la historia de vida temprana de pequeños pelágicos y su efecto en la dinámica del reclutamiento es altamente dependiente del modelo conceptual de la historia de vida de la especie, incluyendo una etapa crítica que es el proceso de transporte de huevos y larvas. En consecuencia, es necesario el establecimiento de un modelo conceptual del ciclo de vida de la especie a modelar, así como de los principales supuestos del esquema de modelación biofísica planteado.

5.2.1. Modelo conceptual y revisión histórica

El modelo biofísico de anchoveta se basó en el modelo conceptual de la historia de vida de la anchoveta en el norte de Chile. El máximo de desove de anchoveta ocurre entre julio y septiembre de cada año, pero muestra signos de variabilidad interanual (Böhm *et al.*, 2011), el cual es registrado por los cruceros de evaluación de la biomasa desovante (MPDH), posteriormente alrededor de 4 meses después ocurre el reclutamiento (individuos menores a 6 meses de vida (Castillo *et al.*, 2012). El ciclo anual de vida llega a su término en junio del

año siguiente cuando los individuos de la población de anchoveta alcanzan sus condiciones reproductivas (talla ~12 cm de longitud; Castillo et al., 2013, Martínez *et al.*, 2007).

En consecuencia, el esquema de modelación se sustentó en un modelo de ciclo de vida de la anchoveta que considera una distribución principalmente costera, donde el 70% de las capturas se desarrolla dentro de las primeras 20 millas; desove que ocurre en un extenso periodo que va desde primavera hasta el verano, con una distribución asimétrica (rápido ascenso de los indicadores reproductivos hasta el máximo, decaimiento lento hacia el término) y un máximo anual y con variabilidad interanual en su sincronización temporal; una alimentación que está basada principalmente en el fitoplancton en las etapas tempranas del desarrollo con las diatomeas como principal presa, con un claro patrón oportunista y depredador generalista y; un pulso de reclutamiento anual que se extiende entre diciembre y marzo de cada año con variabilidad interanual dependiente de la actividad reproductiva. Entonces, en base a los antecedentes expuestos se plantea un modelo conceptual del ciclo de vida de la anchoveta (*Engraulis ringens*) norte de Chile (**Figura 5**).

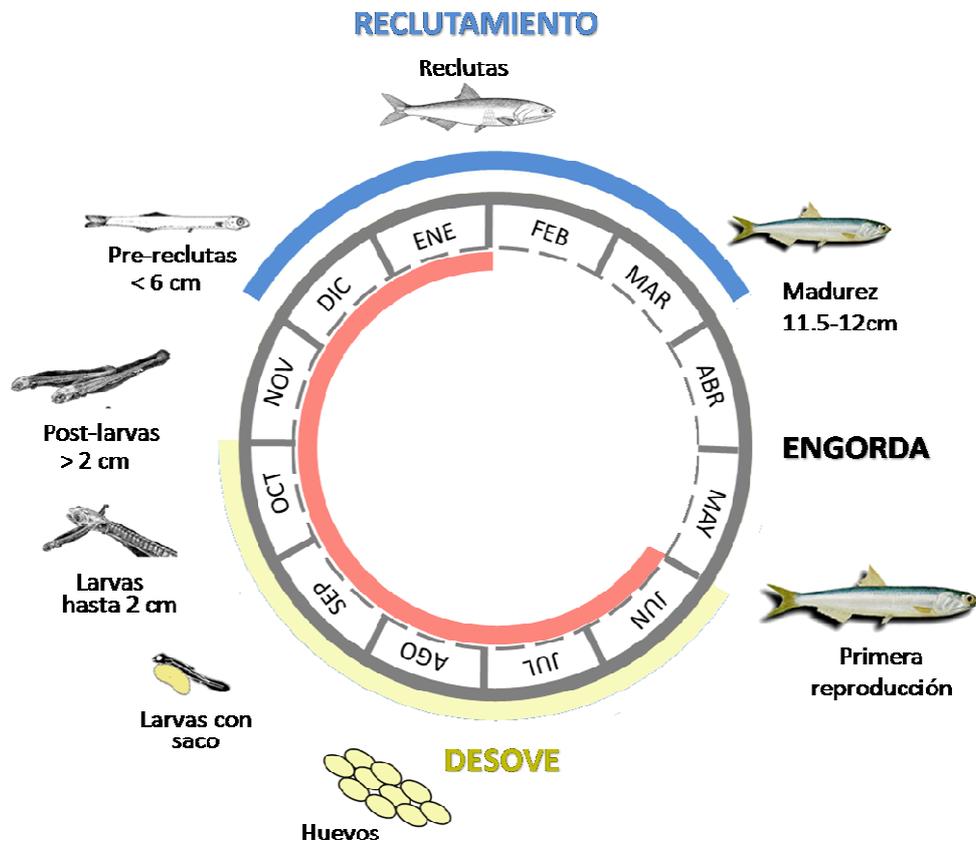


Figura 5. Modelo conceptual para el ciclo de vida de la anchoveta (*Engraulis ringens*) en el norte de Chile entre las XV-II Regiones.

Considerando este modelo conceptual del ciclo de vida de anchoveta, el esquema de modelación biofísica se sustenta en los siguientes supuestos generales basados en el modelo conceptual del ciclo de vida de la anchoveta presentada en el punto anterior:

- La anchoveta distribuida desde el sur de Perú hasta el norte de Chile (16°S-26°S) constituye una única unidad de stock.
- El área de desove descrita para el norte de Chile es una fracción de la zona de desove total del stock, la cual es compartida geográficamente con el sur de Perú.
- El área de reclutamiento/crianza de la anchoveta se encuentra asociada al sector costero, delimitada por el sector de máxima producción biológica.

- El área de desove no cambia su estructura espacial durante el periodo de máxima actividad reproductiva y es capturado por el crucero de evaluación de biomasa desovante.
- El inicio de la natación autónoma y de la transición a la etapa de juveniles ocurre a los 60 días de edad y es independiente de la talla de los individuos.
- Los individuos que posteriormente alcanzan la edad de transición y han sido advectados fuera del área de crianza mueren.
- Los individuos que son alcanzados por temperaturas letales para el desarrollo mueren.
- El reclutamiento de anchoveta está relacionado con la sobrevivencia de huevos y larvas hasta la edad de transición a juveniles.

5.2.2. Implementación de un modelo biofísico para anchoveta en el norte de Chile

El modelo biofísico fue implementado en la plataforma de acoplamiento ICHTHYOP versión 3.2 (Lett *et al.*, 2008, <http://www.ichthyop.org/>) que es un software libre desarrollado para el estudio de transporte de estados tempranos de peces y el estudio del efecto de factores físicos (temperatura, densidad, corrientes) y biológicos (boyantes, crecimiento, movimiento, etc.) en la historia de vida de estos organismos con foco hacia la dinámica del reclutamiento (**Figura 6**). El modelo biofísico implementado permitió simular la historia de vida temprana de anchoveta a través de una modelación basada en el individuo (IBM) que incorporó la historia de vida de cada organismo a través del concepto de programación objeto orientado, donde el ambiente físico experimentado por cada individuo estuvo caracterizado por las variables físicas heredadas desde el modelo hidrodinámico. Los individuos modelados fueron caracterizados por variables de estado a nivel del individuo. Estas variables de estado correspondieron a edad (días), estado (huevo, larva con saco vitelino, larva en estado de alimentación), posición (latitud, longitud, profundidad), y estatus de sobrevivencia, entre otras.

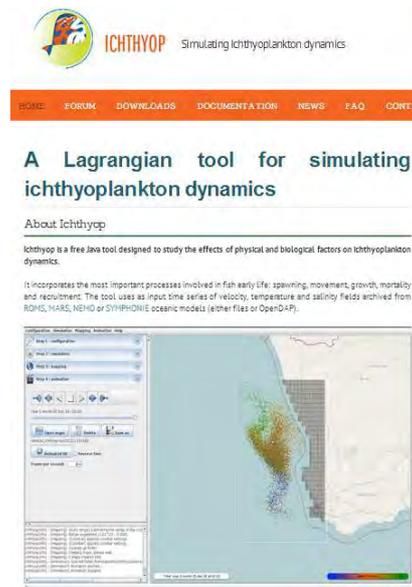


Figura 6. Ichthyop, modelo para configurar modelos biofísicos acoplados a modelos hidrodinámicos, <http://www.ichthyop.org/>). En este sitio se encuentra disponible la documentación y descarga de archivos.

5.2.2.1. Variables de estado del modelo biofísico

El modelo biofísico implementado permitió simular la historia de vida temprana de pequeños pelágicos a través de una modelación basada en el individuo (IBM) que incorporó la historia de vida de cada organismo a través del concepto de programación objeto orientado, donde el ambiente físico experimentado por cada individuo está caracterizado por las variables físicas heredadas desde el modelo hidrodinámico. Los individuos modelados están caracterizados por variables de estado a nivel del individuo. Estas variables de estado corresponden a edad (días), estado (huevo, larva con saco vitelino, larva en estado de alimentación, pre-recluta), posición (latitud, longitud, profundidad), y estatus de sobrevivencia, entre otras.

5.2.2.2. Acoplamiento modelo hidrodinámico a modelo biofísico

Las variables de estado oceanográficas y físicas (variables de entrada: temperatura, salinidad, velocidad de corriente horizontal u y v , velocidad de corriente vertical w , altura del nivel del mar $zeta$) provinieron de una grilla discreta de modelación hidrodinámica ROMS. De tal manera, que el modelo biofísico heredó la estructura de espacial de la grilla

del modelo hidrodinámico, y fue forzado por las variables de estado ambientales a la escala espacial en que estas han sido almacenadas (diaria y subdiaria para las grillas anidadas). Para determinar la localización de cada uno de los individuos y sus propiedades, las variables ambientales fueron interpoladas en el espacio y tiempo. De esta manera, el modelo biofísico fue capaz de generar trayectorias de movimiento de partículas y su evolución en el tiempo. Considerando los objetivos del presente proyecto, se abordó la problemática con un esquema de modelación biofísica basada en condiciones realistas para hacer emerger patrones de conectividad que puedan explicar la variabilidad del reclutamiento. No obstante, para llevar a cabo este esquema fue necesario identificar los compartimentos biológicos (también llamados sub-modelos) y las piezas de información necesarias para probar las hipótesis planteadas.

5.2.3. *Compartimentos biológicos y submodelos*

Para las hipótesis relacionadas con la historia de vida temprana de peces pequeños pelágicos y el efecto sobre la dinámica del reclutamiento es necesario identificar los compartimentos biológicos y las piezas de información necesarias para probar dichas hipótesis. La plataforma de modelación ICHTHYOP posee compartimentos biológicos genéricos. Estos compartimentos fueron modificados o re-estructurados para los requerimientos asociados a los compartimentos biológicos específicos (detallados más adelante) que se requiere utilizar en la modelación, para seguir en el tiempo y espacio el transporte de huevos, larvas y juveniles de anchoveta. A continuación se definen los submodelos y configuración del modelo biofísico utilizados, que han sido clave para poder recrear las condiciones biológicas de las distintas etapas de desarrollo de anchoveta. También se describen en detalle las variables biológicas que fueron utilizadas como datos de entrada para el modelo biológico que necesariamente debe inicializarse con datos realistas para reproducir la dinámica del reclutamiento (Bartsch *et al.*, 2004; Vásquez, 2012; Ospina-Álvarez *et al.*, 2015; Vásquez *et al.*, 2017).

Basado en el modelo conceptual, el modelo biofísico de pequeños pelágicos incluye los submodelos biológicos que se listan a continuación. Cabe destacar que una fuente de información relevante para esta sección del estudio es la que describe la distribución

espacial y abundancia del desove. Estos datos han sido registrados por diversos proyectos financiados principalmente por el Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura (FIPA; ver Tabla II). La ejecución de este proyecto ha considerado la solicitud formal de las bases de datos de distribución de huevos y larvas de anchoveta al FIPA (para cada uno de los proyectos enumerados).

5.2.3.1. Submodelo de movimiento por estadio

Un punto relevante en la modelación biofísica basada en IBM's es el movimiento y comportamiento de los individuos. Estudios realizados recientemente han demostrado que la inclusión de aspectos como la boyantes de huevos (Parada *et al.*, 2008, Ospina-Álvarez *et al.*, 2012), migración vertical diurno/nocturna (Vikebø *et al.*, 2007; Ospina-Álvarez *et al.*, 2012) y el movimiento horizontal orientado (Staaterman *et al.*, 2012) pueden cambiar la trayectoria de deriva, el ambiente físico que experimentan larvas y juveniles y el consecuente destino final de los individuos. Hasta la fecha estos aspectos no han sido incorporados en las experiencias desarrolladas en anchoveta, pero han sido identificada como un punto relevante a ser incorporado (Parada *et al.*, 2012; Soto *et al.*, 2012). El movimiento horizontal (lagrangiano) de huevos y larvas de pequeños pelágicos se estima en el modelo biofísico usando una aproximación Runge Kutta de 4to orden donde las posiciones de las partículas modeladas depende de las componentes horizontales de velocidad de la corriente (u , v) y de las posiciones de las partículas en el paso anterior. En el presente estudio se busca recopilar evidencia para sostener, además, un esquema de flotabilidad en huevos y movimiento vertical (migración diurno-nocturna) de larvas y pre-reclutas de anchoveta para ser incorporados en el esquema de modelación biofísica. De esta manera en esta versión del modelo biofísico, el movimiento deja de ser puramente Lagrangiano (pasivo, en donde el movimiento vertical y horizontal dependen exclusivamente del modelo hidrodinámico) y se incluye boyantes para huevos y un esquema de movimiento vertical para larvas y pre-reclutas.

La boyantes para los huevos fue calculada como una función de la densidad del huevo y la densidad del agua de mar, esta última calculada como una función de la temperatura y la

salinidad (ver Parada *et al.*, 2008 para detalles). La posición vertical de los huevos es determinada por la velocidad terminal, la cual es una función de la fuerza gravitacional y la velocidad vertical de la corriente producida por el modelo hidrodinámico en cada paso de tiempo t . El esquema de boyantes solo será aplicado antes de la eclosión, esto es, entre 3,4 y 4,7 días posterior al desove (entre 9 y 13°C respectivamente; ver detalles en submodelo de crecimiento). Considerando que a la fecha se desconocen los cambios en la densidad específica de los huevos de *E. ringens* a medida que se desarrollan, en el presente estudio se consideró que la densidad disminuye ligeramente con el desarrollo y los huevos ascienden ligeramente hacia la superficie de manera que asegure que los huevos de anchoveta se distribuyan sobre la termoclina, de acuerdo a lo observado en campo (no obstante velocidades verticales intensas puedan transportarlos a estratos más profundos de la columna de agua).

El comportamiento de movimiento vertical para larvas y juveniles de anchoveta en la modelación biofísica consistió de un esquema migración diurno – nocturna dependiente de la talla. Para indagar en evidencias de migración diurno-nocturna en *E. ringens*, se utilizó información reportada por Landaeta & Castro (2013), quienes a través del estudio de la funcionalidad de la vejiga gaseosa determinaron los cambios en la distribución vertical de larvas de anchoveta a lo largo del día en distintos estratos de tamaño. De esta manera, se caracterizó la máxima extensión de dispersión vertical de larvas de acuerdo a dos grupos de tamaño: 2,48 (talla de eclosión)-10 mm y >16 mm. La existencia de migración vertical se probó calculando la probabilidad de encontrar larvas de estos tamaños a distintas fracciones del día esto es: 0-4, 4-8, 8-12, 12-16, 16-20 y 20-24 hrs. Finalmente, y con el fin de generar un esquema continuo de movimiento, se ajustó un modelo sinusoidal apropiado para describir el patrón de movimiento vertical, el cual fue incorporado en la sección de migración vertical de ICHTHYOP materializando un esquema de migración vertical tamaño dependiente para larvas y pre-reclutas de anchoveta.

De esta manera, el movimiento de los individuos está definido por:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + V_u * \Delta t$$

$$y(t + \Delta t) = y(t) + V_v * \Delta t$$

$$z(t + \Delta t) = z(t) + (V_z + V_{buoy}(a) + B(a)) * \Delta t$$

donde,

(x,y,z) = posición de los individuos; a = edad de los individuos (días desde el desove); t = tiempo; $V_{u,v,z}$ = velocidad de la corriente a lo largo de los ejes u , v o z ; $V_{buoy}(a)$ = velocidad de boyantes dependiente de la densidad del huevo y el agua de mar; B = comportamiento de migración vertical dependiente de la hora, la profundidad y la edad.

5.2.3.2. Submodelo de distribución espacial del desove

De acuerdo al esquema planteado, el proceso de modelación comienza con el desove de anchoveta, el que debe ser definido de forma espacialmente explícita en el modelo biofísico para todas las zonas donde se ha reportado presencia de actividad reproductiva. En este sentido, la simulación espacial del desove de anchoveta en el contexto de un modelo biofísico busca ser definida de la forma más realista posible en función de la disponibilidad de información de campo. En el compartimento de desove de ICHTHYOP las áreas de desove son definidas como agregaciones de huevos virtuales cuya ubicación espacial dependerá de la disponibilidad de información respecto de la distribución de huevos de anchoveta para cada temporada reproductiva anual modelada o por medio de una aproximación metodológica. La abundancia y distribución espacial de huevos de anchoveta en la zona norte de Chile, ha sido estudiada ampliamente a través de proyectos del Fondo de Investigación Pesquera y de Acuicultura (FIPA) destinados a evaluar la biomasa desovante de pequeños pelágicos por medio del método de producción diaria de huevos (MPDH). La Tabla II resume los proyectos del FIPA donde se ha determinado el área de desove anual de la especie durante la temporada de máxima actividad reproductiva. Muestreos planctónicos sistemáticos han sido realizados en una escala temporal de observación variable abarcando una vasta área que permite describir el área de desove de anchoveta. Los datos de distribución de huevos fueron solicitados al FIPA para el desarrollo del presente proyecto.

Para explorar la recurrencia y estructura espacial del desove de anchoveta, de los cruceros de evaluación del stock desovante de anchoveta analizados, el campo promedio y el campo de desviación estándar fueron calculados a partir de la estimación de probabilidad de la presencia en cada ubicación espacial de una grilla que representa toda el área de estudio cubierta por los cruceros. Para esto, cada distribución anual de huevos de anchoveta fue llevada a una grilla regular estandarizada a $0,05^\circ$ mediante interpolación espacial DIVA (Data-Interpolating Variational Analysis; Troupin *et al.* 2009). El campo promedio representa el hábitat del desove realizado e indica la distribución de la probabilidad media donde los huevos de anchoveta fueron desovados, mientras que el campo de desviación estándar muestra la variabilidad interanual del desove durante todo el periodo de estudio. El mapa de probabilidad media, acotado de 0 a 100, fue clasificado en tres categorías mediante la división de tres intervalos: baja probabilidad (≤ 30), probabilidad media ($30 < \leq 60$) y alta probabilidad (> 60). Así, el área de desove fue caracterizada de acuerdo a la clasificación de Bellier *et al.* (2007) y que considera las siguientes tres categorías: 1) Zonas de desove recurrente: áreas con alta probabilidad promedio y baja desviación estándar, donde la anchoveta desova cada año en esos sitios; 2) Zonas de desove ocasional: áreas con alta probabilidad y alta desviación estándar, donde la anchoveta ha presentado desove sólo en algunos de los años evaluados; y 3) Zonas no aptas al desove: áreas con baja probabilidad promedio y baja desviación estándar, donde el desove la anchoveta es inexistente o excepcional.

No obstante la existencia de los citados cruceros que describen la distribución y ocurrencia de huevos de anchoveta, el esquema de modelación biofísica ha debido abordar varias problemáticas asociadas a la distribución del desove, para satisfacer los objetivos planteados en el proyecto: i) debido a la amplitud del área de evaluación y a la duración de la temporada reproductiva, la cobertura espacial y temporal de los cruceros es inevitablemente discontinua; ii) los cambios en la distribución espacial del desove a lo largo de la temporada reproductiva no son capturados por los cruceros de evaluación directa, que entregan una visión general del proceso espacial de la reproducción; iii) el periodo de evaluación biofísica planteado es 1995-2016, sin embargo 1998 y 2010 no cuentan con la realización de cruceros. Por todo lo anterior, ha sido necesario recurrir a

supuestos y metodologías adecuadas para describir la distribución del desove y sus cambios interanuales. En este contexto, para contar con un modelo espacio-temporal predictivo del desove de anchoveta se utilizaron métodos de interpolación utilizando un modelo aditivo generalizado (GAM de su sigla en inglés). Un GAM es un método estadístico, análogo a una regresión, con la diferencia que no asume normalidad o linealidad para relacionar la variable respuesta, en este caso abundancia de huevos, con las variables predictoras, en este caso tiempo y espacio. Previo al desarrollo del modelo es requerida la preparación de una densa grilla para predecir la densidad de huevos en todos los posible puntos del área de estudio. Para evitar que la grilla se extienda mas allá de los límites observados por los cruceros, se realizó una estimación de los límites observados usando las librerías de R *spatstat* y *shachar* (Bernal *et al.*, 2007). Una vez realizado este procedimiento, se aplicaron GAM's para predecir la distribución de huevos de anchoveta bajo condiciones espaciales observadas por el crucero. Los GAMs (Hastie & Tibshirani, 1986) son una generalización de los modelos lineales (GLM), en el cual la variable respuesta está relacionada con uno a varios "suavizadores" (funciones de suavizamiento no-lineal) de una o más covariables (Wood, 2008). La principal ventaja de los GAMs es su capacidad de modelar datos no lineales usando suavizadores no-paramétricos (Hastie & Tibshirani 1986;. Wood 2008). La selección de los predictores suavizados siguió el método propuesto por Wood & Augustin (2002), usando la librería de R *mgcv*. Modelos de abundancia fueron ajustados a los datos de cada crucero para predecir la probabilidad de observar huevos de anchoveta en una muestra dada como una función de las variables espaciales. De esta manera, una vez obtenido un modelo verosímil y parsimonioso se generaron distribuciones espaciales de huevos de anchoveta para cada temporada reproductiva correspondientes al periodo 1995-2016 (ver submodelo de sincronización del desove, más adelante). Finalmente, se implementaron liberaciones realistas y continuas en el modulo del ICHTHYOP siguiendo lo propuesto por Ospina-Álvarez *et al.* (2013).

Tabla II. Listado de proyectos que cuentan con datos respecto a la distribución espacial del desove de anchoveta en el norte de Chile.

Año	Proyecto	Código
1995	Evaluación del stock desovante de anchoveta por el método de producción de huevos en la I y II Regiones. FIP 1995-01	FIP 95-01
1996	Evaluación del stock desovante de anchoveta por el método de producción de huevos en la I y II Regiones.	FIP 96-01
1997	Evaluación del stock desovante de la anchoveta en la I y II Regiones	FIP 97-01
1999	Evaluación del stock desovante de anchoveta en la I y II Regiones	FIP 99-10
2000	Evaluación del stock desovante de anchoveta en la I y II Regiones, año 2000	FIP 00-06
2001	Evaluación del stock desovante de anchoveta por el método de producción de huevos en la I y II Regiones, año 2001	FIP 01-10
2002	Evaluación del stock desovante de anchoveta por el método de producción de huevos en la I y II Regiones, año 2002	FIP 02-10
2003	Evaluación del stock desovante de anchoveta en la I y II Regiones, año 2003	FIP 03-07
2004	Evaluación del stock desovante de anchoveta en la I y II Regiones, año 2004	FIP 04-04
2005	Evaluación del stock desovante de anchoveta en la I y II Regiones, año 2005	FIP 05-03
2006	Evaluación del stock desovante de anchoveta en la I y II Regiones, año 2006	FIP 06-06
2007	Evaluación del stock desovante de anchoveta en la I y II Regiones, año 2007	FIP 07-01
2008	Evaluación del stock desovante de anchoveta en la I Y II Regiones, año 2008.	FIP 08-01
2009	Evaluación del stock desovante de anchoveta en la XV,I y II Regiones, año 2009	FIP 09-01
2011	Evaluación del stock desovante de anchoveta en la XV,I y II Regiones, año 2011	FIP 11-08
2012	Evaluación del stock desovante de anchoveta en la XV,I y II Regiones, año 2012	FIP 12-06
2013	Evaluación del stock desovante de anchoveta en la XV,I y II Regiones, año 2013	FIP 13-06
2014	Evaluación del stock desovante de anchoveta en la XV,I y II Regiones, año 2014	
2015	Evaluación del stock desovante de anchoveta en la XV,I y II Regiones, año 2015	

5.2.3.3. Submodelo de sincronización temporal del desove

La anchoveta es una especie desovante parcial asincrónica, lo que implica que en un determinado período de tiempo es posible encontrar ejemplares en diferentes estados de madurez sexual. El máximo de desove de anchoveta ocurre entre julio y septiembre de cada año, pero muestra signos de variabilidad interanual (Böhm *et al.*, 2011). Para evaluar la duración y comportamiento de la temporada reproductiva dentro del año y sincronizar el desove virtual en el modelo biofísico se utilizó la metodología propuesta por Claramunt *et al.* (2014), la cual está en concordancia con lo determinado por el Comité Científico-Técnico de Pequeños Pelágicos de SUBPESCA. Una vez definido el patrón de desove, se incorporó al compartimento de sincronización de desove al interior de ICHTHYOP y cada proceso de simulación anual se inició y finalizó de acuerdo a estas condiciones observadas en la población. Además, se consideró la frecuencia de desove observada para definir el intervalo entre liberaciones sucesivas de partículas en el modelo biofísico. De esta manera se busca incorporar la variabilidad interanual del comportamiento reproductivo para incrementar la certeza en la estimación del patrón espacio/temporal de reclutamiento biofísico.

El potencial reproductivo de una especie puede ser estimado por algún índice que considere aspectos fundamentales de la biología reproductiva de la especie en cuestión. En términos generales, los peces se categorizan por tener un desove total y aquellos que presentan varios desoves, correspondiendo en este último caso a desovantes múltiples (ej. anchoveta, jurel). Con el objeto de estimar el número de desoves es necesario contar con resultados del análisis histológico de los ovarios (folículos postovulatorios) a lo largo de la estación reproductiva, para la estimación de la fracción diaria de hembras desovantes (proporción de la población de hembras que desova al día). Si se cuenta con estimaciones mensuales o semanales de la fracción desovante, el área bajo la curva representa el número de desoves anuales, esto es:

$$D_t = \sum_{i=1}^{12} S_i \cdot d_i$$

donde:

D_t = Número de desoves del año t

S_i = Fracción diaria de hembras desovantes del mes i

d_i = Número de días del mes i

Lamentablemente, debido a los requerimientos de muestreo y análisis de laboratorio (histología), la aplicación de esta metodología se realiza solo para períodos cortos de tiempo, generalmente para el mes de máximo desove, como en el caso de la aplicación del Método de Producción Diaria de Huevos en que se estima para el período del crucero en cuestión. Sin embargo, se han postulado *proxies* de la fracción diaria de hembras desovantes que pueden ser útiles (Claramunt *et al.*, 2002), los cuales siguen la misma tendencia temporal que la fracción desovante. Claramunt & Herrera (1994) y Claramunt & Roa (2001) proponen que un índice del número de desoves es el área bajo la evolución temporal del IGS, esto es la utilización de:

$$G_t = \sum_{j=1}^n \overline{M}_{j,t} \cdot d_j$$

G_t = Índice del número de desoves o área bajo la evolución temporal del Índice Gonadosomático (IGS) a lo largo de las semanas n o Proporción de Hembras Activas (PHA) en el año t .

\overline{M} = Índice macroscópico medio mensual (IGS y PHA) de la semana j en el año t .

d_j = Número de días de la semana j .

Lo anterior en base mensual se traduce:

$$G_t = \sum_{j=1}^{12} \overline{M}_{j,t}$$

El principal supuesto es que el área acumulada bajo la curva del índice en función del tiempo sigue una tendencia sigmoide, a la cual se le puede ajustar un modelo entre el tiempo acumulado y el área bajo G, del tipo:

$$G_t = \frac{a}{1 + e^{-b-c \cdot t}}$$

Siendo G_t el área bajo G al tiempo t , el cual es un *proxy* del número de desoves. Los parámetros quedan representados por a , b y c :

k : nivel de asíntota (= área total)

b : parámetro de posición, tal que b/c es el tiempo en que se alcanza la mitad de la asíntota y que corresponde al tiempo en que se alcanza el máximo (= pico reproductivo)

c : relacionado a la velocidad con que se alcanza la asíntota

Luego el ajuste a los datos observados se realiza por mínimos cuadrados, esto es por máxima verosimilitud con distribución de probabilidad normal. Desde este método se puede inferir acerca de:

- La definición del máximo reproductivo, esto es el tiempo en que se alcanza la mitad de la asíntota.
- La asíntota representa la magnitud del período reproductivo del año (potencial reproductivo), el cual es un *proxy* del número total de desoves.
- Se pueden definir cuantitativamente los criterios para definir el período de desove que se pretende evaluar (i.e.: veda, duración del máximo de desove). Si se pretende evaluar el 50% del total del período, es decir un 25% antes y después del pico de desove, y se define una distribución asimétrica, como es el caso de la anchoveta del norte de Chile, este estará definido por:

$$t_x = \frac{\text{Ln}(-\text{Ln}(X)/b)}{c}$$

donde X es 0,25 o 0,75 (Tiempo en que se alcanza el 25 o el 75% de la asíntota)

- Así, se puede definir objetivamente la duración del período reproductivo como el tiempo transcurrido en relación al acumulado expresado en la asíntota.

Estos parámetros utilizados como *proxies* de la sincronía y duración de la temporada reproductiva en especies pelágicas fueron calculados desde datos provenientes de muestreos biológico regular realizados por el laboratorio del departamento de pesquerías del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) y el Centro de Investigación Aplicada del Mar

(CIAM) tomando al Índice Gónado Somático (IGS) como fuente de información para los cálculos descritos anteriormente.

Considerando estos parámetros de inicio, máximo y término de la temporada reproductiva estimados para cada temporada del periodo 1995-2016, la modelación biofísica se centró en el máximo reproductivo, esto es el 50% máximo de la curva reproductiva. De esta manera, la temporada reproductiva fue variable entre años en sincronía y extensión de acuerdo a lo observado en la población de anchoveta en el norte de Chile.

5.2.3.4. Submodelo de crecimiento

El modelo de desarrollo de huevos y crecimiento de larvas y juveniles de anchoveta se ha definido a partir de un análisis temperatura-dependiente del crecimiento temprano de anchoveta. Esta aproximación permite establecer un crecimiento diferencial de los individuos en el modelo biofísico de forma de establecer una relación con variables abióticas (temperatura en este caso), en donde los individuos tienen una tasa de incremento en talla por paso de tiempo basado en las condiciones experimentadas en el espacio tridimensional del modelo hidrodinámico. Esto generó una frecuencia de tallas diferente para cada simulación (pulso de desove) realizado al llegar a la edad crítica de 60 días en la cual el individuo se considera pre-reclutado de acuerdo a lo propuesto por Moreno *et al.* (2011). Para esto fueron necesarias curvas de crecimiento empíricas bajo distintos umbrales de temperatura para establecer una relación continua de incremento en talla dependiente de la temperatura. En este estudio se utilizaron las curvas de crecimiento reportadas por Llanos-Rivera (2005) quién a partir de huevos desovados en el ambiente natural desarrolló experimentos de cultivo de larvas de anchoveta hasta que alcanzaron los 16-18 mm de longitud en ambiente controlado a temperaturas de 10, 12, 15 y 18°C. Considerando un esquema de crecimiento lineal y con los parámetros ajustados para cada desarrollo experimental se generó un esquema crecimiento temperatura-dependiente derivado de Regner (1985). Así, para una temperatura ambiental $T_{ind} = T(x_{ind}, y_{ind}, z_{ind}, t)$, los cambios en el tamaño individual (l_{ind}) a lo largo del paso de tiempo Δt fue calculado de acuerdo a:

$$\Delta G = l_{ind}(t + \Delta t) - l_{ind}(t) + g_{ind}(T_{ind})\Delta t$$

donde la tasa de crecimiento individual g es definida por la relación entre la temperatura y las tasas de crecimiento obtenida bajo condiciones experimentales de desarrollo larval y el PLD_{ind} es definido por el tiempo requerido para crecer desde el tamaño a la eclosión $l_{ind}(t_{inicial}) = 2,48$ mm, a $l_{ind}(60)$ = talla a los 60 días de edad.

Al mismo tiempo, la duración del desarrollo embrionario de peces pelágicos es variable y dependiente de la exposición a la temperatura (además de otros factores endógenos), por lo que la modelación de la duración de la etapa de huevo fue desarrollada de manera temperatura-dependiente al igual que las larvas y juveniles. La tasa de desarrollo de huevos se basó en el modelo exponencial de asignación de edad por estadio de Lo (1985) desarrollado para la anchoveta de California *Engraulis mordax*. Este modelo incluye 10 estadios de desarrollo en donde $y_{i,t}$ es la edad (en horas) del estadio i de huevos de anchoveta a la temperatura T bajo la relación:

$$y_{i,T} = a_i e^{b_i T}$$

donde

a y b son parámetros del modelo.

(x,y,z) = posición de los individuos; a = edad de los individuos (días desde el desove); t = tiempo; $V_{u,v,z}$ = velocidad de la corriente a lo largo de los ejes u , v o z ; $V_{buoy}(a)$ = velocidad de boyantes dependiente de la densidad del huevo y el agua de mar; B = comportamiento de migración vertical dependiente de la hora, la profundidad y la edad. Este modelo fue ajustado a los datos experimentales de incubación de huevos de anchoveta a diferentes temperaturas (12, 14, 16, 18 y 20°C) reportados por Claramunt *et al.* (2007) para la anchoveta en el norte de Chile e incorporado en el módulo de crecimiento de ICHTHYOP.

5.2.3.5. Submodelo de mortalidad y superindividuo

El esquema de mortalidad estuvo basado en esquemas de superindividuos (Scheffer *et al.*, 1995; Megrey & Hinckley, 2001; Bartsch & Coombs, 2004; Ospina-Álvarez *et al.*, 2013).

Esta aproximación permite el uso de tasas de mortalidad realistas, incrementando el número de individuos representados por cada partícula simulada. Al comienzo de la simulación, cada superindividuo se le asigna una abundancia inicial, “número del superindividuo”, indicando a cuantos huevos/larvas el superindividuo representa. Este “número del superindividuo” disminuye al aplicar a desviación aleatoria a la tasa de mortalidad diaria para cada uno de los estadios de anchoveta representados. En cada paso de tiempo, el número total de individuos (huevos/larvas) es la suma de la variable “número del superindividuo”. El valor del “número del superindividuo” S en cada paso de tiempo $t+1$ depende el número del superindividuo en el tiempo t , la tasa de mortalidad r , y el paso de tiempo t .

$$S_{t+1}=S_t e^{-rt}$$

Las fuentes de mortalidad fueron aplicadas en el modelo utilizando la aproximación del superindividuo. Las fuentes de mortalidad que fueron incorporadas en el presente estudio estuvieron asociadas a causas conocidas de mortalidad natural: advección fuera de zonas de crianza y efecto letal de temperatura.

5.2.3.6. *Procesos estocásticos*

Considerando que el desarrollo de condiciones realistas para la mayoría de los componentes de liberación basados en conocimiento empírico, los procesos estocásticos en el modelo biofísico fueron restringidos a los componentes de dispersión vertical y horizontal del movimiento. Por otra parte, para establecer el número apropiado de partículas (individuos) en los experimentos de transporte (simulaciones), se realizaron repetidos ensayos en que se aumentó el número de partículas a liberar (1.000, 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 25.000 y 30.000) determinando el promedio grupal y la desviación estándar y determinando el punto en la cual estos estadísticos se estabilizan (Ospina-Álvarez *et al.*, 2013).

5.2.4. *Simulaciones y experimentos de simulación*

Las simulaciones consistirán en el seguimiento de las posiciones y propiedades (variables de estado) de las partículas simuladas (huevos, larvas en saco vitelino, larvas en

alimentación y juveniles de anchoveta) a pasos de tiempo discretos (subdiarios) y durante toda la simulación. Se inicializó el modelo, dada las condiciones de los submodelos temporales y espaciales de desove (para cada pulso de desove a lo largo de toda la temporada reproductiva y bajo el patrón espacial específico). En cada paso de tiempo cada individuo se mueve, crece de acuerdo a la temperatura (y en concordancia, experimenta en el tiempo una serie de estadios), evalúa su estado de mortalidad y finalmente de (pre) reclutamiento, de acuerdo a los submodelos propuestos. Las variables ambientales acopladas al modelo biofísico fueron actualizadas cada paso de tiempo para el modelo en función de la frecuencia a la que las salidas de las configuraciones del modelo hidrodinámico son almacenadas. En este estudio la frecuencia de almacenamiento fue cada 3 horas para analizar procesos subdiarios (e.g. migración vertical diurno-nocturna).

5.2.5. Variables de salida y procesos modelados

Las simulaciones y experimentos realizados generan una gran cantidad de información de salida. Estas salidas estarán caracterizadas por las variables de estado de cada uno de los individuos modelados y sus condiciones ambientales. Para cada paso de tiempo es evaluada la edad, estadio de desarrollo, longitud en milímetros, estado de sobrevivencia, número del superindividuo, longitud geográfica, latitud geográfica, profundidad, áreas geográficas (en zona de desove, de reclutamiento, bahías específicas, zonas de advección, etc.). En base a las simulaciones, se modelaron procesos de transporte, advección fuera de la costa, conectividad entre zonas de desove y potenciales áreas de crianza, movimiento individual en escala subdiaria, sobrevivencia, crecimiento y reclutamiento. Los modelos biofísicos poseen la particularidad de ser espacialmente explícitos y que permiten acceder a información ambiental en el dominio geográfico especificado para la modelación tridimensional (información desde los modelos hidrodinámicos). Esto entrega una visión distinta a los modelos estadísticos de evaluación poblacional tradicionales donde la información poblacional emana de variables agregadas. Los modelos biofísicos generan las condiciones para modelar la historia de vida de los individuos, con sus procesos claves en el espacio y en el tiempo, lo que permite generar información útil en escalas apropiadas a la especie, la cual es independiente a la actividad pesquera y constituye una fuente de información basada en el ecosistema de acuerdo a los lineamientos y recomendaciones

internacionales para el manejo de las pesquerías. Así, la dinámica de una población emerge de la historia de vida de los individuos, pero el ciclo de vida de los individuos y su comportamiento está completamente representado por reglas empíricas que describen, por ejemplo, la mortalidad y las tasas de dispersión (Grimm *et al.*, 2005)

5.2.6. Plataforma computacional para la implementación del modelo biofísico

La implementación de un modelo biofísico tiene altos requerimientos computacionales, pues involucra la lectura de un modelo hidrodinámico de alta resolución, el cálculo numérico de los procesos modelados y la escritura de los archivos de salida ya descritos anteriormente. Para satisfacer estos requerimientos se contó con un nodo de cálculo de última generación implementado en INPESCA, el cual es descrito en detalle en el punto 5.2.6.

5.3. Índices de reclutamiento a partir de modelación biofísica comparados con índices de reclutamiento provenientes de la evaluación de stock.

En base a cada experimento (asociado a condiciones iniciales particulares) propuesto se generaron simulaciones multidecadales (salidas de variables respuesta del modelo biofísico para la serie 1995-2016) las cuales modelaron procesos de transporte, advección fuera de la costa, conectividad entre zonas de desove y crianza, sobrevivencia, crecimiento y reclutamiento. Además una serie de índices fueron extraídos en base a estos procesos modelados, generando una serie de índices interanuales para cada proceso modelado.

5.3.1 Indicadores de reclutamiento, definición de criterios

Este criterio está relacionado con dos aspectos fundamentales, la edad/talla de los individuos y la región en que se encuentren una vez alcanzada dicha edad/talla. De esta manera, los individuos que logran cumplir con dicho criterio han sido considerados pre-reclutados y en conjunto hicieron emerger el indicador de reclutamiento temprano para cada año. Para el caso de anchoveta en el norte de Chile, el proceso de transición a la etapa de juvenil, la adquisición de caracteres morfológicos semejantes al adulto y en consecuencia el inicio de la natación autónoma está relacionado con la edad y no necesariamente con la talla del individuo la que puede ser ampliamente variable (Moreno

et al., 2011). De esta manera, no obstante la incorporación del proceso de crecimiento individual diferencial temperatura-dependiente, el modelo biofísico fue basado en la edad y el criterio de éxito consistió en individuos que alcanzaron los 60 días de edad (talla en la cual terminan la etapa planctónica y los individuos adquieren características de comportamiento similares a la de los adultos; Moreno *et al.*, 2011), y que permanecieron circunscritos a la región ubicada entre el continente y la isolínea de las 50 mn de distancia de la costa largo de toda el área de distribución (ver sección 5.4.2. Definición área de crianza). El índice de sobrevivencia biofísica (asociada al reclutamiento larval) correspondió a la proporción de individuos que cumplieron con el “criterio de reclutamiento”. De esta manera el índice biofísico de sobrevivencia anual se establece en base a:

$$ISBF_{año} = \sum_{i=1}^n s_i * N_{año}^{-1}$$

donde

año = año modelado

s_i = número de individuos exitosos en el pulso de desove i

N = total de individuos liberados en el año

5.3.2. Definición de área de crianza

Una de las características de la zona de estudio en el norte de Chile y sur de Perú es la virtual ausencia de plataforma continental acompañada con un talud continental de gran pendiente (en promedio 10%, equivalente a 6° aprox.). Sólo en el extremo norte hay presencia de plataforma continental, además de las cuencas sedimentarias colgantes de Arica e Iquique sobre el talud continental superior. Aparentemente, la presencia de estas estructuras está asociada al cambio de dirección que sufre la totalidad del margen, incluida la fosa, en la zona llamada “Codo de Arica” (Naveas, 2010). Esta característica involucra que el hábitat de anchoveta no es nerítico, a diferencia de la mayoría de los peces pelágicos pequeños de borde oriental. En consecuencia, para definir el “área de crianza”, necesaria

para evaluar la hipótesis de sobrevivencia producto de la retención costera, se analizaron los patrones de productividad biológica utilizando la clorofila satelital como *proxy*. Se evaluó el patrón medio espacial de la clorofila durante la temporada de máximo desove y se comparó con los registros positivos de estadíos tempranos de anchoveta registrados por el crucero de evaluación directa de biomasa desovante (MPDH). El área de crianza correspondió a aquella región que cumplió con tener un umbral de producción biológica apto para la crianza de juveniles de anchoveta donde se hayan registrado sobre el 95% de estadíos tempranos históricos.

5.3.3. Índice de reclutamiento obtenido mediante modelación biofísica

Una de las características esenciales de este esquema de modelación es la capacidad de obtener indicadores espaciales y temporales en distintas escalas. De esta manera, el índice de reclutamiento larval (pre-reclutamiento poblacional) se basó en las condiciones iniciales espaciales y temporales de desove; y posterior al proceso de transporte donde actúan los procesos de crecimiento, mortalidad y la consecuente sobrevivencia se manifiesta en componentes de variabilidad temporal y espacial. El índice de sobrevivencia biofísica fue calculado en forma continua para todos los pulsos de desove modelados, donde se cuantifican todos los individuos que cumplan con el criterio de reclutamiento. Temporalmente, esta proporción de éxito fue integrada, primero, en escala mensual para reconstruir el proceso de reclutamiento y estimar épocas con máximos pulsos de individuos juveniles (información relevante para la toma de decisiones respecto a cautelar la fracción recluta de la población de anchoveta) y luego en escala anual para analizar la capacidad del modelo en reproducir el reclutamiento del año siguiente a la modelación ($t+1$). Por otra parte, se calculó la expresión espacial del índice de sobrevivencia biofísica en base al proceso de dispersión que cada uno de los individuos desovados experimenta durante el transcurso de su historia de vida y hasta que alcanzan el criterio de reclutamiento. Esto se realizó discretizando el área distribucional del recurso y cuantificando todos aquellos individuos que cumplen con el criterio de reclutamiento en el espacio. Al provenir de la asociación de un modelo hidrodinámico con submodelos biológicos, ambos índices implícitamente integran el efecto intra-anual de la variabilidad de las condiciones oceanográficas y de aspectos demográficos asociados al proceso reproductivo y entregan

señales claras cuando existen variaciones en las condiciones oceanográficas (transporte-dispersión-advección fuera de la costa) asociadas al proceso de retención y transporte en la región de distribución de los reclutas.

Para la obtención de un índice de (pre) reclutamiento biofísico es preciso contar con información que dé cuenta de las condiciones iniciales de abundancia del desove anual (relacionadas con el potencial reproductivo del stock desovante) y la sobrevivencia hasta alcanzar la edad objetivo (60 días en el presente estudio). La sobrevivencia es explícitamente obtenida en el modelo biofísico, sin embargo, la magnitud del desove anual debe ser proporcionada mediante información auxiliar. En el norte de Chile se realiza cada año desde 1995 (a excepción de los años 1998 y 2010) el crucero destinado a la estimación de la biomasa desovante mediante el método de producción diaria de huevos. Uno de los principales productos generados del análisis de la información provista por este crucero, es la producción diaria de huevos por unidad de área, además del área efectiva de desove para la especie (ver Cubillos *et al.*, 2007 para detalles), lo que permite estimar la producción total de huevos en toda el área de desove por día a lo largo de la temporada principal de desove. Luego, considerando que en presente estudio se ha estimado la duración (en días) de la temporada de desove es posible obtener un estimado de la abundancia total del desove anual el cual puede ser utilizado para el cálculo de un índice de reclutamiento biofísico. De esta manera el índice de reclutamiento biofísico fue calculado de acuerdo a:

$$IRB = P_0 * A * TD * ISBF$$

donde,

IRB = Índice de Reclutamiento biofísico

P₀ = Producción diaria de huevos

A = Área efectiva de desove

TD = Duración de la temporada de desove (en días)

ISBF = Índice de sobrevivencia del modelo biofísico

5.3.4. Índices de transporte-advección

Se calculó el índice de transporte-advección, el cual se basa en la identificación-cuantificación de individuos que sean transportados fuera del área considerada como área de reclutamiento (fuera de la costa). Este índice, de la misma manera que el índice de reclutamiento, tiene una expresión temporal y espacial. Este índice permite identificar zonas que presenten consistentemente patrones de advección (fuentes de pérdida hacia la población) y su variabilidad interanual. El complemento del índice de advección es el índice de retención, el cual describe las zonas de mayor probabilidad de éxito del proceso reproductivo, asociadas a bajos niveles de advección y permanencia en sectores con condiciones apropiadas para el crecimiento y la sobrevivencia (áreas productivas y protegidas).

5.3.5. Piezas de información para contrastar los resultados biofísicos

Uno de los desafíos de este estudio es que el modelo biofísico simule el proceso de sobrevivencia entre el desove y la etapa previa al reclutamiento. El entendimiento o identificación de los principales factores que modulan el éxito/fracaso de una clase anual resulta de interés principal para el estudio de la dinámica poblacional y para el manejo pesquero. En este contexto, es esencial el análisis comparativo de los resultados del proceso de simulación respecto de otras piezas de información que incorporen observaciones directas de la población de anchoveta. A continuación se describen algunas piezas de información con las que se compararon los resultados del modelo biofísico.

5.3.5.1. Índices de reclutamiento provenientes de la evaluación de stock de anchoveta

En el contexto de un convenio de desempeño con el Ministerio, Fomento y Turismo de Economía, el Instituto de Fomento Pesquero desarrolla evaluaciones de stock anuales para la anchoveta entre el sur del Perú y el norte de Chile, con el objetivo de determinar el estatus y las posibilidades de captura biológicamente aceptables (Espíndola *et al.*, 2016). La evaluación de stock es del tipo mono-específica y cubre información de la actividad entre la XV y II Regiones para Chile. La evaluación considera un stock para la especie y donde la dinámica poblacional es dominada por los procesos mortalidad, crecimiento y reclutamiento. Los principales supuestos que sustentan a la evaluación son:

- La población de anchoveta está distribuida desde el sur del Perú y norte de Chile (16°S-24°S), y constituye una única unidad de stock.
- La población es cerrada por lo tanto las pérdidas ocurren por mortalidad natural y por pesca.
- Se asume la entrada de dos reclutamientos por año y dos desoves.
- La mortalidad por pesca es el resultado de la interacción entre la mortalidad por pesca semestral y el patrón de explotación edad y flota (Chile, Perú) específico.
- Se asume que los desembarques son un buen *proxy* de las capturas

No obstante el modelo conceptual del modelo de evaluación difiere parcialmente del propuesto en este proyecto, se considera que los estimados de reclutamiento semestral pueden ser integrados en una escala anual para ser contrastados con las estimaciones provenientes de la modelación biofísica. Además, la integración de la información de capturas de Perú permitió indagar sobre posibles efectos de la relación fuente/sumidero entre el área de desove de la zona norte de Chile respecto del área total considerada en la evaluación de stock.

5.3.6. *Patrones de conectividad, crecimiento y mortalidad*

Las fuentes de mortalidad incluidas en este modelo están asociadas a condiciones extremas de temperatura y a la advección producto de las condiciones oceanográficas. Para analizar el efecto de estas variables en una escala espacial y relacionarlo con los procesos oceanográficos que caracterizan a la región de estudio en una perspectiva interanual, se discretizó esta información por año y por banda latitudinal. De esta manera, se calculó la proporción de individuos muertos por advección y temperatura en cada celda latitudinal e relación a la abundancia del desove (liberación) en esa misma banda. Al mismo tiempo, se analizó la capacidad de retención de cada celda, para entender los patrones de éxito/fracaso reproductivo, respecto a los procesos oceanográficos. A su vez, a partir de la duración larval pelágica (60 días) y las fechas de desove se estableció el patrón temporal de los pulsos de reclutamiento larval anual, lo que puede ser utilizado para la discusión respecto al establecimiento de ventanas temporales de veda para el resguardo de reclutas.

Las vías de transporte, el nivel de dispersión y finalmente la conectividad poblacional mediante estadíos tempranos son productos generados en la modelación biofísica. Para entender la relación espacio-temporal entre el desove y el reclutamiento larval, se establecieron matrices de dispersión espacial que permiten establecer las relaciones "fuente - sumidero". No obstante esta última definición proviene de la ecología de poblaciones sésiles, donde la "fuente" corresponde a los bancos donde se distribuye la fracción reproductora que libera larvas pelágicas, mientras que el "sumidero" corresponde a las áreas donde las larvas encuentran un sustrato adecuado al momento de alcanzar las condiciones fisiológicas propicias para asentarse. En el caso de poblaciones pelágicas como la anchoveta, esta definición ha sido adaptada asumiendo que la "fuente" corresponde a la(s) zona(s) de desove y el "sumidero" son las posibles áreas de crianza, las cuales son definidas por las condiciones del hábitat que son favorables para la sobrevivencia de estadíos tempranos hacia el reclutamiento. La definición de áreas de crianza resulta compleja y, muchas veces variable en el sistema pelágico, sin embargo las definiciones adaptadas en este estudio responden a las áreas de mayor productividad biológica y donde han sido registrados históricamente los estadíos tempranos de desarrollo temprano (ver punto 5.4.2. Definición de áreas de crianza).

En este contexto se generó un marco de referencia espacial zonificando el dominio modelado desde dos perspectivas complementarias que definen el destino final de los individuos que han alcanzado los 60 días de edad: la primera asume como fuente el área de desove evaluada para cada año (ver punto 5.3.3.3. *Submodelo de distribución espacial del desove*), incluyendo su variabilidad espacial interanual, y como sumidero los cuadrantes que caracterizan a: i) la zona costera de Chile (fracción del área de crianza en Chile; A1); ii) la zona costera de Perú (fracción del área de crianza en Perú; A2); iii) área por fuera del sector costero de Chile hasta las 200 mn (límite del mar territorial chileno; A3); iv) área por fuera del sector costero de Perú hasta las 200 mn (límite del mar territorial peruano; A4), y; v) zona oceánica frente a Chile y Perú (A5). La segunda, se generó desde una perspectiva de regiones administrativas, donde se cuantificó el destino de los desoves que ocurrieron en las regiones de Arica y Parinacota, de Tarapacá y de Antofagasta para indagar en posibles patrones de conectividad diferencial a lo largo de la zona de desove de anchoveta en el norte

de Chile. Los cuadrantes descritos para la evaluación de las matrices de conectividad se esquematizan en la **Figura 7**.

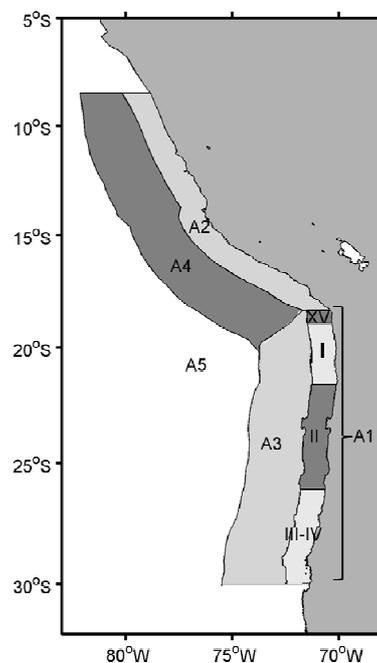


Figura 7. Marco de referencia espacial para la determinación de matrices de conectividad para evaluar las relaciones fuente-sumidero; A1: área costera de Chile (50 mn), A2: área costera de Perú (50 mn), A3: área entre las 70 y 200 mn desde la costa de Chile. A3: área entre las 70 y 200 mn desde la costa de Perú, A5: área oceánica frente a Chile y Perú.

5.3.5. Análisis de sensibilidad para la identificación de forzantes biofísicos

Como se ha descrito previamente, el esquema de modelación biofísica planteado incluyó condiciones iniciales realistas a través de los distintos submodelos establecidos, así como también un esquema de movimiento biológico que incluyó flotabilidad de huevos y un esquema de migración vertical para larvas y juveniles de anchoveta. El éxito individual del reclutamiento biofísico es una respuesta binomial que representa el "éxito" o "fracaso" de alcanzar o permanecer en el área de crianza/reclutamiento para cada individuo modelado. Esta respuesta fue evaluada en función del "criterio de reclutamiento" definido previamente (ver punto 5.4.1). El objetivo del análisis de sensibilidad fue evaluar la respuesta media de los experimentos de simulación biofísica interanual respecto a una variable dependiente (en este caso el éxito del reclutamiento). El análisis de sensibilidad se realizó usando un

análisis de varianza multi-factor mediante el módulo GLM (modelos lineales generalizados) de R (R Core Team, 2012). Las variables independientes seleccionadas para el análisis fueron: año de desove, mes de desove, zona de desove, profundidad de desove y distancia de la costa del desove. Regresiones logísticas fueron usadas para evaluar si el éxito del reclutamiento individual difiere significativamente de acuerdo a las condiciones iniciales. Las zona de desove fue dividida siguiendo los límites regionales administrativos, a saber: i) región de Arica y Parinacota (18° 21'S a 18° 56'S), ii) región de Tarapacá (18° 56'S a 21° 36'S) y, iii) región de Antofagasta (21°36'S a 25°40'S).

5.4. Identificación de forzantes oceanográficos-atmosféricos hacia crecimiento, sobrevivencia, transporte de huevos y larvas de anchoveta.

Considerando que la identificación de factores críticos del hábitat de anchoveta en el norte de Chile responde a un análisis que integra: i) escalas espaciales y temporales características, ii) aspectos ambientales físico-biológicos, y iii) las distintas fases de la historia de vida temprana de anchoveta en la región (huevos, estados larvales y post-larvales y juveniles), se estableció la necesidad de abordar el análisis desde una perspectiva multifactorial e interdisciplinaria. En este contexto se realizó una búsqueda bibliográfica, considerando tanto documentos primarios (publicaciones científicas en revistas indexadas) como documentos secundarios dentro del área específica de conocimiento que interesa al estudio. En este proyecto, entenderemos por factores críticos del hábitat a *aquellos factores, variables o índices, que representen procesos físicos, químicos o biológicos de diferente escala espacio-temporal, que sean útiles para delimitar el hábitat efectivo de estadios tempranos, juveniles y adultos de anchoveta en la región norte de Chile, y modulen significativamente su variabilidad.*

La búsqueda bibliográfica se desarrolló en forma sistemática, considerando al menos los siguientes criterios: precisión en el tema de búsqueda y objetivo, selección de palabras claves o descriptores, aplicación de operadores lógicos que determinan la forma en que se agrupan los descriptores, y aplicación de técnicas para ampliar o reducir la búsqueda. La clasificación bibliográfica recopilada se estableció con criterios basados en la relevancia

hacia la determinación de factores críticos del hábitat, la disponibilidad de información (sin restricciones de uso) y la calidad y confiabilidad de la información. Asimismo, se generó un repositorio donde se dispone de la bibliografía (y también de datos hacia el objetivo específico 4). El repositorio se ha puesto a disposición de todos los participantes del proyecto.

5.4.1. Datos satelitales

Se utilizaron datos provenientes de sensores satelitales para las variables temperatura, clorofila (color), viento superficial, nivel medio del mar (anomalías), corrientes geostroficadas. Los periodos abarcados y resolución espacio-temporal de cada producto de informan en la Tabla III.

5.4.1.1. Temperatura superficial del mar

Los datos de TSM fueron obtenidos de dos fuentes distintas: i) desde Pathfinder del *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center* (PODAAC; <http://podaac-www.jpl.nasa.gov>) para la serie 1985-2009, y ii) desde MODIS-Aqua Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) para la serie 2002-2016. La resolución espacial fue de 4 km y temporal diaria en ambos casos. El procesamiento de la información, incluyó en primer lugar, la extracción de la zona de interés (10°-30°S y 80°W-costa), desde imágenes de TSM globales. Los datos mensuales de día (ascendente) y noche (descendente) fueron promediados aritméticamente. Posteriormente se construyó la señal anual o climatología mensual a partir de los promedios de todos los meses correspondientes.

5.4.1.2. Viento satelital

La información de viento superficial, para el período entre julio 1987 hasta mayo 2016, fue obtenida de los datos combinados provenientes de re-análisis (*Cross-Calibrated Multi-Platform*, CCMP) provenientes del *Remote Sensing Systems* (REMSS) usando el método VAM (*Variational Analysis Method*) para producir una grilla de alta resolución (<http://dx.doi.org/10.5067/CCF30-01XXX>) (NASA/GSFC/NOAA 2009, Atlas *et al.* 2010). Esta Fuente de datos fue preferida a la información satelital proveniente de los

escaterómetros QuikSCAT (<ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/OceanWinds>) y ASCAT (<ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/OceanWinds>), que si bien en conjunto abarcan el período entre 1999-2016, experimentan serias dificultades a la hora de acoplar apropiadamente ambas series, debiendo ser analizadas por separado.

5.4.1.3. Corrientes geostróficas y energía cinética

Se utilizaron datos de altimetría satelital, específicamente de la anomalía del nivel del mar y la velocidad geostrófica global distribuida por el programa AVISO (*Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data*), con un intervalo temporal diario en una malla global de proyección Mercator de $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ para el período 1993-2016 (<http://aviso.oceanobs.com>).

La energía cinética (EKE, *eddy kinetic energy*), definida como la energía turbulenta potencial disponible para la formación de remolinos de mesoescala, fue calculada siguiendo a Hormazábal *et al.* (2004), según la siguiente ecuación:

$$EKE = 1/2 (((Ug - (Ug))^2 + ((Vg - (Vg))^2))$$

Donde Ug y Vg corresponden a la anomalía de la velocidad geostrófica zonal y meridional como promedio temporal.

5.4.1.4. Clorofila superficial del mar

Para la clorofila satelital se utilizó la información proveniente del programa MODIS Aqua Level-3 globales (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/ftp.html>) para el período julio 2002 hasta junio 2017, con una resolución espacial de 4×4 km y temporal diaria.

Tabla III. Información satelital utilizada en el análisis de forzantes oceanográficos-atmosféricos en la región norte de Chile y sur de Perú.

Variables	Resolución	Período	Fuente	Referencia
TSM	4 km - diaria	1985-2009	Pathfinder	PODAAC; http://podaac-www.jpl.nasa.gov .
TSM	4 km - diaria	2002-2016	MODIS-Aqua. Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer)	PODAAC; http://podaac-www.jpl.nasa.gov .
Viento superficial	~25 km - diario	julio 1987 hasta mayo 2016	CCMP	http://dx.doi.org/10.5067/CCF30-01XXX . NASA/GSFC/NOAA 2009, Atlas <i>et al.</i> 2010.
Corrientes geostróficas	~25 km - semanal	1993-2016	Programa AVISO	http://aviso.oceanobs.com
Altura del nivel del mar	~25 km - semanal	1993-2016	Programa AVISO	http://aviso.oceanobs.com
Energía cinética	~25 km - semanal	1993-2016	Programa AVISO	http://aviso.oceanobs.com
Clorofila	4 km - diaria	2002-2015	MODIS Aqua Level-3 globales	http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/ftp.html

5.4.2. Datos hidrográficos

Con el propósito de analizar información hidrográfica de la región de estudio, se solicitó formalmente al Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura, las bases de datos hidrográficas de los cruceros correspondientes a: i) MPDH anchoveta XV-II Regiones (1998-2016), ii) Biomasa acústica de anchoveta en XV-II Regiones (1997-2016), y iii) cruceros MOBIO (zona norte de Chile), privilegiando la información hidrográfica en la región costera del norte de Chile. Después de recepcionada la información desde el FIPA, el proceso de validación de la data desafortunadamente reveló archivos incompletos en la mayoría de los casos, lo que posibilitó solo el uso parcial de información en los años con información hidrográfica completa (temperatura, salinidad, densidad y concentración de oxígeno disuelto). Lo anterior redujo la información hidrográfica a los siguientes años: i) cruceros RECLAN (1999, 2001, 2007, 2012, 2014, 2015, 2016), y ii) cruceros MPDH (2015, 2016). La información hidrográfica finalmente utilizada en este capítulo se presenta en la Tabla IV.

Tabla IV. Datos de CTDO obtenidos para el proyecto, provenientes de cruceros desarrollados en el marco de la evaluación directa de anchoveta en la región norte de Chile. Fuente: Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura.

Año	Proyecto (región norte de Chile)	Latitud - Longitud	VARIABLES	N° Estaciones Oceanográficas
1999	FIP N° 1999-11. Evaluación del reclutamiento de anchoveta en la I y II regiones.	18°22'S-23°26'S	T,S,D,O2,F(Cl-a)	66
2001	FIP N° 2001-11. Evaluación del reclutamiento de anchoveta en la I y II Regiones, Temporada 2001-2002.	18°22'S)-24°50'S).	T,S,D,O2,F(Cl-a)	77
2007	FIP 2007-02. Evaluación hidroacústica de Anchoveta.	18°20'S y 25°00'S	T,S,D,O2,F(Cl-a)	102
2012	FIP 2012-11. Evaluación acústica de Anchoveta.	18°22'S y 24°40'S	T,S,D,O2,F(Cl-a)	103
2014	Evaluación Hidroacústica del Reclutamiento de Anchoveta en la XV, I y II Regiones, año 2014.	18°22'S-24°40'S	T,S,D,O2,F(Cl-a)	99
2015	Evaluación Hidroacústica del Reclutamiento de Anchoveta en la XV, I y II Regiones, Año 2015.	18°22'S-24°40'S	T,S,D,O2,F(Cl-a)	99
2015	FIP 2012-06. Evaluación del stock desovante de la Anchoveta (MPH).	18°25'S y 26°03'S	T,S,D,O2,F(Cl-a)	512
2016	IFOP 2014. Evaluación del stock desovante de la Anchoveta (MPH).	18°25'S y 26°03'S	T,S,D,O2,F(Cl-a)	596
2016	Evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta en la XV, I y II regiones, año 2016.	18°22'S-24°40'S	T,S,D,O2,F(Cl-a)	99

5.4.3. Datos de estaciones costeras

Se obtuvo datos de TSM y nivel del mar del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) para estaciones costeras de Arica, Iquique y Antofagasta que abarcó los períodos de 1990-2015 para TSM y nivel del mar. Para el caso de la dirección y rapidez del viento se recopiló datos de estaciones costeras desde la Dirección Meteorológica de Chile para las localidades de Iquique y Antofagasta, contemplando el período entre 2000 y 2017.

Originalmente se propuso utilizar la información costera provenientes del Servicio Meteorológico de la Armada (Servimet) para estaciones costeras de las localidades de Arica, Iquique y Antofagasta. Para ello se obtuvo datos de dirección y rapidez del viento, altura del nivel del mar, con registros cada 3 horas según lo siguiente: a) Vientos: Arica

(1992-2017), Iquique (2007-2016), Antofagasta (1991-2017), b) Nivel del mar: Arica (1992-2017), Iquique (2007-2016), Antofagasta (2005-2012). En tanto, para la TSM los datos provenientes de esta fuente de información fueron muy escasos y por lo tanto no se analizaron. Sin embargo, el procesamiento y análisis preliminar de esta información arrojó resultados que escapan al patrón de distribución histórico, brechas importantes de datos, y datos “repetidos” que fueron considerados erróneos y poco confiables hacia el análisis, por lo que no fueron utilizados.

5.4.4. Índices climáticos

Se obtuvo también información de índices climáticos con el propósito de indagar sobre la asociación entre la variabilidad ambiental física de la región norte de Chile, con la región del Pacífico ecuatorial a través del análisis del índice de oscilación del sur, anomalías de TSM en la región El Niño 3.4 (www.cpc.ncep.noaa.gov). Asimismo, se utilizó el Índice Oceánico de El Niño (ONI) que constituye el estándar de la NOAA para la identificación de eventos cálidos (El Niño) y eventos fríos (La Niña) en el océano Pacífico tropical. Este índice se calcula como la media móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar para la región El Niño 3.4, es decir, la franja comprendida entre 5°N-5°S y 120°-170°W (www.ggweather.com).

5.4.5. Procesamiento y análisis de la información

En la caracterización de la región costera del norte de Chile, se utilizaron diferentes fuentes de información provenientes de sensoramiento remoto, a saber: temperatura superficial del mar (TSM), clorofila, esfuerzo del viento superficial, corrientes de Ekman y corrientes geostroficadas, EKE y remolinos de mesoescala, y frentes térmicos. El análisis de esta información correspondió a: a) climatologías mensuales, b) Funciones ortogonales empíricas (FOEs), c) gráficas de espacio-tiempo en la escala anual e interanual (diagramas de Hovmöller), d) análisis en el espacio del tiempo y la frecuencia (Wavelets). Asimismo, se realizaron análisis de la estructura espacial horizontal y vertical de datos hidrográficos (datos CTDO desde cruceros MPDH y de evaluación acústica), y de series costeras de TSM, nivel del mar y viento (estaciones costeras en las localidades de Arica, Iquique y Antofagasta).

5.4.5.1. Procesamiento y análisis de datos satelitales

i) Temperatura superficial del mar: El procesamiento de la información satelital se realizó en la mayoría de los casos, para la región comprendida entre los 10 y 30°S y entre la costa y los 80°W. Para el caso de la TSM y la clorofila, los datos fueron interpolados ordenando las series estacionalmente, utilizando *spline* cúbico (rutina MatLab versión 2016). Además, los extremales fueron recuperados mediante interpolación climatológica. El procesamiento de las imágenes diarias de TSM satelital (4x4 km) incluyó, en primer lugar la extracción de la zona de interés desde imágenes de TSM globales. Los datos mensuales de día (ascendente) y noche (descendente) fueron promediados aritméticamente.

ii) Viento satelital superficial: para la secuencia de imágenes satelitales de velocidad del viento se ha utilizado una serie de vientos provenientes de re-análisis (Cross-Calibrated Multi-Platform, CCMP) que comprende el período entre julio 1987 hasta mayo 2016, y tiene la ventaja de constituir una serie continua de casi tres décadas. El esfuerzo del viento se determinó como función de las velocidades del viento (Sverdrup, 1947), siguiendo la siguiente ecuación:

$$\tau = C_D \rho_a \vec{U} |U|$$

Donde: C_D : Coeficiente de arrastre, ρ_a : Densidad del aire en la interface océano – atmósfera, \vec{U} : Vector de la velocidad del viento a 10 metros. Siguiendo a Large & Pond (1981), el esfuerzo de viento se definió de acuerdo a los rangos de velocidad del viento, cambiando el coeficiente de arrastre (adimensional). U_{10} : Velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie:

$$\rho_a = 1.22 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

El esfuerzo del viento meridional y zonal se determinó mediante:

$$\begin{cases} \tau_x = \rho_a C_D u |U_{10}| \left[\frac{N}{m^2} \right] \\ \tau_y = \rho_a C_D v |U_{10}| \left[\frac{N}{m^2} \right] \end{cases}$$

La velocidad (U_{Ek} , V_{Ek}) de Ekman medida en $cm\ s^{-1}$ separa las ecuaciones de Ekman (bajo supuesto de linealidad). El esfuerzo del viento está en balance con la fuerza de Coriolis, y está calculado de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} -fV_{Ek} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \\ +fU_{Ek} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \end{aligned}$$

La deriva de Ekman fue calculada desde la superficie hasta los 100 metros de profundidad.

iii) Corrientes geostróficas: Por su parte, los resultados de las corrientes geostróficas representan a los patrones climatológicos de la circulación en la zona de estudio basado en los promedios aritméticos de las componentes de las corrientes satelitales entre 2002 y 2017. La circulación geostrófica proviene de imágenes satelitales diarias de altimetría provistas por el programa AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data) de Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) ubicado en <https://www.aviso.altimetry.fr/en>. Los resultados se presentaron como circulación mensual.

iv) Energía cinética: La energía cinética (EKE, eddy kinetic energy), definida como la energía turbulenta potencial disponible para la formación de remolinos de mesoescala, fue calculada siguiendo a Hormazábal *et al.* (2004), según la siguiente ecuación:

$$EKE = 1/2 (((Ug - (Ug))^2 + ((Vg - ((Vg))^2))$$

Donde Ug y Vg corresponden a la anomalía de la velocidad geostrofica zonal y meridional como promedio temporal.

v) Frentes térmicos: Por otra parte, se utilizaron imágenes de temperatura superficial del mar (2002-2017) del satélite MODIS-Aqua (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), para la determinación de frentes térmicos. En la zona de estudio y por la falta del aporte de aguas dulce provenientes de ríos, los gradientes térmicos ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$) superficiales indican la presencia de frentes que son principalmente originados por la surgencia costera (Letelier, 2009). Los gradientes térmicos se determinaron siguiendo la metodología propuesta por Letelier *et al.* (2010). Para simplificar el reconocimiento de los valores estos fueron escalados por 100, es decir, valores entre 0,01 a 0,1 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ se presentaron entre 1 a 10 $^{\circ}\text{C}/\text{km} \times 10^{-2}$.

vi) Remolinos de mesoescala: Utilizando imágenes diarias de altimetría del programa AVISO (1993-2017) se identificó los patrones climatológicos mensuales donde predominan remolinos de mesoescala. A partir de datos de corrientes geostroficas se determinó el parámetro de Okubo (1970) – Weiss (1991). Este indicador (OW) compara el campo de deformación normal (S) con la vorticidad (ω) del océano en función de un valor crítico calculado como el 20% de la desviación estándar del campo analizado Isern-Fontanet *et al.* (2003, 2006), Chelton *et al.* (2007), Chaigneau *et al.* (2008).

$$OW = Sn^2 + Ss^2 - \omega^2$$

Los remolinos de mesoescala pueden estar relacionados con la dinámica del desove y la retención de larvas y juveniles en peces pelágicos (Nakata *et al.*, 2000). Para relacionar la ocurrencia de remolinos de mesoescala y submesoescala con el proceso de desove de la anchoveta, se obtuvo el campo de altimetría provisto por el ROMS hijo, el cual permite analizar estructuras no observables por el satélite, para cada día a lo largo del período de duración de los cruceros de evaluación del desove (ver punto 5.3.3.3. Submodelo de distribución espacial del desove). De esta manera se obtuvo el patrón espacial de las corrientes superficiales que manifiesta aquellas estructuras de meso y submesoescala que resultaron con coherencia y persistencia en el área y periodo de desove. Sobre este campo

de corrientes se aplicó el parámetro de OW y se cuantificó la cantidad de estaciones positivas y la proporción del desove que estuvo asociado a remolinos estacionarios que pueden actuar como formas de retención de huevos y larvas de anchoveta en el sector costero.

5.4.5.2. *Climatologías*

La distribución espacial del ciclo anual de las variables (climatologías, Estienne & Godard 1970) incluyó a las variables TSM, clorofila, esfuerzo del viento superficial, velocidad de la deriva de Ekman, velocidad geostrófica y energía cinética asociada a remolinos (EKE). La extensión de las series de datos para el análisis climatológico considerada para la región entre los 10°S-30°S de latitud y entre la costa y los 80°W de longitud, es aquella descrita en la Tabla III.

5.4.5.3. *Funciones Ortogonales Empíricas (Feos)*

El análisis de la información orientada a la descripción de la variabilidad ambiental física en la escala local y regional la región norte de Chile y sur del Perú, contempló también el análisis en el dominio del tiempo por medio de la técnica de Funciones Ortogonales Empíricas (Feos, von Stich & Sires, 1999), considerando a la temperatura superficial del mar, la clorofila-a, el esfuerzo del viento y deriva de Ekman, la velocidad geostrófica, la energía cinética asociada a remolinos de mesoescala y los frentes térmicos.

El análisis de Funciones Ortogonales Empíricas es una técnica estándar para eliminar la información redundante con la mínima pérdida de variabilidad, proyectando el conjunto de datos en un nuevo espacio de menor dimensión que el original, donde las nuevas variables (dimensiones) representan aquellas direcciones del espacio donde los datos tienen mayor varianza (Preisendorfer & Mobley 1988). La técnica reduce la dimensión del espacio preservando el máximo de varianza de la muestra, y donde los primeros vectores del nuevo espacio son aquellos que pueden corresponder a patrones dominantes (en el sentido de la variabilidad de la muestra que representan).

Esta metodología permitió extraer la estructura espacial y la variabilidad temporal, tanto de forzantes asociados a la dinámica del sistema (esfuerzo del viento y velocidad de Ekman, corrientes geostróficas, energía cinética), como de variables vinculadas a procesos biológicos (temperatura, clorofila), cuya aplicación sólo dependió de consideraciones estadísticas (Barnett & Patzert, 1980; Kelly 1985). Las FOE permitieron cuantificar la varianza total de las series temporales (en las componentes zonal y meridional) en modos ortogonales o independientes entre sí. De esta manera se obtienen modos o estructuras que contienen el mayor porcentaje de la varianza, que representen a las señales dominantes (en el sentido de la variabilidad de la muestra que representan), quedando en los modos inferiores las contribuciones asociadas con otro tipo de procesos o escalas.

En gran parte del análisis, se usó la técnica de FOE para parámetros escalares, como por ejemplo, distribución vertical de la temperatura superficial del mar, en tanto que la técnica de FOEC fueron aplicadas a parámetros vectoriales, como por ejemplo los componentes de las corrientes superficiales y el esfuerzo del viento. Sin embargo para extraer la estructura espacial y la variabilidad temporal de forzantes dinámicos (vectoriales) con es el caso del esfuerzo del viento y las corrientes geostróficas, se utilizaron las funciones empíricas ortogonales complejas, que se detalla a continuación.

$$W_{tk}(\vec{x}_i) = U_{tk}(\vec{x}_i) + V_{tk}(\vec{x}_i)\hat{i}$$

que denota la velocidad bidimensional en el tiempo t_k con $k = 1, \dots, K$ y las localizaciones \vec{x}_i con $i = 1, \dots, N$.

$$R(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \overline{W_{tk}(\vec{x}_i)} W_{tk}(\vec{x}_j)$$

donde \bar{u} representa el complejo conjugado de u .

Al determinar las funciones propias $\phi_n(\vec{x}_i)$ y valores propios λ_n de la matriz $R(\vec{x}_i, \vec{x}_j)$ es definida por:

$$\sum_{i=1}^N R(\vec{x}_i, \vec{x}_j) \phi_n(\vec{x}_i) = \lambda_n \phi_n(\vec{x}_i), \quad i = 1, \dots, N$$

Ya que la matriz de correlación es Hermitiana, esto es $R(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = \overline{R(\vec{x}_j, \vec{x}_i)}$, los vectores propios complejos satisfacen la condición de ortogonalidad

$$\sum_{i=1}^N \overline{\phi_n(\vec{x}_i)} \phi_m(\vec{x}_i) = \delta_{ij}$$

donde los valores propios ϕ_n son reales y positivos.

Los vectores propios son llamados modos complejos empíricos ortogonales y la información se expande la forma:

$$W_{tk}(\vec{x}_i) = \sum_{n=1}^N E_n(t_k) \phi_n(\vec{x}_i)$$

donde las amplitudes complejas $E_n(t_k)$ están dados por

$$E_n(t_k) = \sum_{i=1}^N \overline{\phi_n(\vec{x}_i)} T_{tk}(\vec{x}_i)$$

y se sigue que

$$\sum_{k=1}^K \overline{E_n(t_k)} E_m(t_k) = \lambda_n \delta_{nm}$$

As, las amplitudes de dos modos diferentes no están correlacionados en el tiempo y los valores propios son el promedio de la energía de los modos. La suma de los valores propios es igual al total de la energía.

$$\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \overline{T_{tk}(\vec{x}_i)} T_{tk}(\vec{x}_i) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \overline{E_n(t_k)} E_n(t_k) = \sum_{i=1}^N \lambda_i$$

El número de modos espaciales $M \leq K$ a considera será determinado según la cantidad de energía a ser representada y se utiliza la siguiente expresión para determinar este número de modos espaciales.

$$\frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i}{\sum_{i=1}^K \lambda_i} \leq 0.80$$

5.4.5.4. Diagramas de variabilidad espacio-temporal (Diagramas de Hovmöller)

La distribución espacial de las variables oceanográficas y climáticas como TSM, viento superficial (velocidad y esfuerzo del viento), velocidades geostróficas, clorofila, EKE, frentes térmicos, se analizaron asimismo a través de diagramas de espacio-tiempo denominados diagramas Hovmöller. Estos diagramas fueron construidos considerando los primeros 20 kilómetros desde la costa, en el espacio latitud/longitud versus tiempo, tanto para las estelas estacional como interanual.

5.4.5.5. Correlación cruzada

La asociación entre las series filtradas en las diferentes escalas consideradas en el análisis, se evaluaron a través de análisis de correlación cruzada. La función de correlación cruzada es una medida útil para ver el grado de fuerza asociativa entre dos series de tiempo. Si la función de covarianza cruzada entre X_i e Y_{i+k} está definida por:

$$\gamma_{xy}(k) = E[(x_t - \mu_t) [Y_{t+k} - \mu_{t+k})]$$

Es decir, la covarianza entre X e Y a k intervalos o retardos del tiempo t , para $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ entonces la función de Correlación Cruzada fue definida por:

$$\rho_{xy}(k) = \frac{\gamma_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y}$$

5.4.5.6. Transformada de Wavelet

Para estudiar el comportamiento estacional e interanual de las series de datos se utilizó la Función Transformada de Wavelet (Daubechies 1992, Kaiser 1994, Burrus & Gopinath

1998). Las wavelets son funciones matemáticas que se pueden utilizar para filtrar series temporales de datos y analizar la variación de su contenido espectral, ofreciendo una representación tiempo versus frecuencia más precisa para señales no estacionarias (por ejemplo el esfuerzo de viento). Al representar la evolución temporal del espectro de la señal se puede localizar en el tiempo la ocurrencia de discontinuidades y variaciones que se escapan a los métodos habituales de análisis. La transformada de wavelets también es reversible, es decir, permite pasar de un dominio a otro (tiempo y frecuencia en este caso) conservando la información relativa al tiempo estando en el dominio de la frecuencia, y viceversa (a diferencia del análisis de Fourier), estableciendo que cualquier base de funciones wavelets es de soporte compacto, posibilitando localizar simultáneamente en tiempo y en frecuencia.

5.4.5.7 Hidrografía (CTDO data)

En el presente proyecto se propuso analizar la hidrografía de la región de estudio a través de la distribución horizontal y vertical de la temperatura, salinidad, concentración de oxígeno disuelto y de clorofila-a, con datos provenientes principalmente de cruceros asociados a la determinación acústica del reclutamiento del recurso en el norte de Chile (llamados “RECLAN”) y de cruceros vinculados a la determinación directa de la biomasa desovante de anchoveta por medio del método de producción diaria de huevos (llamados “MPDH”) entre las regiones XV y II.

La solicitud de datos realizada al Fondo de Investigación Pesquera verificó la recepción de archivos (cada archivo correspondiente a un crucero) con información hidrográfica (CTDO) para los años: 1997-2016 (cruceros RECLAN) y para los años 1999-2017 (cruceros MPDH). Lamentablemente, el pre-procesamiento y posterior análisis de los datos de cada crucero en particular, permitió darnos cuenta de la presencia de archivos incompletos en la gran mayoría de los casos, lo que impidió el utilizar la información hidrográfica de todos los archivos solicitados, y menos aún realizar un análisis histórico considerando cada uno y todos los archivos (cruceros) recepcionados.

Finalmente, con el propósito de dar cuenta de un análisis descriptivo de la hidrografía en la región de estudio, se optó por seleccionar los archivos que tuvieran perfiles completos de las variables temperatura, salinidad, densidad y concentración de oxígeno disuelto, que permitiesen analizar la información en el plano horizontal como también en secciones verticales, paralelas y perpendiculares a la línea de costa. De esta manera, para este propósito se contó finalmente solo con los siguientes cruceros: a) Cruceros RECLAN (1999, 2001, 2007, 2012, 2014, 2015, 2016), b) Cruceros MPDH (2015, 2016).

La información hidrográfica (CTDO data) fue analizada a través de: a) distribuciones horizontales en los estratos de superficie (5 m) y 50 metros de profundidad, abarcando el rango de distribución medio de anchoveta en el área de estudio, y b) distribuciones verticales considerando transectas longitudinales (paralelas a la costa) desde los 18 hasta los 26°S para evidenciar la variabilidad hidrográfica meridional en los primeros 100 metros de la columna de agua, y transectos transversales (perpendiculares a la costa) generados en las latitudes de 18, 20, 22 y 24° de latitud Sur, con el propósito de evidenciar la variabilidad zonal en la región costera de surgencia del área estudiada.

5.5. Modelo conceptual de la dinámica poblacional de la anchoveta en la zona norte de Chile

Las especies pelágicas pequeñas se caracterizan por alta variabilidad asociada a cambios de abundancia, y estacionalidad de la explotación pesquera, marcada por una alta dependencia de los pulsos anuales de reclutamiento. A nivel mundial, la principal herramienta utilizada para el asesoramiento y determinación del estado de las poblaciones corresponde a modelos de evaluación de stock que estiman niveles de biomasa totales, vulnerables, reclutamientos y mortalidad por pesca), los cuales corresponden a modelos del tipo estadísticos edad y tallas estructurados y que asumen error de observación. Este tipo de modelos genera información para la administración de diferentes recursos, y constantemente presentan alta incertidumbre en la estimación del “reclutamiento”. Por lo tanto, la posibilidad de disponer de indicadores de reclutamiento independientes a la pesquería, genera una fuente de información complementaria para el establecimiento del estatus de la población con

probable mejoramiento del modelo, reducción de incertidumbre y mejor predicción y realismo en las proyecciones poblacionales y por ende en la evaluación de estrategias de explotación. En un esquema similar, la incorporación de covariables es una aproximación que permite identificar variables que afectan diferentes procesos poblacionales, siendo caracterizadas estas covariables como críticas (Deriso *et al.*, 2008). En este esquema en primer lugar se debe identificar (seleccionar) las covariables para luego integrar y testear las variables en el modelo de evaluación de stock. Los estudios biofísicos son una de las herramientas a través de las cuales es posible identificar variables clave hacia el reclutamiento de especies pelágicas. En este capítulo se plantea un modelo conceptual soportado para la población de anchoveta, analizado en el contexto de los resultados del estudio biofísico de la historia de vida temprana de esta población en la zona norte de Chile y sur de Perú.

6.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Estructura y validación del modelo hidrodinámico

La primera etapa de evaluación de resultados de este proyecto está vinculada al modelo hidrodinámico que proporciona el sistema físico-oceanográfico en el cual se basa la modelación biofísica y que, junto con el sistema de reglas empíricas detallado en cada submodelo, determinará el destino final de los individuos modelados y hará emerger los rasgos poblacionales para la anchoveta en la zona norte de Chile. De esta manera, el modelo hidrodinámico deberá reproducir los principales rasgos del sistema, evitando que el modelo biofísico herede inconsistencias relacionadas con las variables hidrográficas y principalmente el patrón de circulación. Como se ha establecido, la simulación de la circulación oceánica en las zonas de surgencia es un desafío debido a la escasez de productos de estrés del viento con una resolución espacial suficientemente alta para simular la dinámica observada de la surgencia en el extremo costero. En el presente estudio, se implementó una metodología para mejorar el forzante viento y mejorar el patrón de circulación reproducido por ROMS.

6.1.1. Implementación de modelo hidrodinámico con forzantes mejorados

De acuerdo a lo recomendado en los talleres de revisión y evaluación del modelo hidrodinámico para la región del Pacífico suroriental, se implementó un sistema de mejoramiento de forzantes para aumentar la precisión del modelo en la representación de los rasgos oceanográficos, principalmente asociados a sectores costeros, donde por efectos orográficos se identifican limitaciones en los forzantes de viento. Para establecer el desempeño general de los modelos (modelo con forzantes globales NCEP2, desde aquí ROMS1, y modelo NCEP2 plus, desde aquí ROMS2) se analizó la señal media de la temperatura superficial del mar (TSM, como *proxy* de la surgencia costera y zonas frontales) y la estructura vertical de las corrientes. En el caso de la TSM, en general los dos modelos representaron bien el comportamiento de la TSM en zonas distantes de la costa, sin embargo en la costa se producen las mayores diferencias (**Figura 8**). El ROMS1 (**Figura 8c**) mostró una mala representación del sistema de surgencia de Perú, subestimando su extensión meridional, además de sobreestimar la temperatura en el sector

costero del sur de Perú y norte de Chile, producto de la menor calidad en los forzantes de viento y flujos de calor atmosférico. Una vez establecido este diagnóstico, se analizó el ROMS2 (con forzantes mejorados, **Figura 8d**), el cual evidenció un escenario que reprodujo de forma más consistente el patrón espacial de la TSM, sugiriendo un mayor nivel de certeza por parte del modelo hidrodinámico. No obstante, aunque en la señal media se observa un mayor enfriamiento en norte de Chile y sur de Perú, se obtuvo un modelo con mayor consistencia en las estructuras superficiales principales respecto a las observaciones (**Figura 8a**).

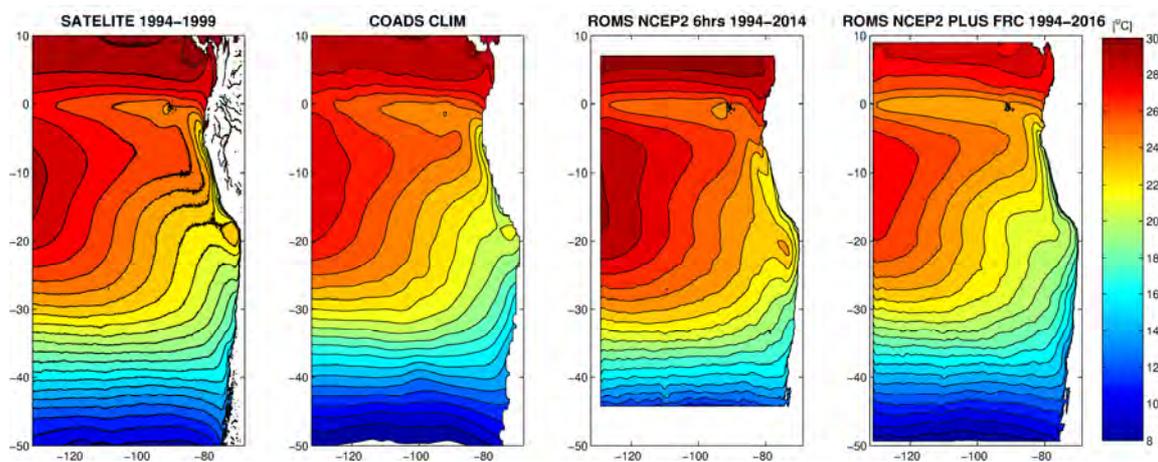


Figura 8. Temperatura superficial del mar promedio periodo 1994-2016 para a) datos satelitales Pathfinder-Modis, b) climatología COADS, c) modelo ROMS NCEP2 PLUS 6hrs (ROMS 1) y b) modelo ROMS NCEP2 PLUS FRC (ROMS 2).

Al mismo tiempo del diagnóstico respecto de la TSM, se generó un análisis de la estructura vertical de la corriente meridional para ambos modelos. La **Figura 9** muestra el promedio a lo largo de la costa entre los 7°S hasta los 13°S, para ambos casos. La circulación en esta zona se caracteriza por una intensa corriente costera hacia el norte (valores positivos), denominada corriente costera de Perú, inmediatamente bajo esta corriente se encuentra la contra corriente Perú-Chile con dirección hacia el polo (valores negativos), la cual se manifiesta adyacente al talud continental y tiene su núcleo en torno a los 150 m. Las diferencias en estos rasgos fue mucho más acentuada que la señal superficial, la dinámica de corrientes no fue reproducida por ROMS1, debido a la calidad de sus forzantes (**Figura 9a**). Sin embargo, se observa que el ROMS2 (Figura 9b), con mejoramiento de forzantes,

exhibe un desempeño muy cercano al descrito en las observaciones (**Figura 9c**). Debido a que en este modelo se utilizó el esfuerzo de viento y flujos de calor atmosféricos mejorados en donde se reemplazó la media estacional NCEP2 por SCOW en el caso del viento y por COADS en el caso del flujo de calor, los resultados sugieren que la dinámica de corrientes verticales son fuertemente moduladas por la variabilidad estacional del viento (esfuerzo del viento) mientras que el flujo de calor mejora la transferencia atmosfera-océano.

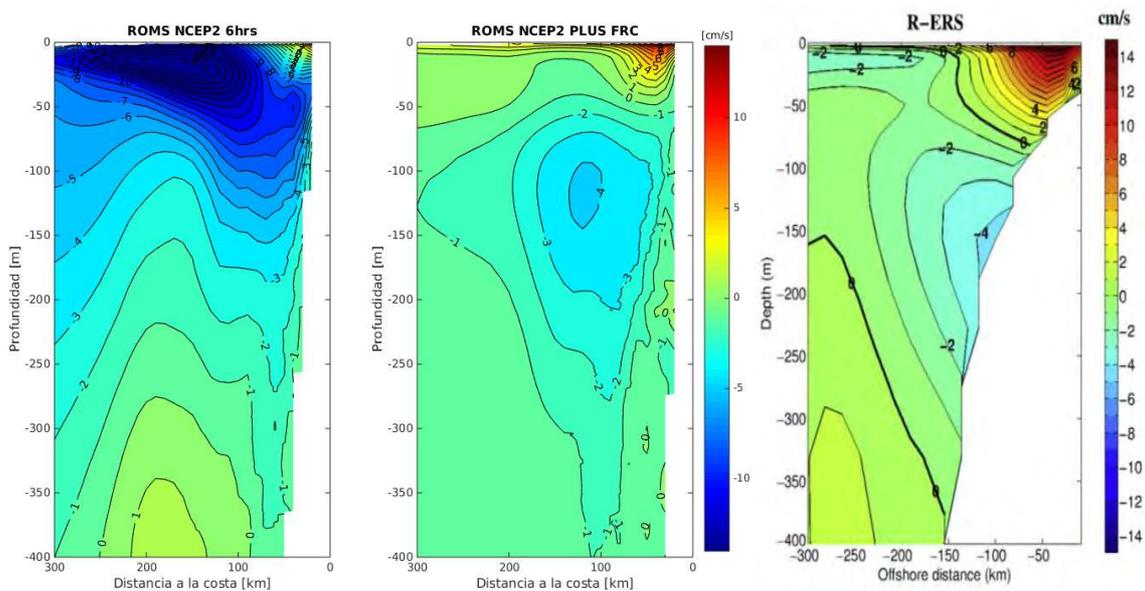


Figura 9. Secciones verticales de la corriente meridional media promediada entre los 7°S y 13°S para a) modelo ROMS NCEP2 6hrs (periodo 1994-2014), b) modelo ROMS PLUS FRC (periodo 1994-2016), c) extraída de Cambon *et al.*, 2013. Correspondiente a la secciones verticales de la corriente meridional modelada en la misma banda, forzada con datos de esfuerzo de viento observado ERS (escaterómetro).

Un escenario similar, se obtuvo para la sección vertical para las corrientes meridionales en la zona de Chile central, promediadas a lo largo de la costa entre los 30°S hasta los 35°S (**Figura 10**). En esta zona se encuentra la contra corriente Perú-Chile, la cual está adyacente al talud continental y su núcleo está ubicado alrededor de los 250 m de profundidad, sin embargo se extiende hasta los 400 m aproximadamente. Este comportamiento nuevamente no lo exhibe el ROMS 1, sin embargo se observa que el ROMS 2 muestra un desempeño cercano al descrito en las observaciones (**Figura 10c**).

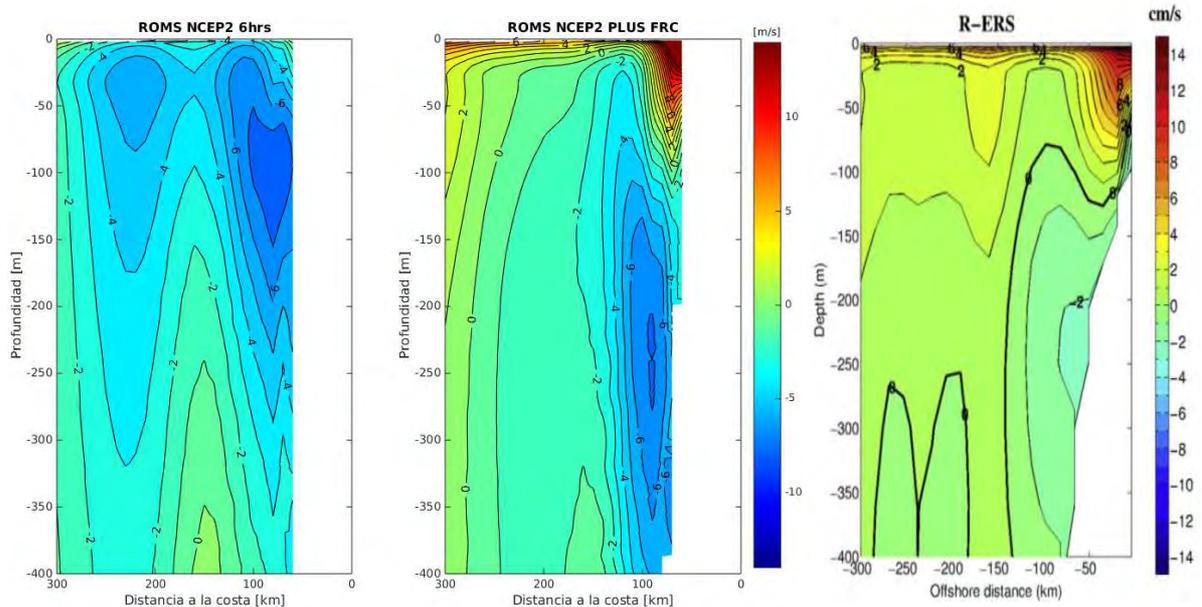


Figura 10. Secciones verticales de la corriente meridional media promediada entre los 30°S y 35°S para a) modelo ROMS NCEP2 6hrs (periodo 1994-2014), b) modelo ROMS PLUS FRC (periodo 1994-2016), c) extraída de Cambon *et al.*, 2013. Correspondiente a la secciones verticales de la corriente meridional modelada (en la misma banda), forzada con datos de esfuerzo de viento observado ERS (escaterómetro).

6.1.2. Validación estacional e interanual por medio del uso de información satelital

Una vez resuelta la problemática relativa a los forzantes atmosféricos, se realizó la simulación del ROMS2 bajo una configuración interanual para el periodo 1994-2016 cuyos resultados fueron utilizados para implementar el modelo hidrodinámico anidado de alta resolución (3 km) con el cual se realizaron las simulaciones biofísicas. La primera etapa para evaluar el desempeño del modelo hidrodinámico respecto a observaciones realizadas por satélites involucró el análisis de las señales estacionales. De esta manera, para explorar el desempeño del modelo ROMS2 en la escala interanual se compararon datos observados y modelados de Temperatura Superficial del Mar (TSM), Altura del Nivel del Mar (ANM) y Energía Cinética de mesoescala (EKE). Primero, en el caso de la TSM el modelo ROMS2 evidenció un buen desempeño reproduciendo los principales rasgos estacionales a lo largo de todo el dominio modelado en el Pacífico suroriental (**Figura 11**). No obstante, la versión ROMS2 constituye una versión mejorada respecto al ROMS1 con forzantes globales, la evaluación estadística muestra aún ciertas inconsistencias focalizadas en algunas zonas del

dominio y épocas del año, las que deben ser consideradas hacia el proceso de modelación biofísica (**Figura 11**). Durante verano y otoño, se observa una subestimación de la TSM en la franja costera del norte de Chile y Perú, la que se acentúa en la curvatura del continente, en torno a los 19°S alcanzando una diferencia de -1,5°C. Esta situación, se restringe espacialmente durante invierno quedando reducida a una franja muy costera la que se expande nuevamente en la primavera.

Así, la mejora realizada repercutió en una buena reproducción de la señal térmica superficial en gran parte del dominio modelado, y restringe las diferencias principalmente al verano y al sector costero donde ocurre la dinámica de surgencia, la que podría verse ligeramente sobreestimada repercutiendo en un enfriamiento excesivo de la capa superficial. Luego, el RMSE (raíz del error cuadrático medio) se puede aislar la influencia del error de sesgo del promedio, del error de sesgo de la desviación estándar y los problemas asociados con la correlación, muestra niveles máximos de error que no sobrepasaron el 15%, los cuales estuvieron mayormente representados en la región ecuatorial en las temporadas de verano e invierno. En general, en mayor parte del dominio modelado se obtuvieron niveles de error por debajo del 5% para todas las estaciones sugiriendo un muy desempeño en reproducir el ciclo anual en todo el dominio denotando que los errores de amplitud y correlación son de menor impacto y mayormente restringidos espacialmente, sugiriendo que la variabilidad está bien representada y que las inconsistencias están asociadas a un sesgo sistemático estacional (**Figura 11**).

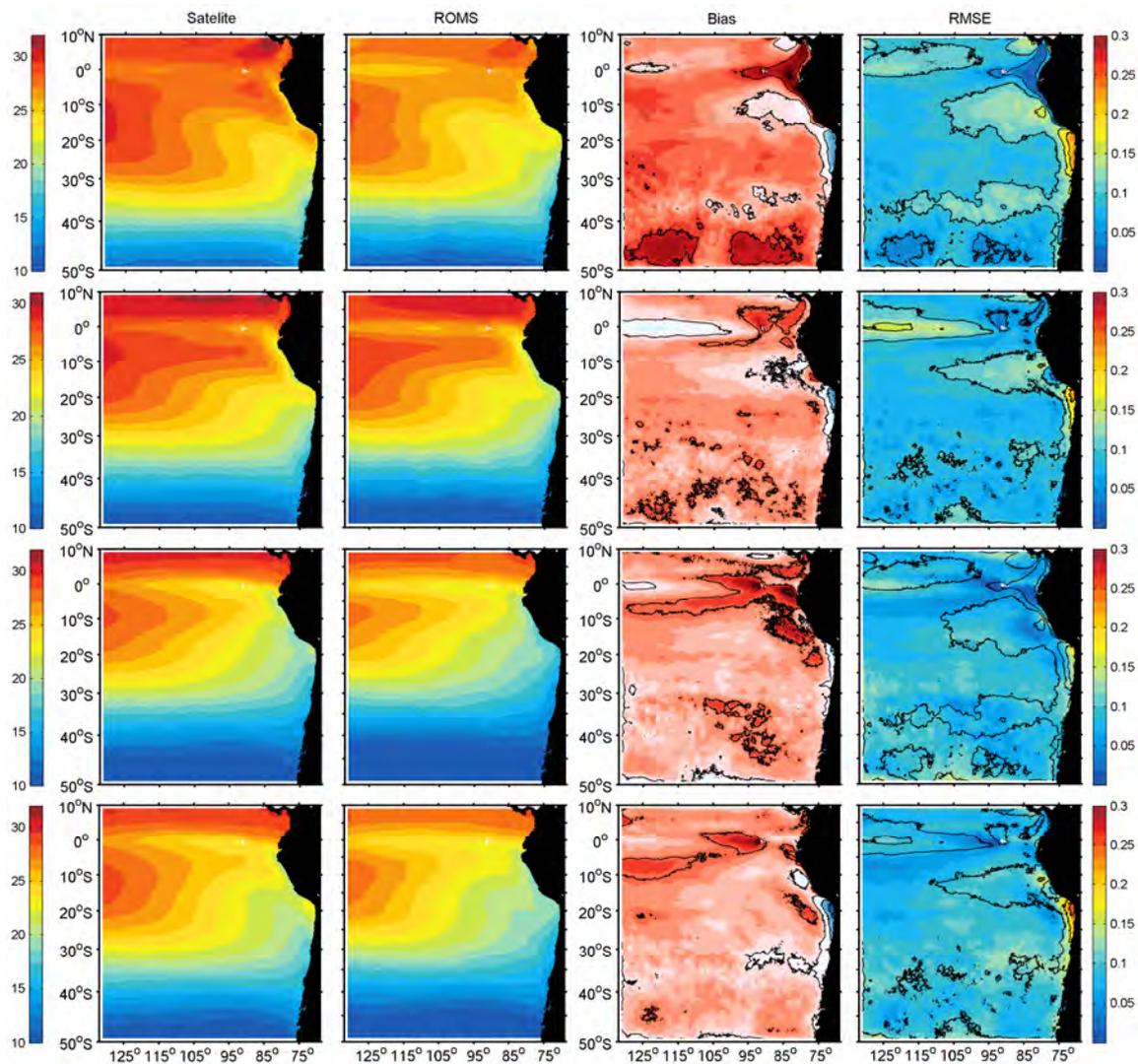


Figura 11. Ciclo estacional de la anomalía de la temperatura superficial del mar para datos de satélite Pathfinder-ModisAqua (panel izquierdo), modelo ROMS2 (panel centro-izquierdo), el sesgo de cálculo (panel centro-derecho) y el error cuadrático medio espacial (panel derecho). La estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera.

Una vez evaluada la estacionalidad, se calcularon los modos de variabilidad espacial y temporal de la TSM en base a funciones ortogonales empíricas (FOEs) para el ROMS2 y datos de satélite con el objetivo de analizar el comportamiento del modelo en la escala interanual, los cuales fueron comparados posteriormente para cuantificar el desempeño del modelo reproduciendo las principales señales de variabilidad de esta variable a lo largo del dominio modelado. El primer modo de variabilidad para los componentes principales de la

TSM explicó un alto porcentaje de la varianza para datos modelados y observados respectivamente (43% y 29%). El primer componente principal para la TSM en el modelo ROMS2 fueron consistentes con las observaciones en su patrón espacial y compartieron una significativa correlación en su evolución temporal. De esta manera, el primer modo de variabilidad del componente principal temporal de la TSM mostró un alto y significativo nivel de correlación entre los datos modelados y observados ($R^2 = 0,82$; **Figura 12c, d**). La expresión espacial de los datos modelados y observados mostraron una alta coherencia, reproduciendo los principales rasgos térmicos del dominio analizado (**Figura 12a, b**). Sin embargo, el modelo mostró un desacople llamativo durante el primer año modelado, lo que influyó en la correlación entre las dos series. Este desacople sugiere que el modelo aún no alcanzaba su completa estabilidad en el primer año modelado (proceso de *spin-up*).

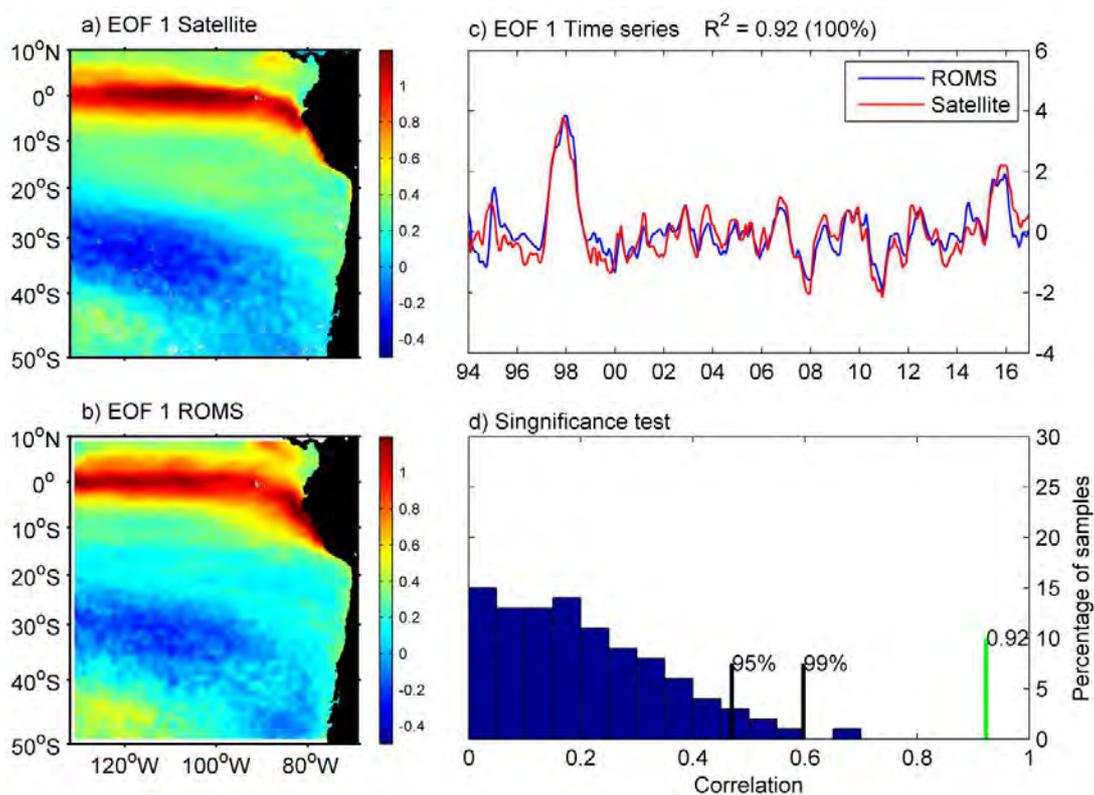


Figura 12. FOE del primer modo de variabilidad de la Temperatura superficial del mar. Dominio espacial para a) Datos satélite Pathfinder-ModisAqua y b) modelo ROMS2, c) serie de tiempo 1994 – 2016 para datos de satélite y modelo ROMS, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada.

De la misma manera que lo realizado anteriormente, se analizó la señal estacional desde la altura del nivel del mar observada y modelada. Esta comparación evidenció una buen desempeño reproduciendo los principales rasgos estacionales a lo largo de todo el dominio modelado en el Pacífico suroriental (**Figura 13**). Las mayores diferencias nuevamente estuvieron asociadas a las épocas de verano y otoño, pero restringidas a la zona oceánica. En el sector costero (área de estudio) el nivel de sesgo fue muy bajo evidenciando una buena estimación del ROMS2. En esta evaluación, el RMSE muestra niveles máximos de error que no sobrepasaron el 1%, mostrando un buen nivel de precisión por parte del modelo en reproducir la dinámica en todas las estaciones del año y a lo largo de todo el dominio modelado.

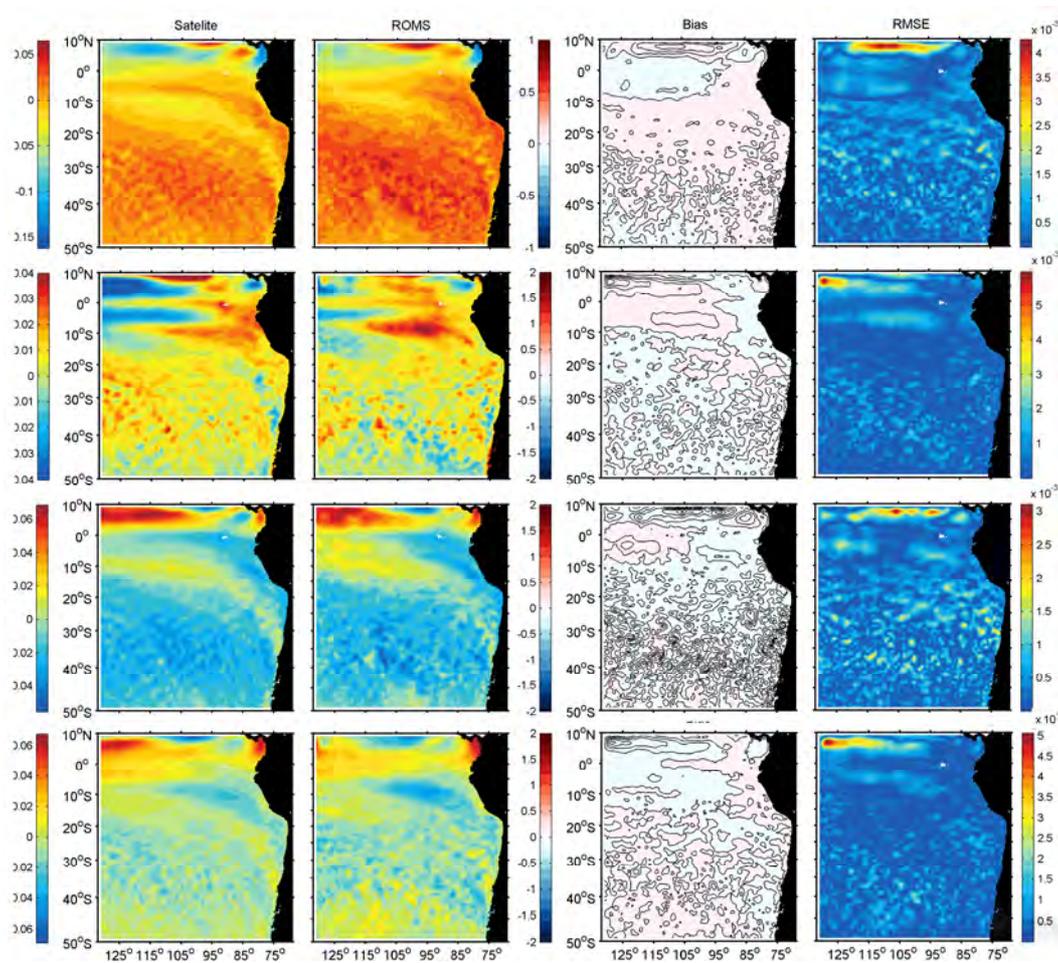


Figura 13. Ciclo estacional de la anomalía del Nivel del Mar para datos de satélite AVISO (panel izquierdo), modelo ROMS2 (panel centro-izquierdo), el sesgo de cálculo (panel centro-derecho) y el error cuadrático medio espacial (panel derecho). La estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera.

Al igual que en el caso de la TSM, el primer modo de variabilidad para los componentes principales explicó un alto porcentaje de la varianza para datos modelados y observados respectivamente (33% y 45%). El primer componente principal para la ANM en el modelo ROMS2 fue consistente con las observaciones en su patrón espacial y compartió una significativa correlación en su evolución temporal. De esta manera, el primer modo de variabilidad del componente principal temporal de la ANM mostró un alto y significativo nivel de correlación entre los datos modelados y observados ($R^2 = 0,93$; **Figura 14c, d**). La expresión espacial de los datos modelados y observados mostraron una alta coherencia, reproduciendo los principales rasgos térmicos del dominio analizado (**Figura 14a, b**). En este caso el modelo no presentó el desacople inicial evidenciado por la TSM, por lo que plantea un punto de análisis detallado para dilucidar esta inconsistencia.

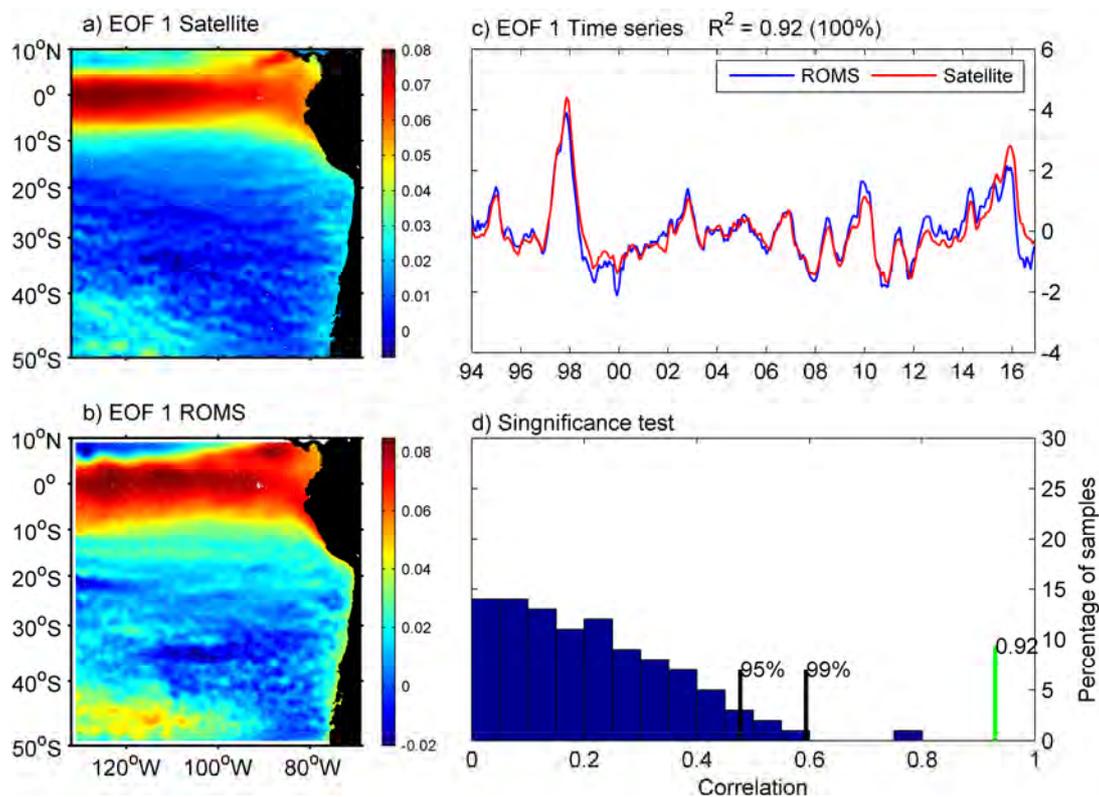


Figura 14. FOE del primer modo de variabilidad de la Anomalía del nivel del mar. Dominio espacial para a) Datos satélite AVISO y b) modelo ROMS2, c) serie de tiempo 1994 – 2016 para datos de satélite y modelo ROMS, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada.

6.1.3. Validación de la estructura vertical a través del uso de datos in situ

A través del uso de información proveniente de perfiladores CTD desplegados por el World Ocean Circulation Experiment (WOCE) en dos transectas ubicadas frente a las costas de Chile y Perú (**Figura 15**), se realizó un análisis comparativo de la estructura vertical del ROMS2 respecto a observaciones locales. Además, el método desarrollado permitió replicar el crucero en el ROMS2 por lo que la información tiene la misma resolución temporal y espacial, estableciéndose el nivel de representación del modelo respecto a las masas de aguas predominantes. Este análisis resultó bastante ambicioso, considerando que el ROMS2, en esencia, no reproduce estructuras locales en tiempo y espacio sino que reproduce la dinámica general del sistema oceanográfico.

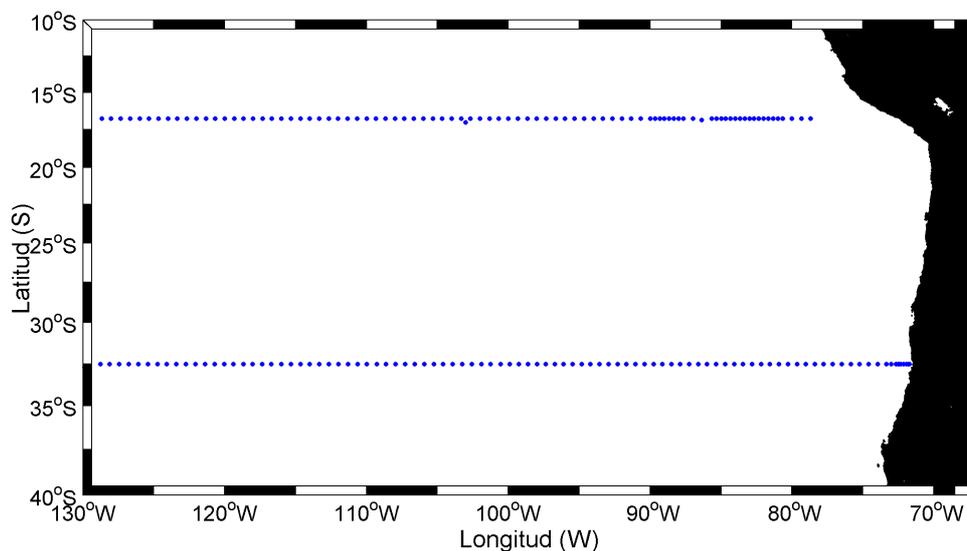


Figura 15. Distribución espacial de las transectas WOCE utilizadas para la validación vertical del modelo ROMS.

La **Figura 16** muestra las secciones de temperatura obtenidas desde ROMS2 y de las observaciones para la transecta realizada frente a las costas de Perú durante abril y mayo de 2009, destacándose la coherencia vertical del modelo en cuanto a la extensión de la capa de mezcla y a los gradientes entre la costa y el océano. Además se analizaron series de espacio a 10, 50, 100, 200, 300 y 500 en donde se observó una alta correlación entre modelo y observación ($R^2 > 0,9$; en la mayoría de los casos) demostrando que el modelo replica

eficientemente la estructura de la columna de agua en distintas profundidades. No obstante a estos buenos resultados, se demuestra que existen perturbaciones a nivel de mesoescala que hacen diferir al modelo de la observación, comprobando que el ROMS2 no reproduce estructuras en el mismo tiempo y en el mismo espacio. En el caso de la salinidad, se obtuvo un escenario muy similar con un alto nivel de precisión ($R^2 > 0,85$; en la mayoría de los casos) del modelo respecto a las observaciones, replicando el gradiente con menor salinidad costa afuera y un ascenso de las isohalinas hacia el sector costero, probablemente asociado a la dinámica de surgencia. Sin embargo, el análisis de series muestra una leve tendencia a sobrestimar la salinidad por parte del ROMS2 en la región costera en aproximadamente 0.5 psu principalmente en los primeros 100 metros de la columna de agua (**Figura 17**).

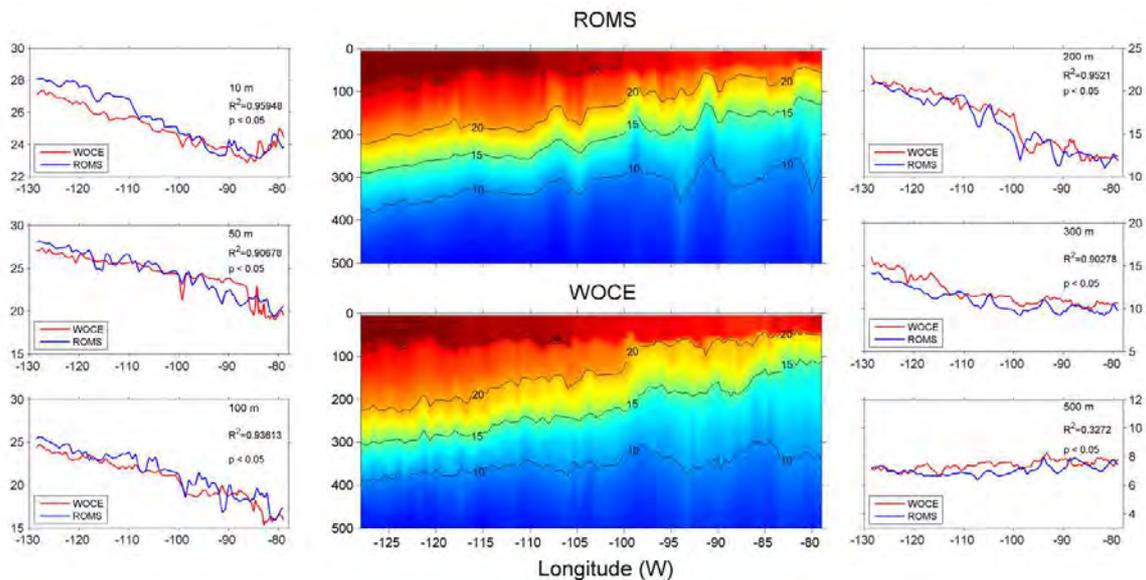


Figura 16. Análisis de la estructura vertical de la temperatura en el modelo ROMS respecto a observaciones in situ realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de Perú (16°45'S).

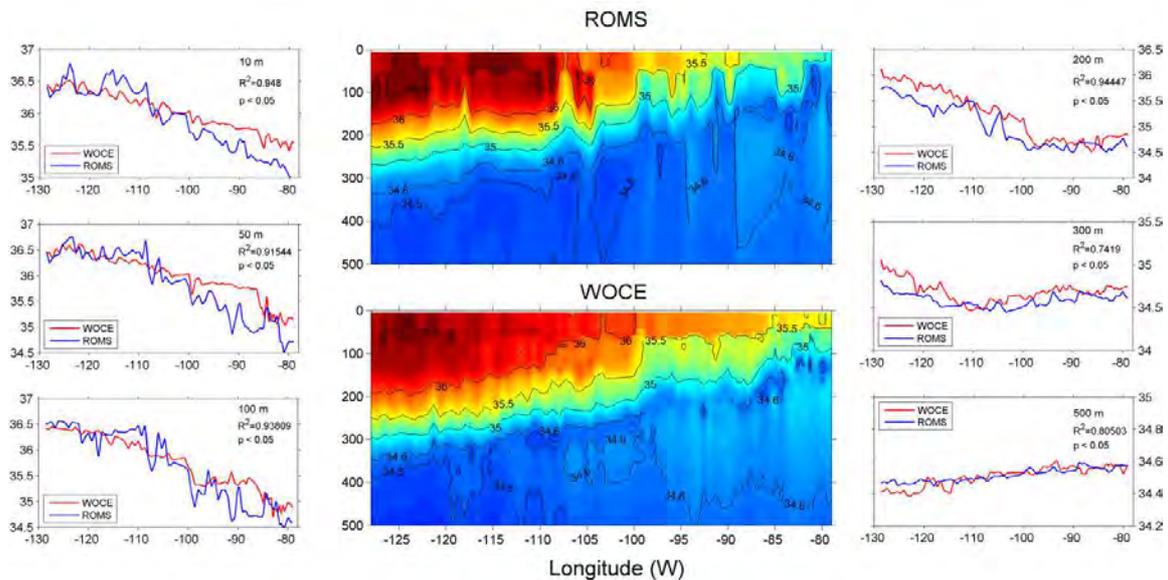


Figura 17. Análisis de la estructura vertical de la salinidad en el modelo ROMS respecto a observaciones in situ realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de Perú ($16^{\circ}45'S$).

Para analizar estadísticamente el nivel de reproducción de la estructura vertical del océano por parte del ROMS2 se realizaron diagramas de Taylor, que permiten analizar en conjunto el nivel de correlación y la dispersión de la señal entre modelo y observación. La **Figura 18a** muestra el diagrama de Taylor que compara los datos de temperatura proveniente del crucero WOCE realizado en Perú (verano) y las salidas de modelo ROMS2. Los puntos en rojos corresponden a las diferentes profundidades a las cuales se compararon los datos del modelo y CTD: 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad. La posición de cada punto sobre el gráfico cuantifica cuán cerca las salidas del modelo (a diferentes profundidades) está de los datos observados. El patrón de correlación entre el modelo ROMS2 y las mediciones está dado por la coordenada acimutal, en general el modelo muestra altos valores de correlación ($>0,85$) para profundidades entre 5 y 200 metros. Por otro lado, la distancia de cualquier punto rojo (modelo) al origen del Diagrama de Taylor corresponde a la desviación estándar, el grupo de puntos superficiales tienen una desviación estándar entre 0,5 y 2,0. Mientras que la RCM está representada por las líneas grises segmentadas centradas en cero, sobre el lado derecho de la figura, estas profundidades están alrededor bajo 2,0 de RCM. De esta manera este resultado indica que en los primeros 200 metros de la columna de agua modelo y observación muestra una alta

correlación y un mayor nivel de dispersión de los datos, mientras que bajo los 200 metros el nivel de correlación disminuye al igual que la dispersión. En la **Figura 17b** se muestra el diagrama de Taylor que compara los datos de salinidad para la misma transecta. En general el modelo ROMS2 presenta una buena correlación en los primeros 150 metros ($>0,8$). Por otro lado, los valores más grandes para la desviación estándar correspondieron a las profundidades entre 5 y 75 metros, donde sus valores están sobre 0,4 indicando una situación similar a la temperatura alta correlación y dispersión en los estratos más superficiales.

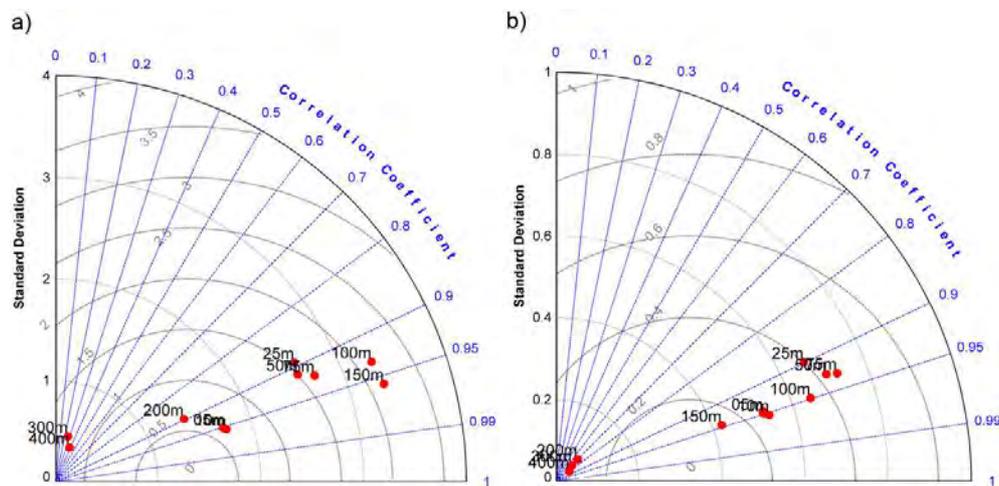


Figura 18. Diagrama de Taylor para las a) temperatura y b) salinidad en el crucero WOCE realizado frente a Perú durante abril y mayo de 2009 considerando las profundidades 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad.

Uno de los aspectos requeridos hacia el modelo hidrodinámico es la correcta representación de las masas de agua predominantes en las distintas regiones del dominio modelado. La **Figura 19a** muestra el diagrama TS correspondiente al crucero WOCE y la **Figura 18b** muestra el diagrama TS del ROMS2 evidenciando un alto nivel de coherencia en la representación de las masas de agua presentes en las distintas profundidades evaluadas y ratificando la mayor dispersión por parte del ROMS2 respecto a las observaciones.

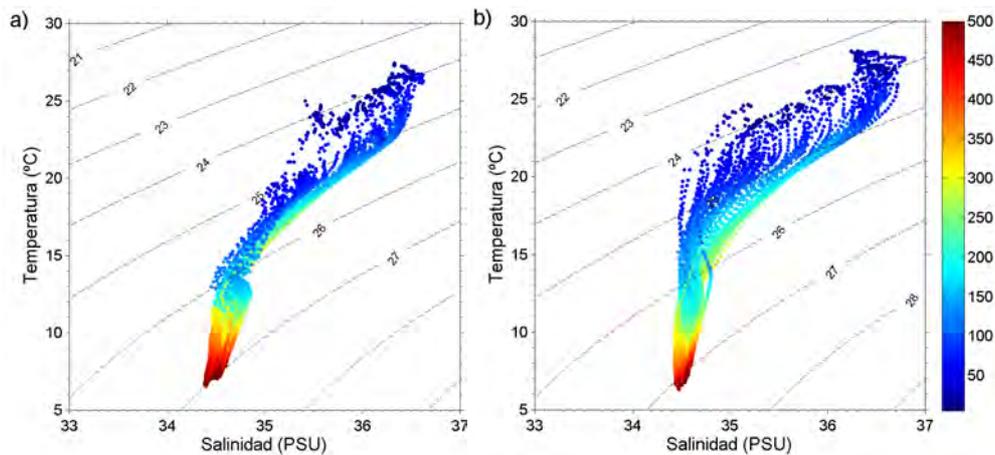


Figura 19. Diagrama TS obtenido desde a) datos oceanográficos WOCE y b) ROMS para la transecta realizada frente a Perú ($16^{\circ}45'S$).

La **Figura 20** muestra las secciones de temperatura obtenidas desde ROMS2 y de observaciones para la transecta realizada frente a las costas de Chile central durante enero y febrero de 2010, evidenciando la coherencia vertical del modelo en cuanto a la extensión de la capa de mezcla y a los gradientes entre la costa y el océano. Además se analizaron series de espacio a 10, 50, 100, 200, 300 y 500 en donde se observó una alta correlación entre modelo y observación ($R^2 > 0,85$; en la mayoría de los casos) demostrando que el modelo replica eficientemente la estructura de la columna de agua en distintas profundidades, de forma similar a lo registrado en la región frente a Perú, sin embargo se observa que a los 50 y 100 metros el modelo tiende a subestimar levemente la temperatura en el sector costero. En el caso de la salinidad, se obtuvo un escenario muy similar con un alto nivel de coherencia ($R^2 > 0,7$; en la mayoría de los casos) del modelo respecto a las observaciones, replicando el gradiente con menor salinidad costa afuera y un ascenso de las isohalinas hacia el sector costero, probablemente asociado a la dinámica de surgencia. Sin embargo, el análisis de series muestra una leve tendencia a subestimar la salinidad por parte del ROMS en la región costera en aproximadamente 0.5 psu principalmente en los primeros 100 metros de la columna de agua (**Figura 21**).

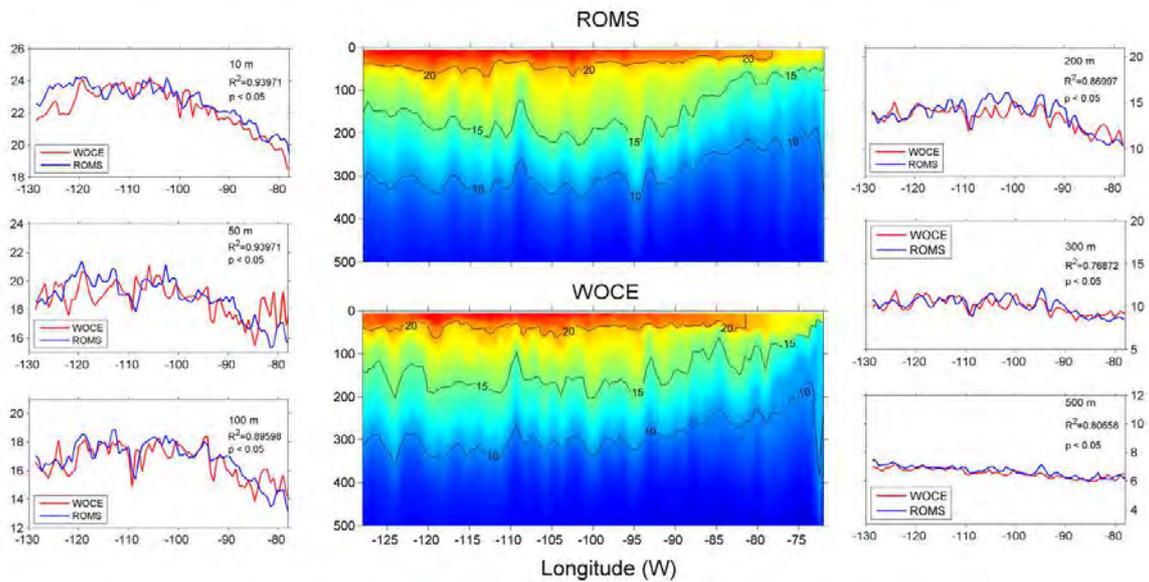


Figura 20. Análisis de la estructura vertical de la temperatura en el modelo ROMS respecto a observaciones in situ realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de Chile central (32°30'S).

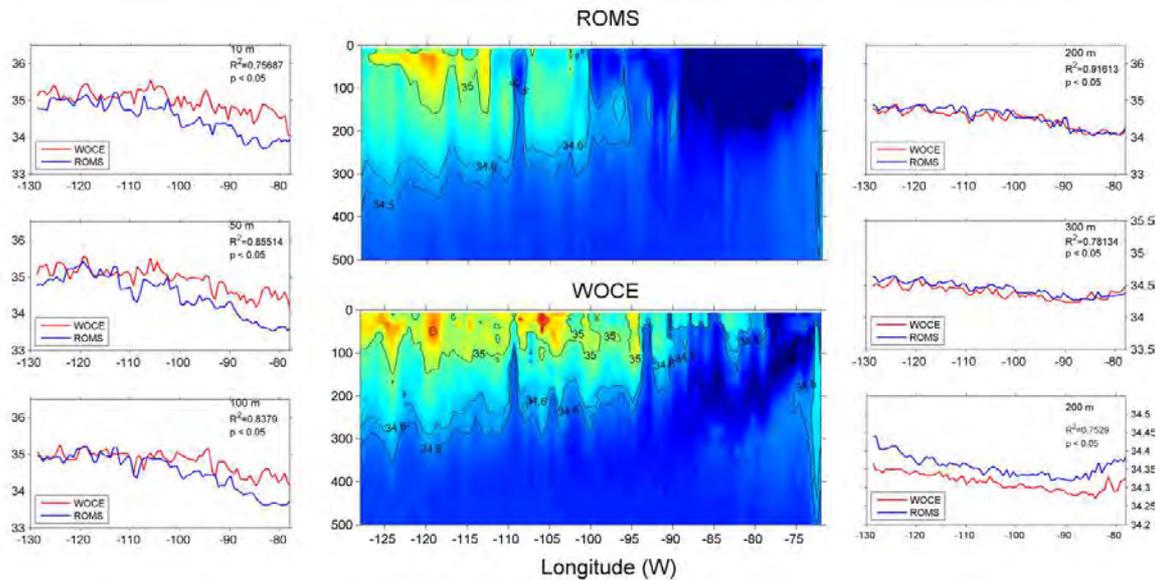


Figura 21. Análisis de la estructura vertical de la salinidad en el modelo ROMS respecto a observaciones in situ realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de Chile central (32°30'S).

La **Figura 22a** muestra el diagrama de Taylor que compara los datos de temperatura proveniente del crucero WOCE realizado frente a Chile central (verano) y las salidas de

modelo ROMS2. El patrón de correlación entre el modelo ROMS y las mediciones está dado por la coordenada acimutal, en general el modelo muestra altos valores de correlación ($>0,7$) para profundidades entre 5 y 150 metros. Por otro lado, la distancia de cualquier punto rojo (modelo) al origen del Diagrama de Taylor corresponde a la desviación estándar, el grupo de puntos superficiales tienen una desviación estándar entre 0,5 y 2,0. De esta manera este resultado indica que en los primeros 150 metros de la columna de agua modelo y observación muestra una alta correlación y un mayor nivel de dispersión de los datos, mientras que bajo los 150 metros el nivel de correlación disminuye al igual que la dispersión. En la **Figura 22b** se muestra el diagrama de Taylor que compara los datos de salinidad para la misma transecta. En general el modelo ROMS2 presenta una menor correlación en toda la columna de agua (0,3 y 0,8). Por otro lado, los valores más grandes para la desviación estándar correspondieron a las profundidades entre 5 y 150 metros, indicando una situación similar a la temperatura con mayor dispersión en los estratos más superficiales.

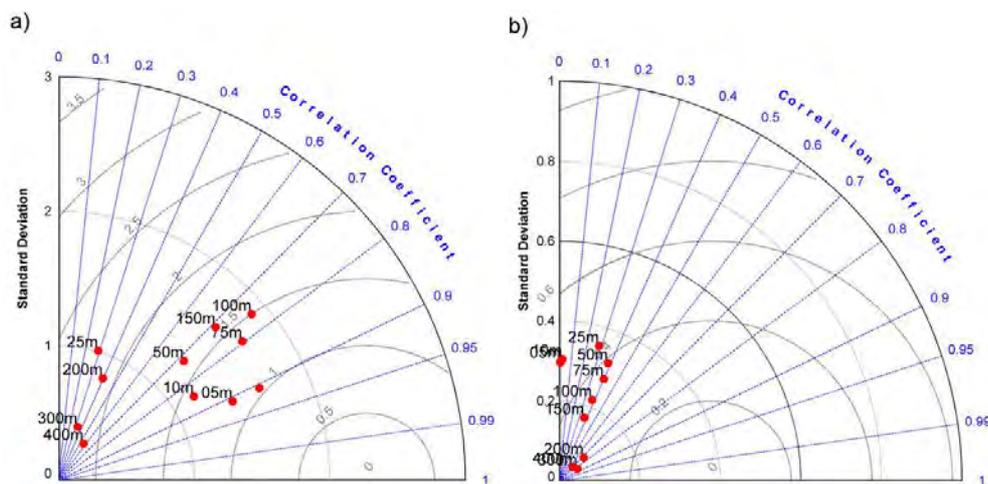


Figura 22. Diagrama de Taylor para las a) temperatura y b) salinidad en el crucero WOCE realizado frente a Chile central durante enero y febrero de 2010 considerando las profundidades 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad.

Finalmente, se obtuvieron los diagramas TS para la transecta realizada frente a Chile central. La **Figura 23a** y **23b** muestra los diagramas TS obtenidos desde la transecta WOCE y el ROMS2 respectivamente para la zona central de Chile. En esta zona se observa

una buena consistencia en la representación vertical de las masas de agua, sin embargo, se aprecia una mayor dispersión de la variable salinidad principalmente hacia salinidades más bajas.

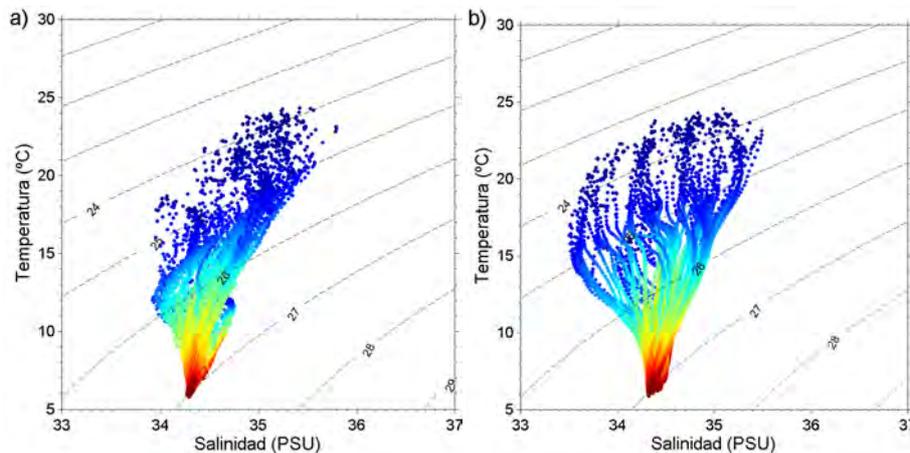


Figura 23. Diagrama TS obtenido desde a) datos oceanográficos WOCE y b) ROMS para la transecta realizada frente a Chile central ($32^{\circ}30'S$).

6.1.4. Implementación piloto del modelo biogeoquímico PISCES

De forma exploratoria, para analizar el desarrollo de la implementación y el cálculo de velocidad de computo, se realizó una modelación biogeoquímica climatológica mediante ROMS-PISCES para el periodo 2000-2010. Las salidas del modelo tridimensional ROMS-PISCES contiene variables físicas tales como temperatura, salinidad, corriente meridional y zonal y nivel del mar, por otro lado las variables biogeoquímicas: carbono inorgánico disuelto, alcalinidad, oxígeno, calcita, fosfato, carbono orgánico particulado, silicato, nanofitoplancton, microzooplancton, carbono orgánico disuelto, diatomeas, mesozoplancton, hierro disuelto, sílice biogénico, clorofila, nitrato, amonio. A continuación se muestran las climatologías estacionales de las principales variables generadas. La **Figura 24** muestra la temperatura superficial estacional para el dominio modelado. La temperatura muestra concordancia con lo presentado previamente para ROMS evidenciando los principales cambios del sistema en la escala estacional.

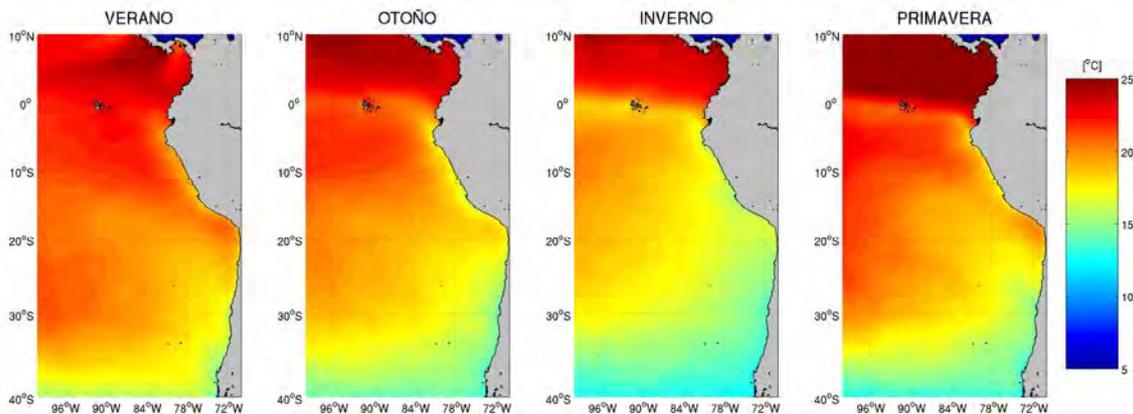


Figura 24. Climatología estacional de la temperatura superficial del mar obtenida desde el modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES para el periodo 2000-2010.

Por otro lado, una de las principales variables biogeoquímica que entregó el modelo ROMS-PISCES corresponde al oxígeno disuelto, en la **Figura 25** se muestra la concentración de oxígeno disuelto a 200 metros de profundidad con el objeto de analizar la presencia de la zona mínima de oxígeno. A esta profundidad, el modelo exploratorio sugiere que no existe una variabilidad estacional importante en la extensión de este rasgo, no obstante su extensión batimétrica es de principal interés y en futuras aplicaciones de modelación biofísica deberá ser abordada en detalle, pues ha sido sugerida como una de las limitantes principales del hábitat para organismos pelágicos en el norte de Chile y sur de Perú (Bertrand *et al.*, 2016).

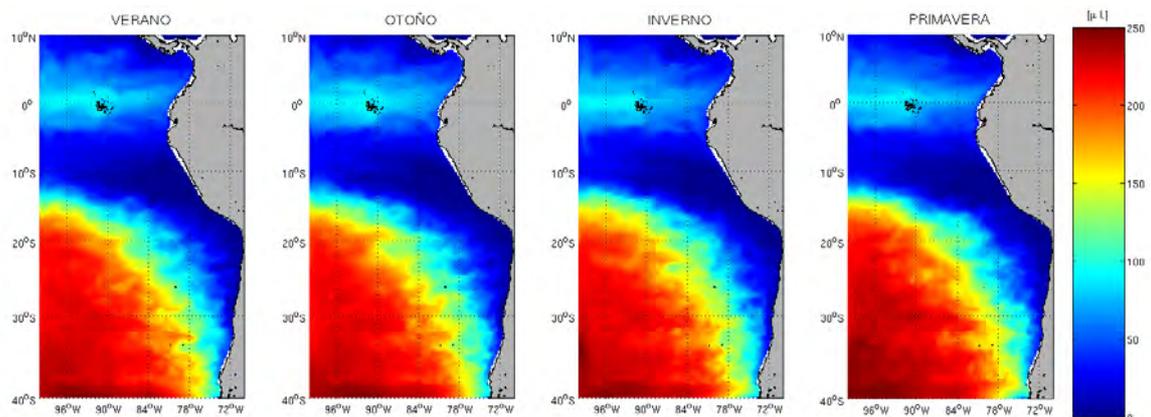


Figura 25. Climatología estacional del oxígeno disuelto a 200 metros de profundidad obtenida desde el modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES para el periodo 2000-2010.

Una de las variables biológicas de importancia proporcionada por el modelo ROMS-PISCES corresponde a la clorofila en diatomeas (**Figura 26**) y nano clorofila (**Figura 27**), las cuales pueden funcionar como descriptor de la oferta de alimento para anchoveta y proporcionar la base para una modelación biofísica que incorpore un modulo bioenergético que permita probar hipótesis de sobrevivencia temprana modulada por cambios en la productividad del ecosistema. Ambos tipos de clorofila muestran mayores concentraciones en el sector costero, con una zona de máximo en el norte de Perú y zona centro sur de Chile vinculadas a la dinámica de surgencia costera características de estas áreas. De la misma forma, el modelo entrega la distribución espacial de microzooplancton, cuya distribución estacional se muestra en la **Figura 28**. Al mismo tiempo, el modelo ROMS-PISCES proporciona la distribución de los principales nutrientes involucrados en los ciclos biogeoquímicos del océano: silicato, fosfato, nitrato, hierro (no mostrados acá). Todos estos resultados corresponden a corridas iniciales del modelo ROMS-PISCES y deben ser consideradas como resultados exploratorios no definitivos, no obstante constituyen un avance significativo en la modelación de los cambios tridimensionales del ecosistema.

Futuras aplicaciones de PISCES hacia el estudio de poblaciones de peces pelágicos identificadas son: i) el análisis de los cambios de productividad del ecosistema y su efecto en el reclutamiento; ii) la limitación del hábitat por condiciones extremas como extensión horizontal y vertical de la zona de mínima de oxígeno; iii) acoplamiento de un modelo biofísico a PISCES donde los campos de fitoplancton y microzooplancton interactúen con las larvas modeladas funcionando como fuente de alimento y modulando su crecimiento y sobrevivencia.

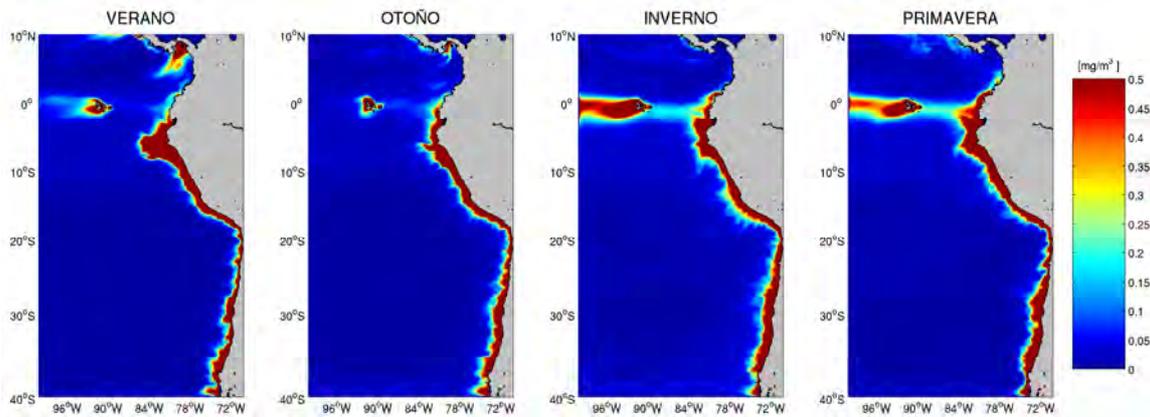


Figura 26. Climatología estacional de la clorofila en diatomeas obtenida desde el modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES para el periodo 2000-2010.

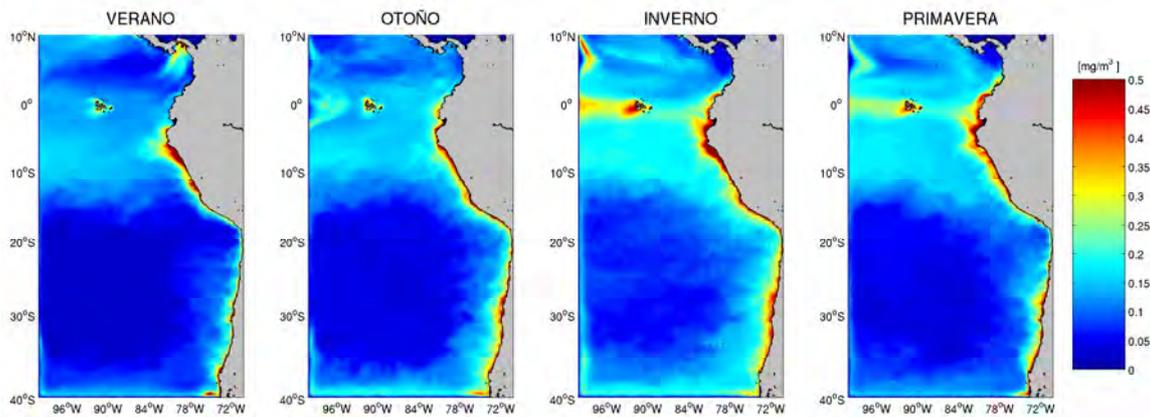


Figura 27. Climatología estacional de la nano clorofila obtenida desde el modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES para el periodo 2000-2010.

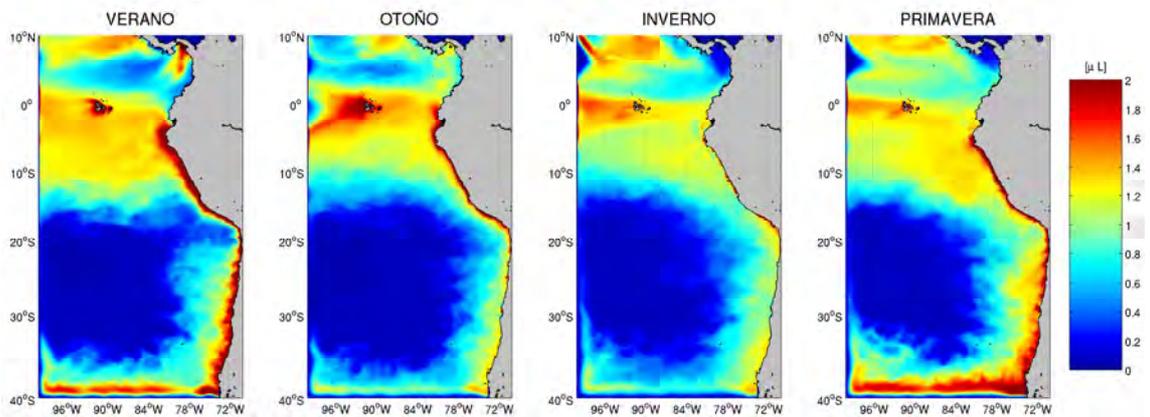


Figura 28. Climatología estacional de la nano clorofila obtenida desde el modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES para el periodo 2000-2010.

6.2. Síntesis de la información biológica que sustenta el sistema de modelación biofísica: *Sub-modelos*

6.2.1. Sub-modelo de distribución espacial del desove, generación de drifters

Un aspecto clave de la modelación biofísica es la inicialización, la que debe realizarse incorporando la mejor información disponible respecto a observaciones de campo. En este contexto, el presente estudio recopiló información respecto a la distribución espacial del desove de anchoveta, los cuales han sido registrados en los cruceros destinados a la evaluación de la biomasa desovante de pequeños pelágicos mediante el método de producción diaria de huevos (MPDH). Los resultados de estos cruceros han mostrado evidencia de desove de anchoveta entre 26°S en el sur y 18°20'S en el norte, donde los focos continúan hacia el norte denotando que esta área evaluación del área de desove es parcial respecto al área de desove global del stock compartido entre Chile y Perú. Además, la distribución del desove muestra una importante variabilidad interanual principalmente en su extensión latitudinal, y secundariamente en la extensión zonal. En general, se observan focos de mayor abundancia en el sector costero en torno a Arica (18°20'), caleta Chipana (21°20'S) y Mejillones (23°10'S) no obstante en algunos años los desoves se muestran menos agregados (**Figura 29**). La variabilidad interanual en los focos de desove podría con aspectos demográficos como el tamaño poblacional, como también podría estar asociado a condiciones ambientales que propicien la actividad reproductivas del stock desovante.

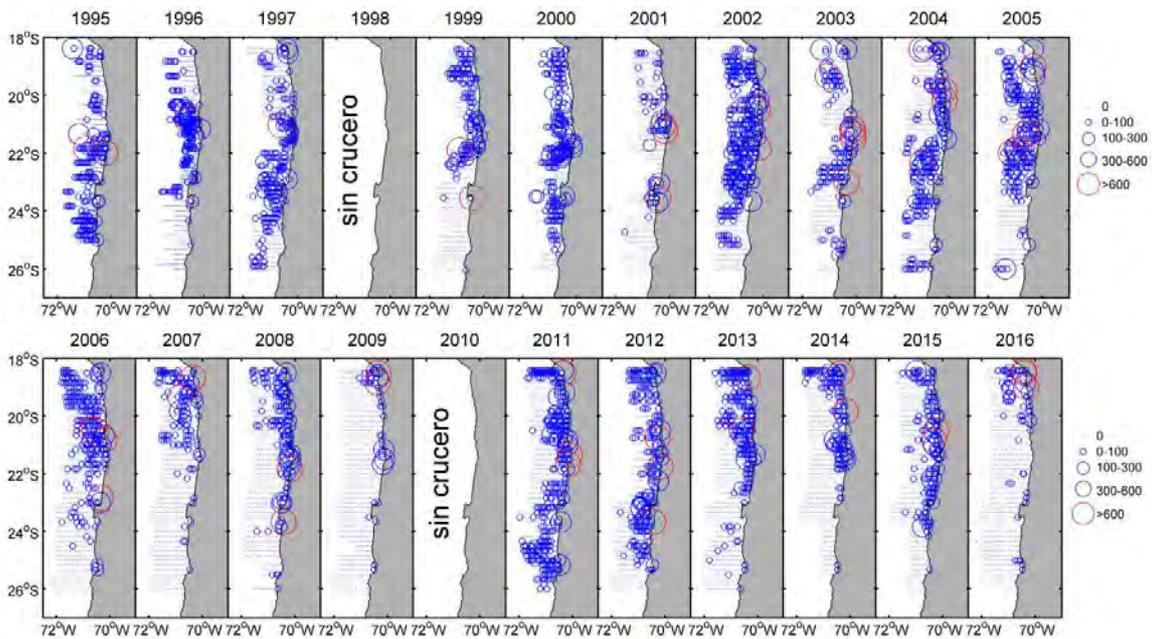


Figura 29. Distribución espacial de los desoves de anchoveta en la zona norte de Chile identificados a través de los cruceros orientados a la evaluación de biomasa desovante por medio del Método de producción Diaria de Huevos (MPDH).

Uno de los aspectos destacados en el esquema de modelación biofísica planteado en este estudio es la precisión en la inicialización del modelo, donde la ubicación espacial de la liberación de los individuos modelados es clave (ver Vásquez *et al.*, 2017 para detalles). En el presente estudio utilizando la predicción espacial de Modelos Aditivos Generalizados se generaron distribuciones independientes para cada pulso de desove (ver sección 6.2.2. Submodelo de sincronización del desove). Este procedimiento consideró la distribución espacial de la abundancia de huevos de anchoveta registrados por el crucero de evaluación del desove, las cuales alimentaron al modelo predictivo espacial. Este análisis permite la generación de individuos (*drifters*) los cuales tuvieron una ubicación espacial única y, en conjunto, replicaron la densidad espacial de huevos de anchoveta registrados por los cruceros de evaluación durante el máximo de desove anual. Además, en el caso de los años donde no se realizó el crucero de evaluación (1998 y 2010), el modelo espacial se estructuró con las condiciones de desove registradas en años previos y posteriores. La **Figura 30** muestra la generación de *drifters* a partir del modelo espacial GAM que simula el desove de anchoveta y que rescata los rasgos espaciales observados bajo una perspectiva

de modelación individual. A partir de la producción de huevos en el espacio se obtuvo la distribución espacial de 20.000 individuos, los cuales ingresan al modulo de liberación espacial de ICHTHYOP dando un inicio realista a la modelación. De esta manera, se generaron tantos sets de condiciones de desove como años de modelación se consideraron rescatando la dinámica espacial del proceso reproductivo.

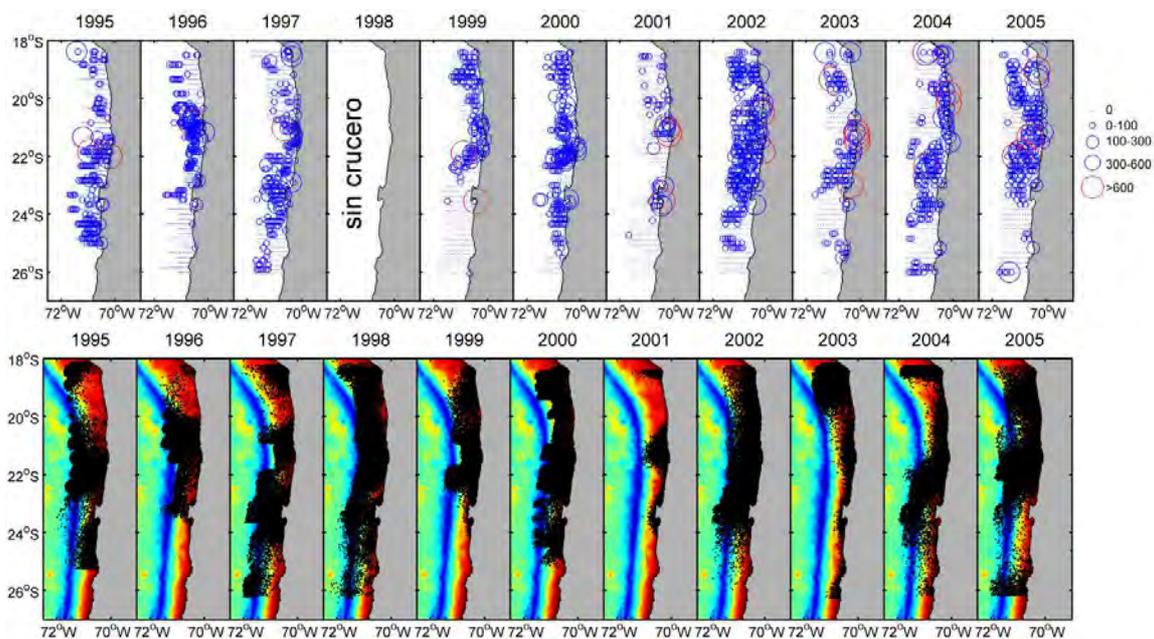


Figura 30. Desove observado de anchoveta año periodo 1995-2016 (panel superior); y desove modelado de anchoveta periodo 1995-2016, cada punto corresponde a individuos simulados para la liberación en ICHTHYOP, en colores la batimetría del modelo hidrodinámico.

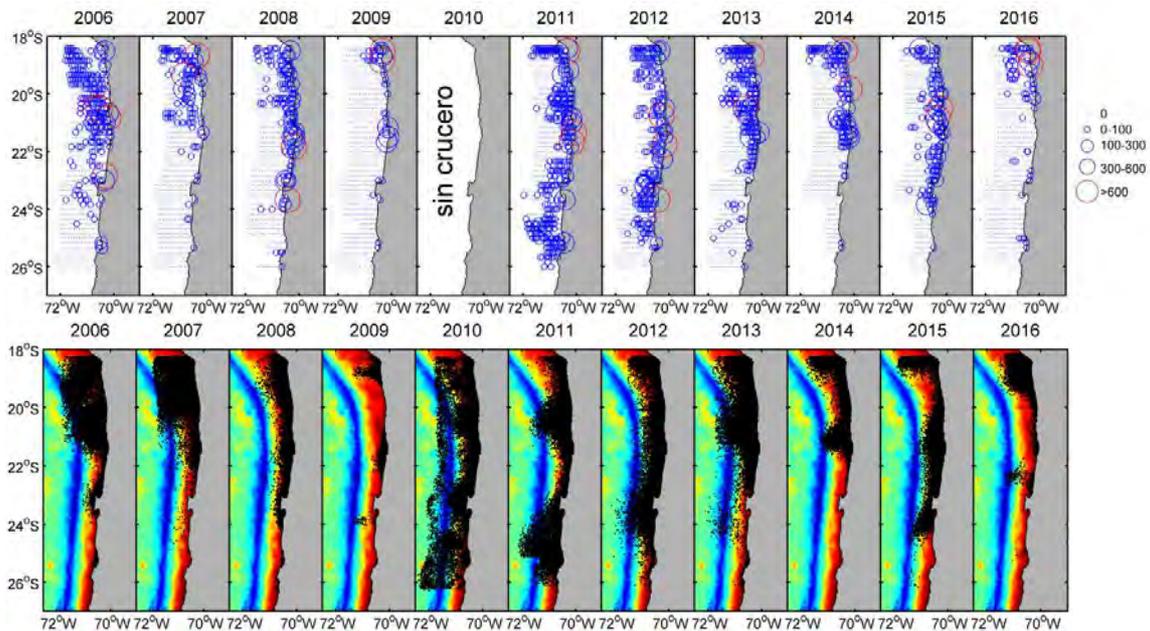


Figura 30 (cont...). Desove observado de anchoveta año periodo 1995-2016 (panel superior); y desove modelado de anchoveta periodo 1995-2016, cada punto corresponde a individuos simulados para la liberación en ICHTHYOP, en colores la batimetría del modelo hidrodinámico.

Asumiendo que la evaluación directa del desove de anchoveta, en general, es realizada durante el período de máxima actividad reproductiva (Reyes *et al.*, 2014), el crucero describe la distribución espacial del proceso reproductivo y permite evaluar la recurrencia de zonas de desove y la variabilidad interanual espacial de este proceso. La **Figura 31** muestra los resultados del análisis de recurrencia del desove de anchoveta en el norte de Chile. Se identifican tres focos de mayor densidad media del desove a través de los años, el primero, y de mayor extensión espacial, situado frente a la localidad de Chipana al sur de Iquique ($\sim 21^{\circ}\text{S}$) donde se observa un área de alta densidad, con mayor variabilidad y que constituye un área recurrente de desove ligada a la franja costera. La segunda, área en extensión, es la ubicada en la región costera situada al sur de Arica ($\sim 18^{\circ}30'\text{S}$) donde existe un área recurrente de desove muy restringida a las primeras millas de la costa. Finalmente, la tercera y más reducida área recurrente de desove se sitúa en el área costera en torno a Antofagasta en las localidades de Mejillones y caleta coloso ($\sim 23^{\circ}30'\text{S}$). Luego existen algunas áreas ocasionales de desove principalmente centrados entre los 20° y 22°S , las cuales evidencian que en algunos años el desove puede extenderse costa-afuera.

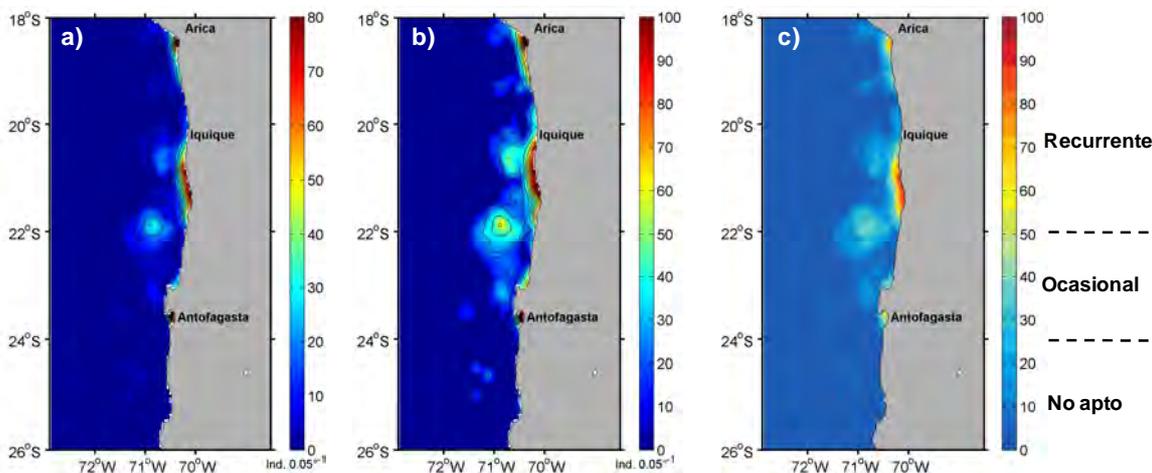


Figura 31. Identificación de las zonas de desove de anchoveta en el norte de Chile: a) promedio espacial periodo 1995-2016; b) desviación estándar del promedio espacial; c) identificación de zonas recurrentes de desove.

Una vez identificadas- las zonas de desove recurrente de anchoveta, se analizó la variabilidad interanual del centro de gravedad del desove para identificar posibles patrones espacio-temporales en la actividad reproductiva de la anchoveta. La **Figura 32a** muestra la ubicación del centro de gravedad del desove para el periodo 1995-2016 y el rango latitudinal del proceso reproductivo. La variabilidad interanual del desove muestra un patrón de largo plazo en su ubicación latitudinal, evidenciando que posterior al año 2003 el centro de gravedad del desove de anchoveta se ha registrado con mayor frecuencia al norte de los 21°S con los años 2007, 2009 y 2016 representando la mayor extensión norte. Esta situación también puede ser observada al analizar la frecuencia de ocurrencia del desove por región administrativa (**Figura 32b**) donde se observa que en el largo plazo las regiones de Tarapacá y Arica y Parinacota

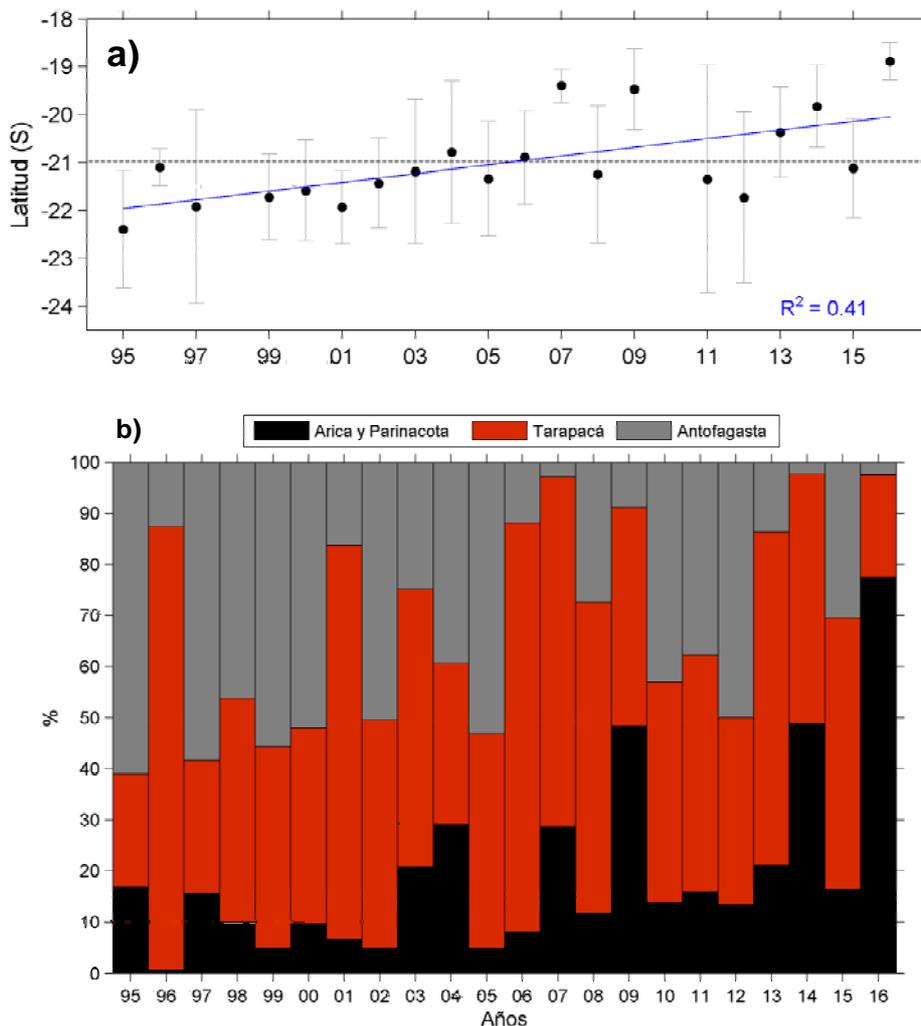


Figura 32. a) Variabilidad interanual del centro de gravedad del desove de anchoveta en el norte de Chile; b) Frecuencia de ocurrencia de desove de anchoveta por región administrativa, periodo 1995-2016.

6.2.2. Submodelo de sincronización temporal del desove

Un punto relevante asociado al esquema de modelación biofísica es la definición del comienzo y el fin de la temporada reproductiva en un ciclo anual de modelación. El esquema propuesto en este proyecto incluyó una liberación sincronizada con la actividad reproductiva de las hembras de anchoveta en la secuencia inicio, máximo y fin del desove, los cuales deben estar definidos por un método adecuado que dé cuenta de estos procesos biológicos en la escala intra e interanual. La estimación de temporada reproductiva se llevó a cabo a partir de una serie de tiempo mensual de IGS proveniente del seguimiento

biológico regular sobre las flotas artesanal e industrial en los puertos de Arica, Iquique y Antofagasta. De acuerdo a la metodología propuesta, para cada año del periodo 1995-2016 se consideró un año biológico para rescatar el ciclo anual del desove (marzo-febrero en anchoveta), considerando hembras maduras (11-18 cm en anchoveta). Una vez definidos estos parámetros poblacionales, la modelación se enfocó en el máximo reproductivo definido como los percentiles de 25 y 75% en torno al máximo estimado por el modelo sigmoideo con distribución normal asimétrica. La Tabla V muestra el resultado de la estimación del inicio, máximo y termino de la temporada reproductiva para anchoveta y las fechas de inicio y término de la modelación biofísica. La variabilidad interanual en estos parámetros se observa en la **Figura 33**. En general, la temporada reproductiva de anchoveta en el norte de Chile se encuentra centrada entre los meses de agosto y septiembre (**Figura 33c**), donde alcanza su máximo, con cierta variabilidad interanual que arroja una leve tendencia a un inicio más temprano de la temporada reproductiva desde 2013. En cuanto a la duración de la temporada reproductiva, ésta muestra signos marcados de variabilidad temporal (**Figura 33b**) con una duración en torno a los 3,5 meses al inicio de la serie durante el periodo 1994-1997, para luego aumentar, oscilando entorno a los 4 meses entre hasta 2012 (incluso acercándose a los 5 meses de duración), mientras que los dos últimos años analizados la temporada reproductiva vuelve a acortarse cayendo incluso bajo los 3 meses en 2016. Estas estimaciones indicaron el inicio y término del proceso de modelación biofísica en anchoveta y las liberaciones se realizaron cada 5 días en este periodo estimado. Consistentemente, la modelación biofísica incorporó estas variaciones demográficas manifestadas por la anchoveta en la zona norte de Chile, por lo que los indicadores de sobrevivencia y reclutamiento emanados de este estudios incorporan intrínsecamente estos aspectos relacionados con el stock desovante de anchoveta.

Tabla V. Resultados de la estimación de temporada reproductiva de anchoveta: a, b y c son los parámetros de la función sigmoidea; 25% y 75% representan el inicio y termino de la actividad reproductiva en año biológico. Las columnas en rojo indican los estimados de inicio y término de la modelación biofísica.

Año	a	b	c	25%	50%	60%	75%	Duración	Fecha inicio	Fecha máximo	Fecha termino	Inicio máximo	Fin máximo
1994	48.20	4.24	0.31	3.65	5.91	6.91	8.78	3.26	20/05/1994	28/07/1994	24/10/1994	20/05/1994	28/08/1994
1995	Información incompleta												
1996	70.14	3.51	0.27	3.47	6.06	7.20	9.35	3.73	14/05/1996	01/08/1996	10/11/1996	14/05/1996	06/09/1996
1997	55.41	5.17	0.29	4.50	6.87	7.91	9.88	3.41	14/06/1997	26/08/1997	26/11/1997	14/06/1997	27/09/1997
1998	95.00	4.08	0.23	4.77	7.84	9.19	11.74	4.42	23/06/1998	26/09/1998	20/02/1999	23/06/1998	05/11/1998
1999	94.55	3.85	0.23	4.52	7.59	8.94	11.48	4.42	15/06/1999	18/09/1999	13/02/2000	15/06/1999	29/10/1999
2000	82.15	3.45	0.23	4.01	7.06	8.40	10.93	4.39	01/06/2000	01/09/2000	28/01/2001	01/06/2000	12/10/2000
2001	81.93	3.76	0.26	3.82	6.48	7.65	9.85	3.82	25/05/2001	14/08/2001	25/11/2001	25/05/2001	19/09/2001
2002	71.66	4.39	0.24	4.81	7.71	8.98	11.38	4.17	24/06/2002	21/09/2002	10/02/2003	24/06/2002	30/10/2002
2003	71.42	3.86	0.27	3.82	6.40	7.54	9.68	3.72	25/05/2003	12/08/2003	20/11/2003	25/05/2003	16/09/2003
2004	75.22	4.20	0.23	4.80	7.80	9.13	11.61	4.32	24/06/2004	24/09/2004	17/02/2005	24/06/2004	03/11/2004
2005	76.92	4.02	0.25	4.27	7.06	8.28	10.59	4.01	08/06/2005	01/09/2005	18/01/2006	08/06/2005	08/10/2005
2006	74.75	3.83	0.27	3.78	6.36	7.49	9.63	3.71	24/05/2006	10/08/2006	18/11/2006	24/05/2006	14/09/2006
2007	82.68	4.01	0.25	4.22	6.97	8.18	10.46	3.96	06/06/2007	29/08/2007	14/01/2008	06/06/2007	05/10/2007
2008	77.27	3.70	0.23	4.25	7.24	8.56	11.05	4.32	07/06/2008	07/09/2008	01/02/2009	07/06/2008	17/10/2008
2009	80.85	3.61	0.23	4.19	7.23	8.56	11.08	4.37	05/06/2009	07/09/2009	02/02/2010	05/06/2009	17/10/2009
2010	73.10	4.12	0.28	3.96	6.48	7.59	9.68	3.63	29/05/2010	14/08/2010	20/11/2010	29/05/2010	17/09/2010
2011	69.13	4.01	0.24	4.51	7.46	8.76	11.20	4.25	15/06/2011	14/09/2011	05/02/2012	15/06/2011	23/10/2011
2012	83.71	4.01	0.21	4.99	8.25	9.69	12.39	4.69	29/06/2012	07/10/2012	12/03/2013	29/06/2012	20/11/2012
2013	67.79	3.62	0.30	3.20	5.51	6.52	8.43	3.32	06/05/2013	15/07/2013	13/10/2013	06/05/2013	16/08/2013
2014	76.10	4.20	0.22	4.96	8.06	9.43	12.00	4.47	28/06/2014	01/10/2014	28/02/2015	28/06/2014	12/11/2014
2015	58.11	4.88	0.27	4.64	7.20	8.32	10.44	3.68	19/06/2015	05/09/2015	13/12/2015	19/06/2015	09/10/2015
2016	56.36	4.68	0.34	3.62	5.68	6.59	8.29	2.97	18/05/2016	21/07/2016	09/10/2016	18/05/2016	18/08/2016

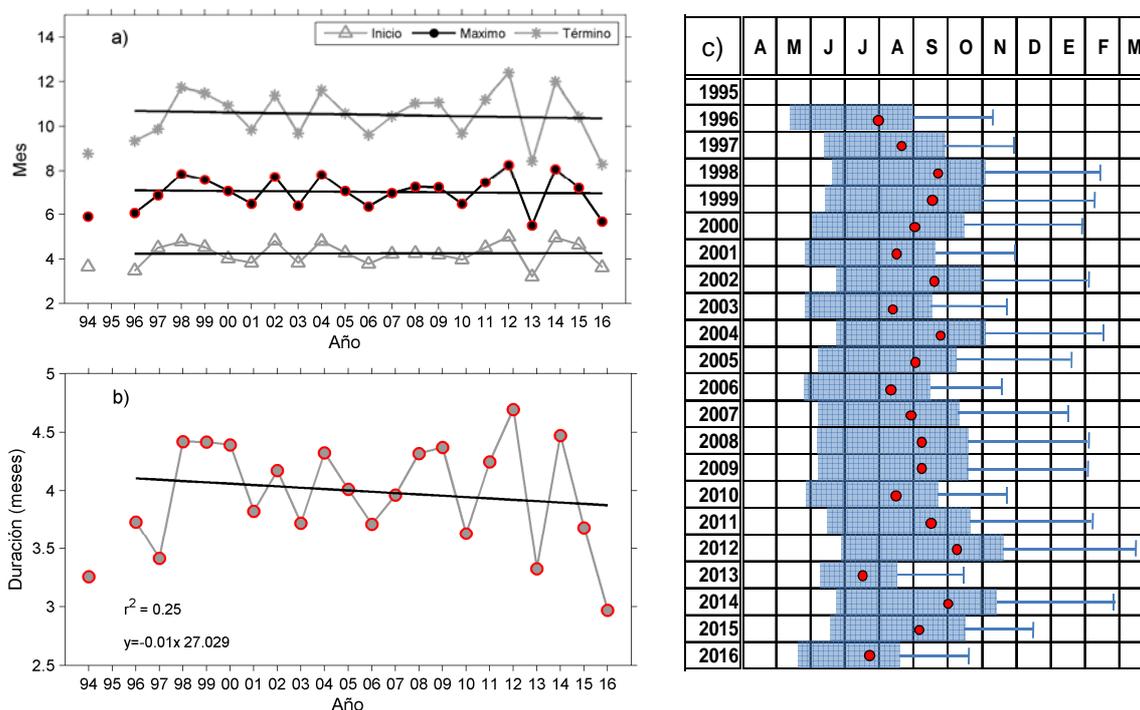


Figura 33. a) comienzo, máximo y fin de la temporada reproductiva de anchoveta en la zona norte de Chile y regresión lineal para cada serie de tiempo; b) duración de la temporada de desove de la anchoveta calculada como el tiempo transcurrido entre el inicio y el término estimado, y; c) esquema gráfico de la extensión del periodo reproductivo, el punto rojo indica el máximo estimado.

6.2.3. Submodelo de crecimiento temperatura-dependiente

Uno de los principios de la modelación basada en el individuo indica que la dinámica de una población emerge de la historia de vida de los individuos, pero el ciclo de vida de los individuos y su comportamiento está completamente representado por reglas empíricas que describen los procesos biológicos (Grimm *et al.*, 2005). Una de esos aspectos clave es el patrón del crecimiento, el cual es variable entre individuos y altamente influenciado por la temperatura del medio (Jobling, 1994). En este estudio la temperatura se incorporó como un modulador, tanto el desarrollo de huevos, como el crecimiento de larvas y juveniles de anchoveta.

La **Figura 34a** muestra las curvas de desarrollo de huevos de anchoveta cultivados a distintas temperaturas evidenciando la sensibilidad respecto a esta variable. El tiempo transcurrido entre el desove y la eclosión de larvas con saco vitelino fue de 72.2, 56.4, 46.7,

37.4 y 31.8 para temperaturas de 12°, 14°, 16°, 18° y 20° respectivamente mostrando una variación de 56% en el tiempo de desarrollo como respuesta a un cambio de 8°C. Por otra parte, la **Figura 34b** muestra las curvas de crecimiento larval obtenidas desde datos experimentales para anchovetas mantenidas en distintas temperaturas. Las tasas de crecimiento promedio fueron de 0.126, 0.170, 0.183 y 0,200 mm d⁻¹ para individuos mantenidos en condiciones controladas a 10°, 12°, 15° y 18°C respectivamente. Lo anterior considera que el tiempo transcurrido entre la eclosión y la talla referencial de 10 mm es de 58, 44, 41 y 39 días respectivamente.

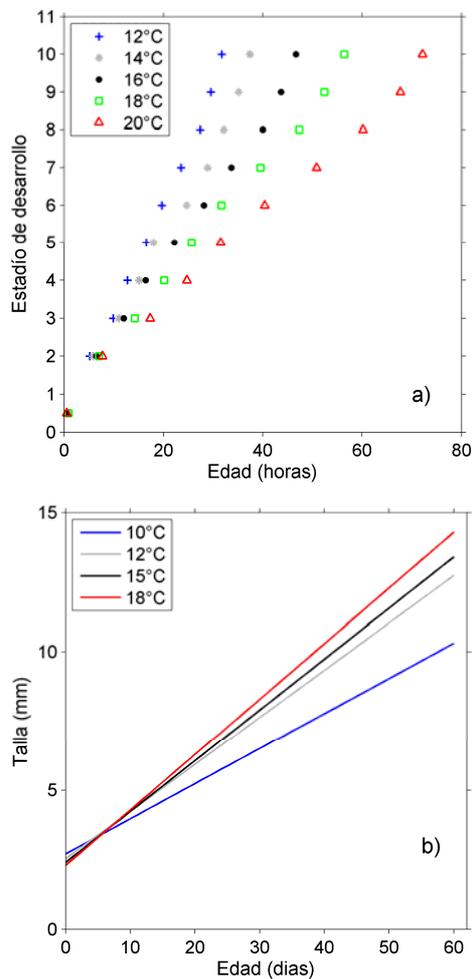


Figura 34. a) Desarrollo de huevos de anchoveta bajo distinto regímenes de temperatura (modificado de Claramunt *et al.*, 2007); b) curvas de crecimiento temperatura-dependiente para larvas y juveniles de anchoveta (modificado de Llanos-Rivera, 2005).

De acuerdo a estos criterios realistas, el crecimiento en el módulo de ICHTHYOP consideró que el crecimiento entre un paso de tiempo y el siguiente es dependiente de las condiciones térmicas que experimente en su cambio de ubicación tridimensional provistas por el modelo hidrodinámico ROMS y el ritmo de crecimiento está dado por los cambios en la pendiente reportados por Moreno *et al.* (2011). En este contexto, la **Figura 35** muestra la comparación entre la curva de crecimiento medio obtenido en la modelación biofísica (ajustado al ritmo de crecimiento de Moreno *et al.*, 2011) respecto a estudios de crecimiento temprano de anchoveta, evidenciando que el modelo biofísico es capaz de reproducir el patrón de crecimiento en fases reportado para la anchoveta en el norte de Chile, desde el cual los desvíos estarán dados por las diferencias térmicas experimentadas por cada individuo en su historia de vida temprana.

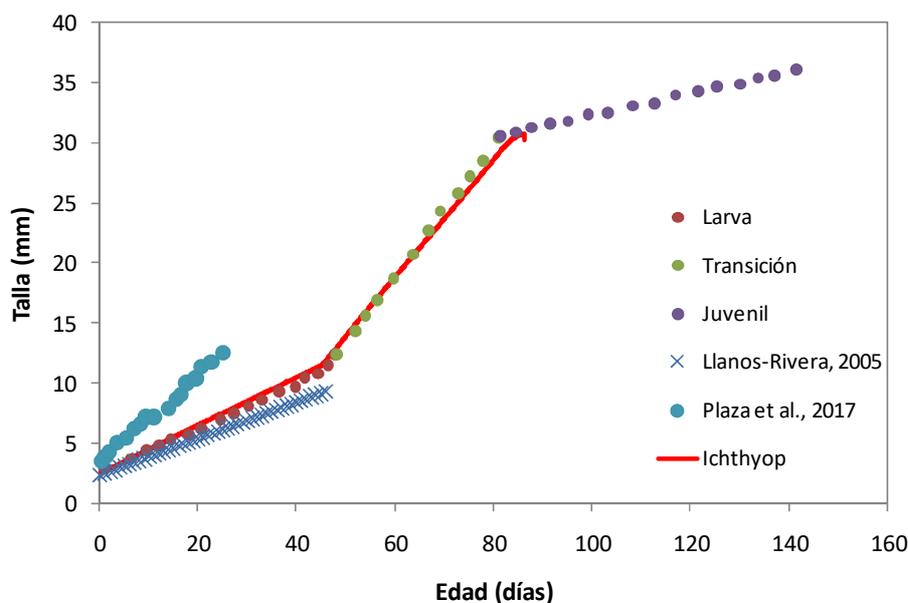


Figura 35. Función de crecimiento individual considerada en ICHTHYOP basada en lo propuesto por Moreno *et al.*, (2011) en relación a otros estudios de crecimiento temprano de anchoveta en el norte de Chile.

En este contexto, La **Figura 36** muestra el resultado del crecimiento biofísico y evidencia las diferencias en la historia de vida temprana de individuos desovados el mismo día (desove del 12/08/1995), pero en distintos sitios de desove a lo largo del hábitat utilizado para la reproducción de anchoveta. Este ejemplo muestra que individuos de 60 días de edad, y que provienen de un mismo evento de desove, tienen un rango de tamaño que va

desde 9,5 a 16 mm de longitud total, lo que tiene un impacto en la evaluación del crecimiento individual. En el actual esquema de modelación, la temperatura es la única variable que genera desvíos en el patrón de crecimiento medio de los individuos, sin embargo muestra una amplitud importante en la relación talla-edad, de esta manera el crecimiento individual puede ser altamente variable si se añaden al sistema otros componentes como la alimentación y la variabilidad intrínseca de la población (efecto materno). La implementación de modelos biofísicos que incorporen aspectos relacionados con la bioenergética del crecimiento (i.e. acoplamiento a modelos biogeoquímicos) constituyen una herramienta poderosa a ser explorada en futuras investigaciones que apunten a la comprensión del impacto de la historia de vida individual en los rasgos del crecimiento poblacional.

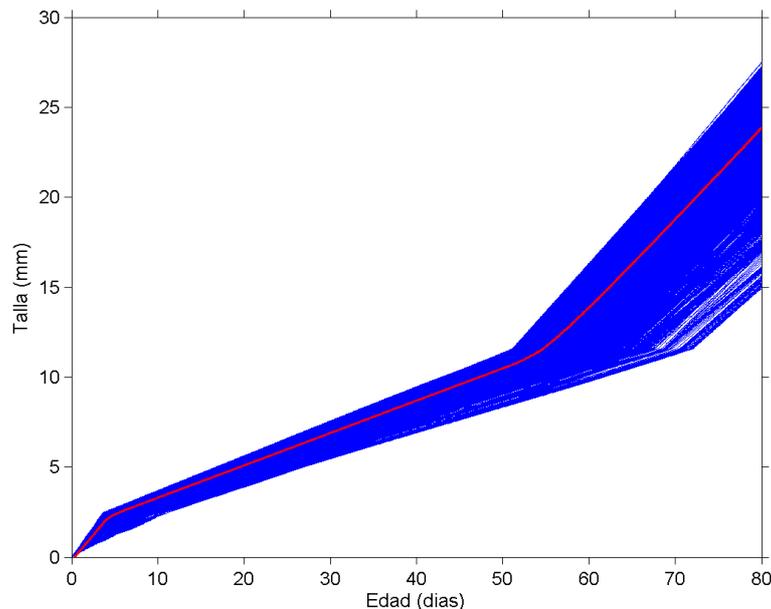


Figura 36. Ejemplo de crecimiento individual temperatura-dependiente para un pulso de desove biofísico de anchoveta realizado el 17/08/1995.

6.2.4. Submodelo de movimiento por estadío

Un esquema de boyantes positiva fue implementado para huevos de anchoveta con el propósito de reproducir la distribución de este estadío, el cual en esta especie tiene una alta flotabilidad producto del alto contenido acuoso y bioquímico de los huevos (Krautz *et al.*, 2010) lo que genera una ubicación recurrente sobre la picnoclina. Además, se implementó

un modelo de migración diurno-nocturna para larvas y juveniles de anchoveta en función de las observaciones de campo. Desde datos observados de distribución vertical de larvas de anchoveta en relación a la funcionalidad de la vejiga gaseosa (obtenidos de Landaeta & Castro, 2013) se estimó la probabilidad de encuentro de larvas de anchoveta para dos estratos de talla: <10mm y >10mm desde los que se ajustó un modelo de migración diurno-nocturna que puede calcular la posición de las larvas a cualquier hora del día. La **Figura 37** muestra los resultados de esta aproximación, destacando que en larvas pequeñas, no se observó un patrón marcado de migración vertical, con mayor probabilidad de encuentro sobre los 50 m de profundidad (**Figura 37a**). Para larvas sobre 10 mm la migración vertical resultó más evidente con máxima probabilidad de encuentro en superficie durante la noche (entre las 20 y 6 h) y profundización hasta los 80 m durante el día (**Figura 37b**). Para este último estrato de tamaño se ajustó un modelo sinusoidal para la descripción del movimiento individual de anchovetas durante su historia de vida temprana.

De esta manera, el movimiento vertical de huevos, larvas y juveniles de anchoveta incluyó que la densidad de huevos disminuye ligeramente con el desarrollo y los huevos ascienden ligeramente hacia la superficie con el objeto que permanecieran sobre la pycnoclina y esquema de migración diurna nocturna diferenciado por talla fue incluido en la modelación biofísica resultando en una extensión vertical creciente a medida que aumenta la talla (**Figura 37**). Así, cuando ocurre la eclosión las larvas miden 2,48 mm, y hasta los 10 mm de longitud total realizan movimientos verticales aleatorios a lo largo del día, la profundidad máxima que alcanzan son los 30 metros, mientras que los individuos mayores a 10 mm realizan cada día una migración vertical alcanzando una profundidad máxima de 50 m durante las horas y retornando a la superficie en durante la noche. Este comportamiento lo realizaron hasta el final de la simulación (**Figura 38**).

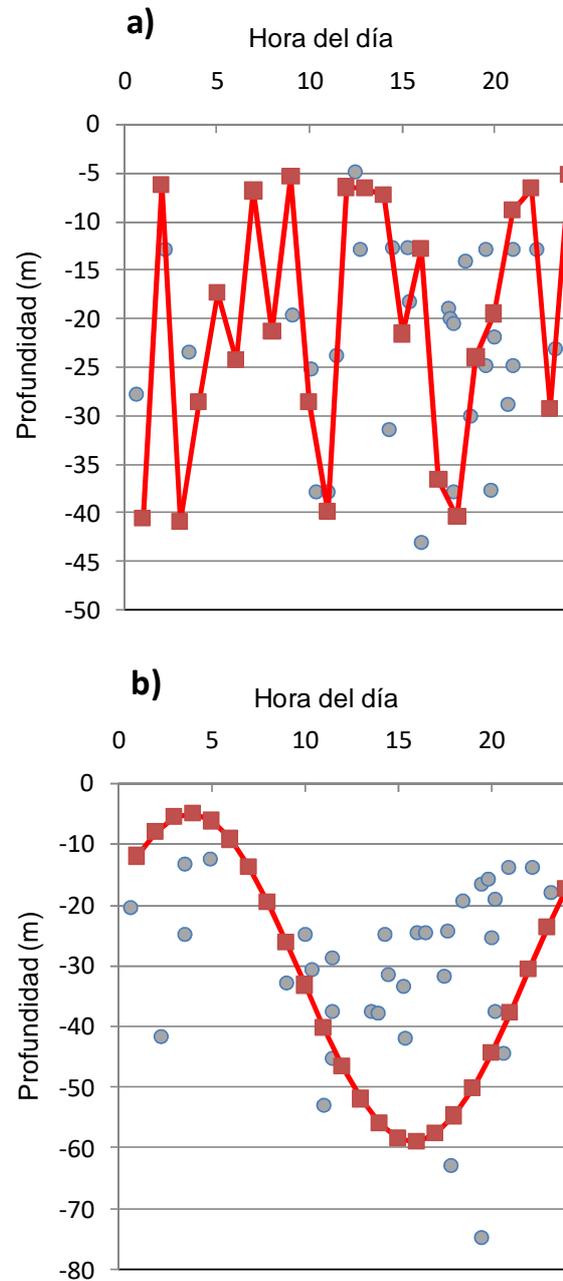


Figura 37. Distribución vertical de larvas de anchoveta desde datos observados (puntos grises) y esquema de migración diurno-nocturna usada en el modelo biofísico (línea roja) para: a) larvas bajo 10 mm de longitud total y b) larvas sobre 10 mm de longitud total.

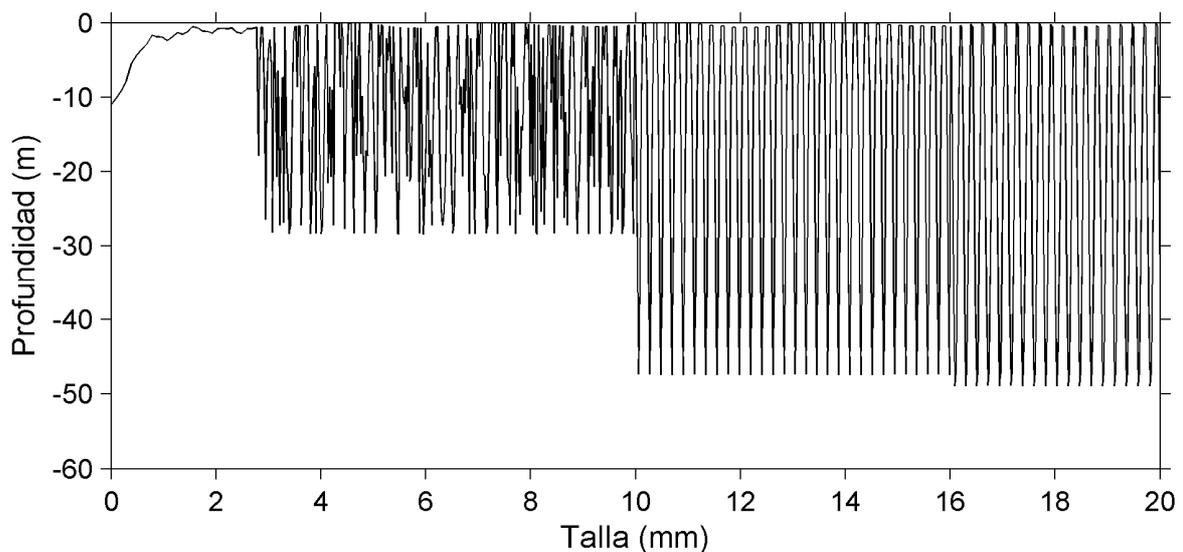


Figura 38. Esquema de movimiento vertical de larvas de anchoveta como resultado de la modelación biofísica. Incluye flotabilidad de huevos y migración diferenciada por edad para larvas y juveniles. El último patrón mostrado se extendió hasta el final de la simulación.

6.3. Índices de reclutamiento a partir de la modelación biofísica comparados con índices de reclutamiento provenientes de otras fuentes de información

La modelación biofísica utilizada en el presente estudio, involucró el acoplamiento de un modelo basado en el individuo con un modelo hidrodinámico. En este esquema de modelación las características poblacionales emergieron de las propiedades individuales de los individuos modelados y su interacción, tanto con el medio como con otros agentes (Grimm *et al.*, 2005). En el caso de la modelación de la anchoveta en el norte de Chile, la modelación se inició con el proceso de desove, el cual involucra una dimensión temporal (*timing* del desove) y espacial (área de desove) y continuó con la modelación del transporte de huevos, larvas y juveniles hasta que alcanzaron una edad de 60 días. Durante este tiempo se contabilizaron todos los individuos que alcanzaron el criterio de reclutamiento y la integración de todos estos individuos entregó información respecto a la conectividad y el reclutamiento larval de la anchoveta desde los sitios de desove. Una de las características principales de esta modelación es el criterio espacialmente explícito que posee, en donde en cada paso de tiempo es posible obtener las variables que experimenta cada individuo entre

ellas la posición espacial. De esta manera, las trayectorias de los individuos que han reclutado exitosamente fueron ser trazadas en función de la edad/talla que experimentaron y en conjunto proporcionaron índices espaciales y temporales hacia el reclutamiento (ver **Figura 39** para ejemplo). Las trayectorias obtenidas para cada uno de los pulsos de desove fueron discretizadas a partir de un criterio de regiones administrativas y se reportan en el Anexo VI (desoves originados en la región de Arica y Parinacota), Anexo VII (desoves originados en la región de Tarapacá) y anexo VIII (desoves originados en la región de Antofagasta).

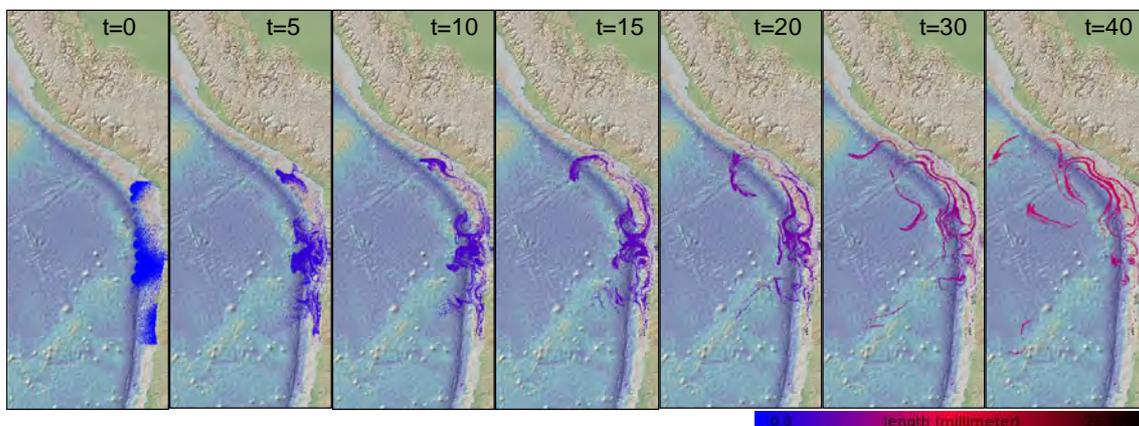


Figura 39. Ejemplo de simulación del transporte de individuos liberados en la zona de desove de anchoveta en el norte de Chile. Los paneles corresponden a resultados rescatados cada 5 y 10 días (t). El color de cada partícula es proporcional a la talla estimada en cada edad bajo el submodelo de crecimiento.

Los resultados de las trayectorias de transporte hasta la etapa de previa al reclutamiento, permitieron evaluar las distancias de transporte que es equivalente a la distancia lineal (en km) entre el punto geográfico donde se realiza el desove y el punto geográfico donde el individuo recluta larvalmente (alcanza los 60 días de edad). Este análisis permitió clasificar desde un punto de vista teórico a las poblaciones de acuerdo a su nivel de dispersión en "poblaciones con retención local" (cerradas) o "poblaciones ampliamente dispersas" (abiertas) (Cowen *et al.*, 2007). La **Figura 40** muestra el diagrama de dispersión desde una perspectiva interanual. Las magnitudes del transporte de anchoveta oscilaron entre 5 y hasta sobre 1000 km desde su punto de origen con un promedio de dispersión en torno a los 180

km. Estas escalas de desplazamiento variaron entre años, donde las mayores distancias se obtuvieron para los años 2001, 2003, 2008 y 2016 con un transporte medio en torno a los 400 km, mientras que los años con menor expansión desde las zonas de desove fueron 1996, 2002 y 2009 con magnitudes de transporte medio cercanas a 100 km. Estos resultados ubican a la anchoveta de la zona norte de Chile dentro de las poblaciones con probabilidad de dispersión en torno a la media para peces teleósteos, sin embargo lejos de las poblaciones más dispersivas para peces marinos (Pineda *et al.*, 2007). El proceso de transporte y dispersión de peces con huevos pelágicos depende de las escalas de los procesos físicos involucrados (descritos anteriormente) y de la duración de la etapa larval pelágica de las especies, donde el movimiento horizontal está fuertemente ligado a los procesos físicos.

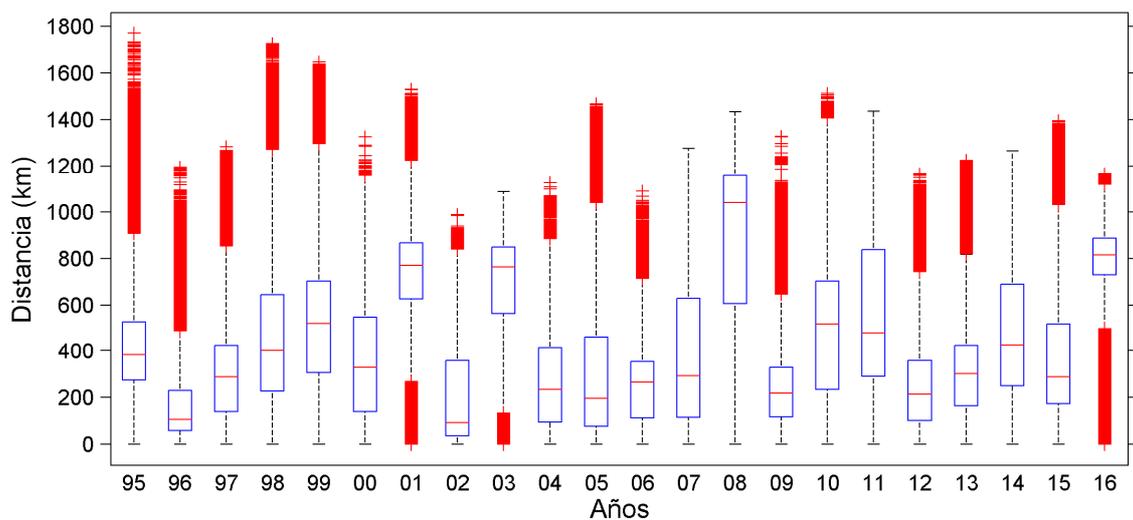


Figura 40. Diagrama de distancias de dispersión de estadios tempranos de anchoveta hasta la edad de reclutamiento biofísico (60 días) obtenidos a través de modelación en el período 1995-2016.

Un aspecto relevante de considerar desarrollo y crecimiento basado en variables ambientales (e.g. temperatura, alimentación) es aproximarse a los tiempos de duración de la fase larval pelágica (DLP) que determina el tiempo en que los individuos carecen de capacidad natatoria activa y son vulnerables al transporte por corrientes y mortalidad por advección (y predación, no evaluada en este proyecto). En este estudio, se consideró el desarrollos de huevos y crecimiento de larvas y juveniles de anchoveta dependiente de la

temperatura (provista por el modelo hidrodinámico) que determina el *delta* de crecimiento entre un paso de tiempo y el siguiente, sin embargo, y a diferencia de lo establecido para otras especies pelágicas la DLP fue considerada fija, asumiendo que los antecedentes para la anchoveta en el norte de Chile indican que el proceso de transición hacia la etapa de juvenil es dependiente de la edad, pudiendo tener un rango amplio de tallas al iniciar los cambios morfológicos que indican el inicio de la natación activa y la formación de cardúmenes (Moreno *et al.*, 2011). Además, como se describe en el submodelo de crecimiento, la historia individual dependiente de la temperatura genera amplitud en las talas a la edad ratificando estos antecedentes.

6.3.1. Índices de pre-reclutamiento temporal desde modelación biofísica

Uno de los objetivos principales de este estudio es "obtener índices asociados al reclutamiento de la anchoveta, independientes de la estimación acústica, entre la XV y II Regiones". Bajo el esquema de modelación planteado, el índice de reclutamiento biofísico contrastó dos etapas clave de la historia de vida temprana de peces pelágicos que tienen directa incidencia en la dinámica del reclutamiento: primero, la magnitud del desove anual, la cual se consideró relacionada con el potencial reproductivo de la biomasa desovante; segundo, la retención de huevos y larvas de anchoveta en potenciales áreas de crianza/reclutamiento, la cual estuvo relacionada con la sobrevivencia de esta etapa de la historia de vida que considera un alto nivel de pérdidas para la población. La obtención de este indicador de reclutamiento, además de ser de alta utilidad en el entendimiento del modelo conceptual de la dinámica del ingreso de las clases anuales, tiene como característica el ser independiente de la información proveniente de la actividad pesquera y puede ser utilizado como información de referencia para la estimación del reclutamiento en los modelos de dinámica poblacional. Además, considerando que el reclutamiento es considerado como la magnitud de individuos que ingresan a la población como grupo de edad 0, bajo una perspectiva operacional, el indicador de reclutamiento biofísico tiene el potencial de ser considerado útil como predictor (meses antes) de la intensidad del reclutamiento futuro.

El primer indicador temporal que se obtiene de la modelación biofísica es el índice de sobrevivencia, el cual está relacionado con la proporción de individuos que alcanzó el criterio de reclutamiento (ver punto 5.4.1 Indicadores de reclutamiento, definición de criterios). La **Figura 41** muestra series temporales de sobrevivencia asociada a la modelación de la historia de vida temprana de la anchoveta, que refleja variabilidad a lo largo de más de dos décadas modeladas. la generación de tres series de sobrevivencia corresponden a: i) sobrevivencia global, que considera una área de crianza que se extiende entre Chile y Perú; ii) sobrevivencia Chile, que considera a la proporción de individuos reclutados en la zona de crianza de Chile; iii) sobrevivencia Chile, que considera a la proporción de individuos reclutados en la zona de crianza de Perú (ver **Figura 7** para límites espaciales). Globalmente, el período 1995-2001 estuvo caracterizado por tasas de sobrevivencia por debajo del 40% disminuyendo a 22,8% en 2001. Posteriormente, el año 2002 registra el máximo histórico de sobrevivencia asociado, principalmente, a altos niveles de retención costera en el norte de Chile alcanzando 71,4% de sobrevivencia anual e iniciando un periodo de sobrevivencias anuales oscilando entorno al 4% hasta 2010. Finalmente, posterior al año 2010 se observa una caída progresiva de los niveles de sobrevivencia hasta alcanzar el mínimo histórico de la serie en 2016 con un 15,1%. Estos resultados sugieren que los aspectos biofísicos incluidos en el presente estudio de modelación, generan periodos alternantes de condiciones favorables y desfavorables para la sobrevivencia de estadíos tempranos de anchoveta. Además, los resultados evidencian niveles de sobrevivencia y retención costera comparativamente mayores a otras unidades poblacionales de anchoveta evaluadas biofísicamente, caracterizando al sector norte como un sistema menos advectivo (ver Vásquez et al., 2017 para detalles)

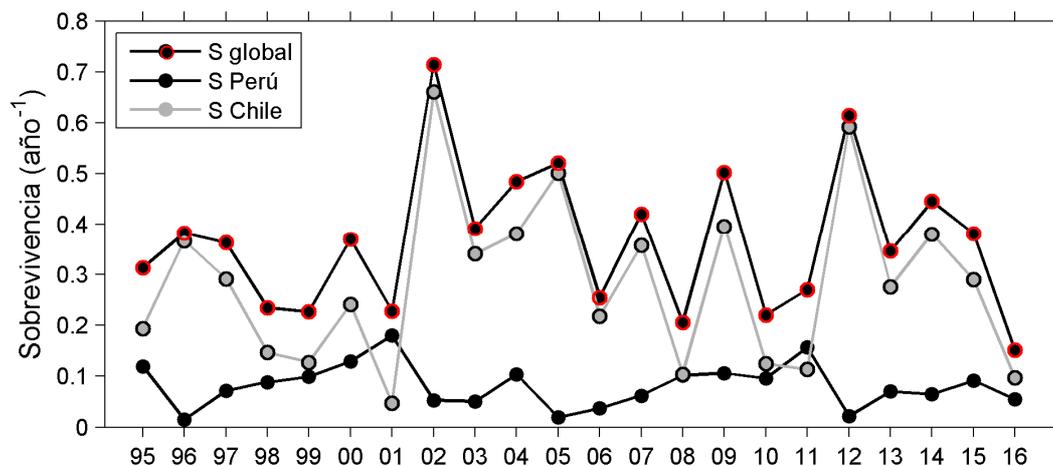


Figura 41. Series temporales de la sobrevivencia de estadíos tempranos de anchoveta hasta 60 días de edad que indican la proporcionalidad en los destinos de los desoves ocurridos en Chile norte (transportados hacia Perú y Chile), obtenida mediante un esquema de modelación biofísica en el periodo 1995-2016.

La incorporación de información asociada a la dinámica reproductiva de pequeños pelágicos en conjunto con modelos que simulen los procesos de sobrevivencia temprana contribuyen a la obtención de indicadores de reclutamiento temprano, con un importante potencial para la administración de estos recursos. La **Figura 42** muestra la serie de estimación de reclutamiento biofísico, la cual integra información relacionada con el stock desovante generada en la evaluación mediante método producción de huevos diaria y mediante el seguimiento pesquero hacia determinar la duración de la temporada reproductiva además de la sobrevivencia de estadíos tempranos obtenida desde modelación biofísica. La extensión de esta serie temporal se restringe a los años donde se ha realizado el MPDH pues toma insumos de abundancia del desove generados en estos estudios. Esta serie tiene como características: i) no correlacionado *a priori* con el modelo estadístico de evaluación de stock, ii) es espacialmente explícito, iii) integrador de características demográficas de la población y variabilidad ambiental en distintas escalas, iv) índice absoluto para el pre-reclutamiento (abundancia de individuos de 60 días de edad), v) posee potencial poder de pronóstico del reclutamiento en el año siguiente al modelado (hacia un modelo biofísico operacional) y; vi) indicador ecológico basado en el ecosistema, altamente recomendado internacionalmente. El indicador de reclutamiento biofísico muestra tres

periodos identificables respecto a la magnitud del reclutamiento estimado: i) periodo 1996-2002 con niveles bajos de reclutamiento; ii) periodo 2002-2007 donde con niveles altos de reclutamiento, y; iii) 2008-2017 con reclutamientos promedios intermedios. El modelo propuesto estima un reclutamiento bajo para el año 2017 donde se observó un periodo reproductivo corto y un corrimiento hacia el norte del centro de gravedad del desove.

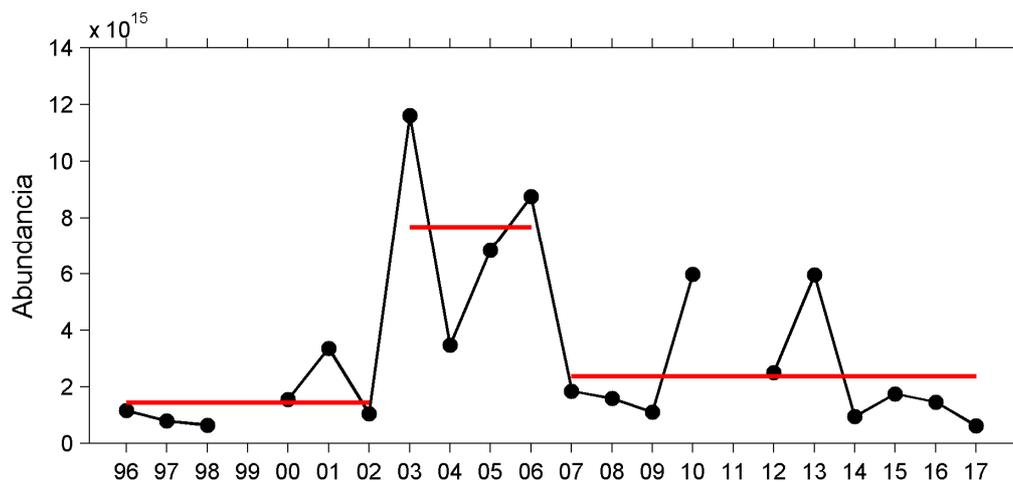


Figura 42. Serie temporal del índice de reclutamiento biofísico para el periodo 1996-2017. Las líneas rojas presentan la identificación de periodos de cambio a lo largo de la serie.

6.3.2. Índice de reclutamiento proveniente de la evaluación de stock de anchoveta

Las principales fuentes de información utilizadas en el modelo de evaluación de stock llevado a cabo por IFOP para la anchoveta en el norte de Chile (Espíndola *et al.*, 2016), corresponden a los desembarques realizados en Chile provenientes de los registros del Servicio Nacional de Pesca (Sernapesca), desembarques realizados en el sur de Perú, biomasa acústica adultos al sur del Perú (1999-2016), biomasa acústica reclutas sur del Perú (1998, 2002-2015) y biomasa acústica reclutas norte de Chile (1997-2002, 2007-2018), biomasa desovante a través del MPH en Chile (1997-2017), pesos a la talla, ojiva de madurez sexual a la talla (Martínez *et al.*, 2009), parámetros de historia de vida de Plaza *et al.* (2017), mortalidad natural $M=2.2 \text{ año}^{-1}$. El modelo está estructurado en escala semestral con dinámica en año calendario, considerando dos eventos reproductivos y dos pulsos de reclutamiento anual, lo que discrepa parcialmente con el modelo conceptual propuesto para la modelación biofísica. De esta manera, asumiendo que el pulso principal de desove

corresponde al del segundo semestre donde se evalúa la sobrevivencia biofísica y se estima el indicador de reclutamiento, se utilizó la serie de reclutamiento del primer semestre estimada por el modelo estadístico edad-estructurado de evaluación de stock. La **Figura 43** muestra a serie de reclutamientos estimados por el modelo de evaluación de stock, donde se evidencia en la serie de reclutamientos estimados tres periodos con distintas magnitudes medias de reclutamiento: i) periodo 1996-1998 con reclutamientos medios en torno 200 millones; ii) periodo 1999-2006 con reclutamientos oscilantes en torno a 300 millones con un máximo nivel el año 2003, y; iii) periodo 2007-2007 con niveles de reclutamientos bajos oscilando en torno a 170 millones, con una leve alza en los dos últimos años evaluados.

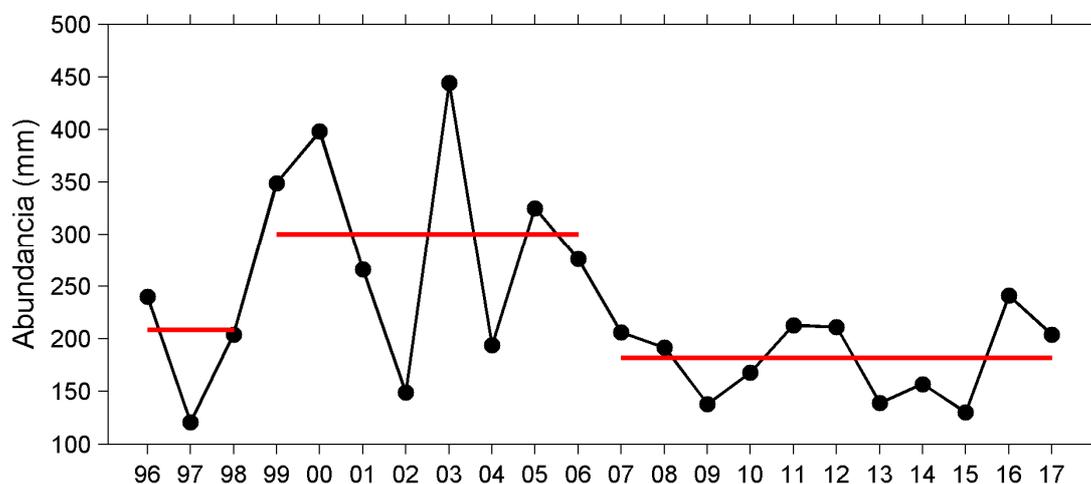


Figura 43. Serie temporal del índice de reclutamiento estimado por el modelo estadístico edad-estructurado para el periodo 1996-2017 y obtenido de Espínola *et al.*, (2017). Las líneas rojas presentan la identificación de periodos de cambio a lo largo de la serie.

6.3.3. Contrastación de índices de reclutamiento biofísico respecto a otros indicadores relevantes.

En consecuencia a los objetivos de este estudio, tanto la serie de sobrevivencia biofísica como el indicador de reclutamiento fueron contrastadas con el reclutamiento estimado por el modelo de evaluación de stock. Inicialmente, se consideró utilizar la serie de reclutamientos observados por el crucero de evaluación acústica RECLAN proporcionada por el FIPA, sin embargo la extensión de la serie y la presencia de brechas no lo permitieron, pues esta presentaba problemas mayores en cuanto a organización y

factibilidad de lectura, presentando archivos corruptos, problema de geo-referenciación, además, información incompleta e información fraccionada. De los dieciocho años de datos recopilados, se ha podido rescatar información para cinco años. Este procedimiento se realizó contrastando los indicadores de modelación biofísica con los obtenidos el año inmediatamente posterior por las otra pieza de información (siguiendo el ciclo de vida de la especie), asociando así el reclutamiento en un tiempo $t+1$ al proceso reproductivo, se sobrevivencia y conectividad ocurrido en el año t . La **Figura 44** muestra el contraste entre las series de sobrevivencia biofísica y las estimaciones provenientes de la evaluación de stock edad estructurada de anchoveta. En general, se observa una correspondencia en las trayectorias de las series de tiempo, evidenciando que el esquema de modelación biofísica tiene el potencial de reproducir en gran medida el proceso de sobrevivencia de estadios tempranos que modula la expresión del reclutamiento meses posterior a la temporada reproductiva, no obstante las series muestran un alejamiento importante en los primeros 7 años donde las estimaciones del modelo de evaluación resultaron notablemente más altas que lo estimado por el esquema de modelación biofísica. En los últimos dos años el modelo de evaluación de stock muestra un levantamiento de los niveles de reclutamiento, los cuales no son rescatados por el modelo biofísico o pueden deberse a la incorporación de individuos sobrevivientes de zonas diferentes a la zona de desove evaluada. Es válido destacar que el modelo de evaluación edad estructurado considera información tanto de Perú como de Chile, por lo que la señal de reclutamiento es global, mientras que la señal de reclutamiento biofísico considera solo la información proveniente del área de desove de Chile (no obstante los sobrevivientes se distribuyen en Chile y Perú). Un desafío hacia futuras versiones del modelo biofísico es el establecimiento de condiciones iniciales que consideren el área de desove global para el stock.

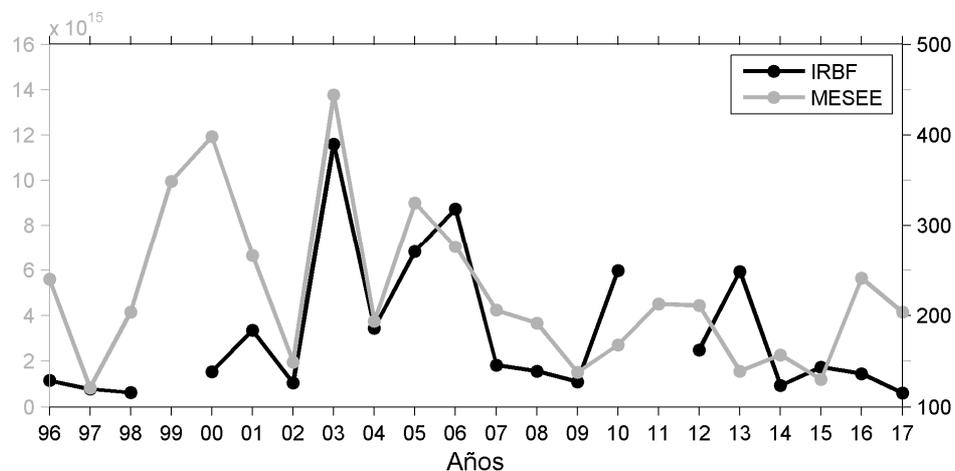


Figura 44. Serie de tiempo de sobrevivencia biofísica (línea sólida negra) contrastada con estimaciones de reclutamiento del primer semestre del año siguiente provenientes de la evaluación de stock de anchoveta obtenida de Espíndola *et al.*, (2017).

La evaluación estadística de la correlación entre las series evidencia que el poder predictivo del reclutamiento (**Figura 45**) por parte de la estimación biofísica resulta bajo tomando en consideración la serie 1995-2016 ($R^2 = 0,368$), no obstante al considerar el periodo 2003-2017 el poder predictivo aumenta casi al doble ($R^2 = 0,601$) sugiriendo que existen ciertas condiciones que generan discordancia en la primera parte de la serie evaluada, las que pueden estar relacionadas con el modelo biofísico (producción de huevos, distribución del desove, extensión de la temporada reproductiva) o con la hipótesis de trabajo que considera sin error el reclutamiento proveniente del modelo de evaluación de stock, no obstante tiene incertidumbre en la estimación y posibles errores de observación en los datos que lo sustentan (Espíndola *et al.*, 2017).

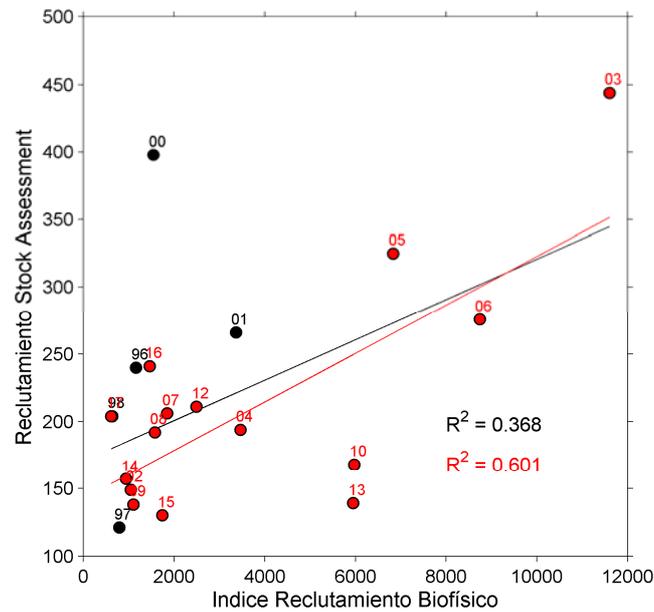


Figura 45. Regresión lineal entre el índice de reclutamiento biofísico y el índice de reclutamiento proveniente de la evaluación de stock edad estructurada. En negro se indica la correlación para todo el periodo evaluado (1995-2016) y en rojo el periodo 2003-2017.

La versión actual del modelo biofísico incorporó información detallada y realista respecto a la dinámica reproductiva de la especie, así como una aproximación al movimiento vertical de la especie y una metodología mecánica para simular las trayectorias de transporte de huevos y larvas de anchoveta. Toda esta información fue integrada en el índice de reclutamiento que se ha descrito. El índice de reclutamiento biofísico mostró la habilidad de reproducir patrones temporales del reclutamiento de anchoveta de forma similar a lo generado por modelos de evaluación de stock, principalmente en el periodo 2003-2017. Sin embargo, existen periodos en que esta serie se desacoplaron de manera importante, principalmente en los primeros años de evaluación biofísica donde se obtuvieron niveles de reclutamiento estimado muy por debajo de lo estimado por el modelo estadístico de evaluación de stock, utilizado como referencia para evaluar el poder predictivo respecto al reclutamiento por parte del esquema de modelación biofísica.

Las diferencias encontradas entre el índice de reclutamiento biofísico y las otras fuentes de información pueden ser discutidas desde varias perspectivas:

i) las fuentes de mortalidad incorporadas en el modelo biofísico, las cuales en la actual versión se encuentran limitadas a la presencia de temperaturas letales y, principalmente, a mortalidad por advección. Estas dos fuentes de mortalidad parecen ser altamente explicativas de la dinámica del éxito de las clases anuales en gran parte de la serie, sin embargo los periodos de desacople pueden estar vinculados a procesos de mortalidad no incluidos en la actual versión del modelo, como lo son procesos bioenergéticos (e.g. alimentación, natación), predación, enfermedades, efecto maternal, etc.. La incorporación de estos aspectos constituyen un desafío hacia futuras versiones del modelo, pudiendo aumentando su capacidad de reproducir la historia de vida temprana y la habilidad de estimar el reclutamiento (DeAngelis & Grimm, 2014).

ii) La estimación certera de la fuerza del desove anual, que constituye uno de los componentes principales del cálculo del índice de reclutamiento biofísico. La precisión en la estimación de este parámetro poblacional por parte de la evaluación directa mediante el método de producción diaria de huevos, es un aspecto que constituye una discusión actual en la investigación pesquera, sesgos en la estimación de la abundancia del desove pueden ser heredados hacia el índice de reclutamiento biofísico, disminuyendo su precisión.

iii) Las estimaciones de reclutamiento generadas por los modelos estadísticos de evaluación de stock edad-estructurados, pueden ser sujeto de errores de observación y de procesos (Quinn & Deriso, 1999). Muchas veces, los primeros años de evaluación considerados en el proceso de modelación tienen un mayor grado de incertidumbre en la información de entrada lo que pudiese impactar en las variable poblacionales. Sin embargo, se debe estudiar en detalle la naturaleza de las diferencias observadas en el primer periodo de las series obtenidas. El estudio detallado de la comparación entre índices, y la posibilidad de incorporación del índice de reclutamiento biofísico dentro del procedimiento de evaluación de stock constituyen desafíos hacia futuras investigaciones en esta línea.

iv) Finalmente, y como ha sido detallado anteriormente, la aproximación biofísica que sustenta este estudio se ha basado en el ciclo de vida de la especie, abordando la historia de vida temprana y simulando el proceso de sobrevivencia hasta la etapa previa al

reclutamiento (60 días de edad). De esta manera, existe una etapa del ciclo de vida no cubierta hasta ahora que corresponde al periodo entre el pre-reclutamiento (simulado por la modelación biofísica) y el reclutamiento estimado por el modelo de evaluación de stock y observado por lo cruceros. Escenarios de mortalidad altos en esta etapa de la historia de vida podrían dar pie a diferencias entre las piezas de información contrastadas. Hasta la fecha no existen estimaciones de la mortalidad natural asociada al proceso de reclutamiento y formación de cardúmenes, lo que constituye una brecha de conocimiento en el estudio de pequeños peces pelágicos.

6.4. Identificación de forzantes físicos hacia el reclutamiento de anchoveta

En los talleres de trabajo conjunto para este objetivo se determinaron las fuentes de datos físicos disponibles hacia el proyecto y sus escalas de variabilidad, se discutió en relación a la literatura reciente asociada al campo oceanográfico en el marco del proyecto, especialmente referida al sector costero-nerítico de la región norte de Chile, donde se verifican procesos de desove y pre-reclutamiento del recurso, así como también acerca de la determinación de variables críticas y forzantes que determinan la variabilidad física del sistema bajo estudio, principalmente vinculantes a los procesos de desove y reclutamiento de anchoveta. Asimismo, se logró consensuar acerca de los mecanismos asociados al procesamiento y análisis (metodologías y herramientas computacionales), almacenamiento, resguardo y formato de la información.

6.4.1. Identificación de forzantes físicos

Las relaciones entre la distribución y abundancia de recursos pesqueros y la variabilidad biofísica del hábitat en que se desarrollan, especialmente en las etapas tempranas de la historia de vida, se establece como un tópico crucial en la asesoría hacia el manejo pesquero. Estas relaciones actúan a diferentes escalas de variabilidad, actuando sobre procesos como la alimentación, el transporte pasivo y comportamiento migratorio, la reproducción y el desove, el crecimiento, reclutamiento, entre otros.

Se ha señalado que el acoplamiento entre el océano y la atmósfera determinan las principales características oceanográficas y dinámicas del Pacífico Suroriental, variabilidad

oceanográfica que, afectada por el modo climático, incide en las poblaciones marinas (Yáñez *et al.* 2001, Hormazábal *et al.* 2004, Yáñez *et al.* 2008, Vásquez 2012, Parada *et al.* 2013). Asimismo, se reconoce que los ciclos de vida de los recursos pesqueros se encuentran a menudo acoplados al ciclo anual del ambiente biofísico (especialmente el latitudes intermedias con fuerte componente estacional), por lo que las escalas intra-estacional, estacional e interanual son las que más se han estudiado en el análisis de las relaciones ambiente-recurso (Yáñez *et al.*, 2001, Parada *et al.*, 2013). Perturbaciones forzadas tanto local como remotamente, en conjunto con la dinámica de estructuras de mesoescala y sub-mesoescala (Thomas *et al.*, 2001, Blanco *et al.*, 2001), pueden verificar cambios significativos en la producción biológica del océano costera y de regiones oceánicas (Correa-Ramírez *et al.*, 2007; Morales *et al.*, 2007) pudiendo afectar la distribución y abundancia de recursos pesqueros pelágicos y demersales.

Estos modos de variabilidad climática son reconocidos por sus impactos en el Pacífico suroriental; sin embargo, en la revisión sobre relaciones ambiente-recurso realizada por Parada *et al.* (2013) se señala la existencia de interrogantes sobre el impacto de estos procesos sobre los recursos marinos en esta región.

En este contexto, se realizó una búsqueda bibliográfica para determinar, en conjunto con la experiencia de los investigadores del proyecto, diferentes forzantes que determinan la variabilidad física en la región costera y oceánica del norte de Chile. La búsqueda bibliográfica incluyó artículos científicos publicados en revistas indexadas así como literatura. El resultado verificó a los siguientes factores forzantes y variables físicas que pueden modular la variabilidad de las fases tempranas de desarrollo de anchoveta en el norte de Chile, a saber:

- a) Viento y sus parámetros asociados (Esfuerzo del viento, Velocidad de Ekman).
- b) Temperatura superficial del mar.
- c) Clorofila-a.
- d) Velocidades geostróficas.
- e) Frentes térmicos (como proxy de frentes de surgencia).

f) Remolinos de mesoescala y parámetros asociados (Energía cinética asociada a remolinos, EKE).

Una síntesis de estos forzantes y variables críticas, así como su naturaleza y escalas de variabilidad se presentan en la Tabla VI.

Tabla VI. Principales forzantes o variables críticas que caracterizan la variabilidad física de la región costera y oceánica del norte de Chile, en las componentes estacional e interanual.

Variable	Naturaleza del dato	Escalas de interés	Referencias
Región costera del norte de Chile			
Esfuerzo del viento superficial	Satelital, estaciones costeras	Estacional, interanual	Pizarro et al. 1994, Soto-Mardones et al. 2004, Montecinos et al. 2007, Del Pino 2009, Letelier <i>et al.</i> 2009.
Velocidad de deriva de Ekman	(calculado)	Estacional interanual	Soto-Mardones et al. 2004, Del Pino 2009.
TSM	Satelital, datos de campo	Estacional, interanual	Pizarro <i>et al.</i> 1994, Hormazábal <i>et al.</i> 2001, Blanco <i>et al.</i> 2001, 2002. Soto-Mardones <i>et al.</i> 2004, Pizarro & Montecinos 2004.
Estructuras mesoescala	(calculado)	Estacional, interanual	Hormazábal <i>et al.</i> 2001, 2004, Chaigneau & Pizarro 2005a,b, Letelier 2010.
Corrientes geostróficas	Satelital	Estacional, interanual	Strub et al. 1995, Pizarro et al. 2001, 2002, Palma et al. 2006, Letelier et al. 2010, Fuenzalida 2008.
Clorofila	Satelital, datos de campo.	Estacional, interanual	Thomas et al. 2001

6.4.2. Análisis de climatologías

Se analizaron variables críticas y forzantes que incluyeron parámetros oceanográficos y atmosféricos, con el propósito de determinar posibles patrones estacionales en la distribución espacial de la temperatura superficial del mar, la clorofila, el esfuerzo del viento superficial, la velocidad de Ekman, la velocidad geostrófica y energía cinética asociada a remolinos (EKE) en la región costera y oceánica del norte de Chile, a través del análisis de la climatología (en escala mensual) de las variables precitadas.

6.4.2.1. Temperatura superficial del mar

La **Figura 46**, muestra el comportamiento climatológico de la temperatura superficial del mar (TSM) en la región norte de Chile. Resalta un claro patrón estacional, destacando la presencia de una lengua cálida proveniente de la zona ecuatorial en los meses de verano (enero-abril) atrapada a la costa del Perú, y que queda retenida en la zona de la curvatura Perú-Chile (16-20°S) revelando TSM máximas ($\sim 24^{\circ}\text{C}$) en esta zona. En tanto, en el borde oriental del Perú (cercano a la costa) se observan las mínimas de TSM ($< 20^{\circ}\text{C}$). Para el mismo período se observó la intrusión de aguas frías provenientes desde el sur, apegadas a la costa, con temperaturas inferiores a los 20°C .

La lengua cálida persiste (con distinta intensidad) durante todo el año, aunque en otoño disminuye hasta $\sim 19^{\circ}\text{C}$ y en invierno alcanza TSM mínimas centradas en los $\sim 17^{\circ}\text{C}$, específicamente en el mes de agosto. En la región sur (al sur de 24°S) destaca la curvatura hacia el NW de la isoterma de 17°C en invierno (julio) la que alcanza la forma de la lengua cálida en los meses de verano permitiendo la intrusión de agua fría hacia el NW.

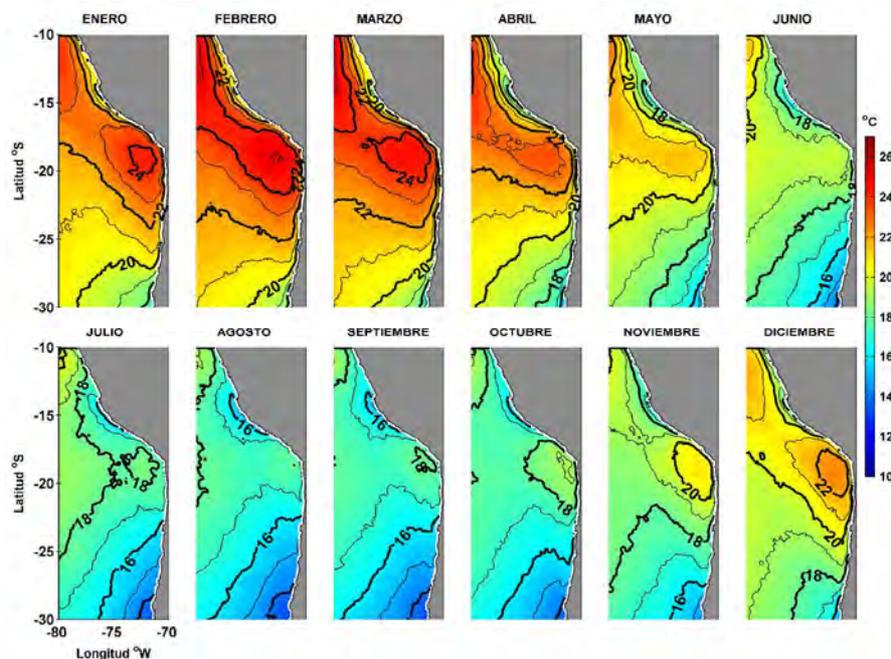


Figura 46. Climatología de la TSM (julio 2002 hasta diciembre 2016) para la región entre los 10°S - 30°S de latitud y los 70°W - 80°W de longitud.

6.4.2.2. *Clorofila superficial*

La **Figura 47** muestra la climatología de la clorofila en el área de estudio (graficada como \log_{10} para destacar las concentraciones más bajas). Se observa los máximos rangos de clorofila en el borde oriental del Perú para los meses de primavera y verano. Frente a Chile se observa una franja costera de concentraciones mayores de clorofila la que decae gradualmente hacia el sur, al parecer siguiendo la forma de la plataforma marina, y contrasta significativamente con las concentraciones de clorofila detectadas en la región inmediatamente oceánica (más allá de los 74-75 °W). Para los meses de otoño e invierno los rangos de clorofila decaen significativamente. Hacia los meses de verano (Diciembre-Abril) la extensión de clorofila hacia el océano interior (más allá de los 74°W) es muy baja, contrastando con los meses de invierno-primavera donde se observa mayor extensión fuera de la costa e concentraciones intermedias de clorofila.

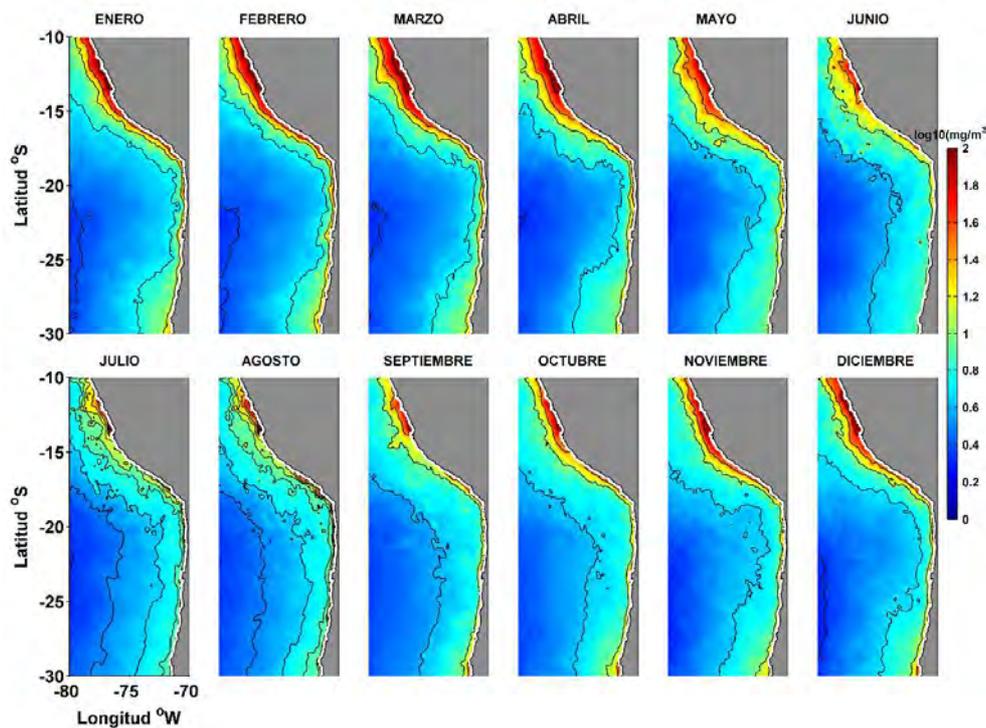


Figura 47. La climatología de la Clorofila superficial (julio 2002 hasta junio 2017) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud.

6.4.2.3. Esfuerzo del viento superficial

La **Figura 48** muestra la climatología de esfuerzo del viento superficial (EVS), donde destaca la dirección y sentido hacia el Norte, siguiendo la forma de la línea de costa. En el borde oriental del Perú las máximas intensidades ($>0,06 \text{ N/m}^2$) del EVS se alcanzan en los meses de otoño e invierno, en cambio hacia la región sur del área estudiada ($>25^\circ\text{S}$) se alcanza en primavera y verano. Resalta que en la zona de la curvatura de Chile-Perú el EVS disminuye drásticamente ($<0,03 \text{ N/m}^2$), situación que se verifica prácticamente todo el año, aunque en primavera y verano las magnitudes del EVS se expanden hacia la zona oceánica y el rango mínimo de EVS ($<0,02 \text{ N/m}^2$) se encuentra en los 18°S , y en los meses de invierno-primavera (junio-octubre) la baja ventilación se verifica más restringida a la zona costera ($<74^\circ\text{W}$).

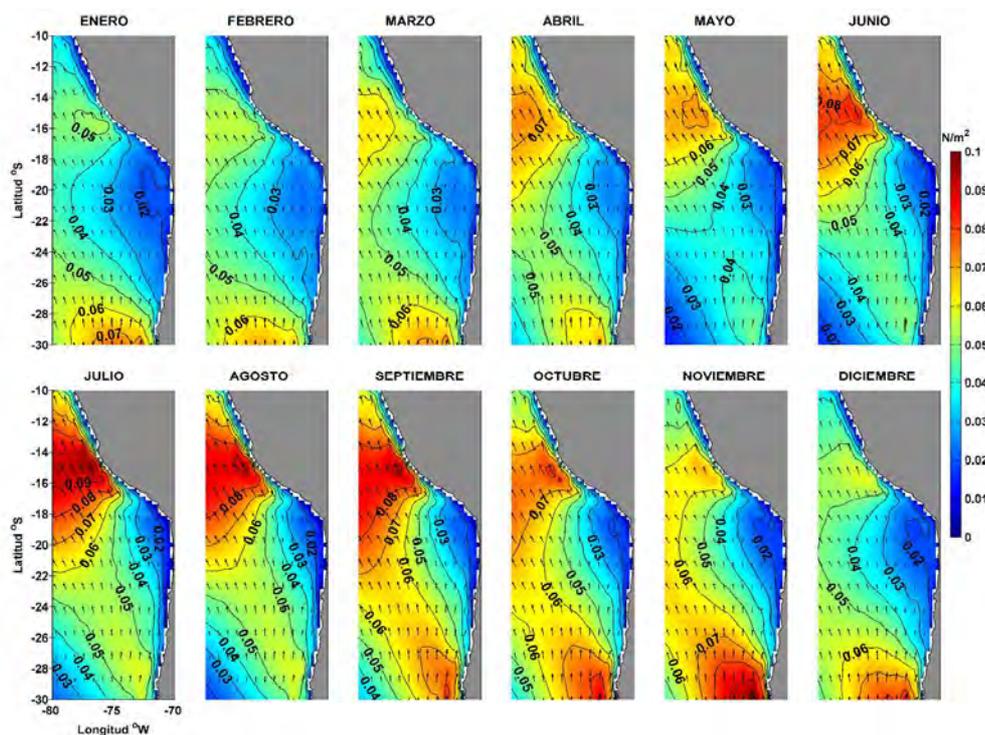


Figura 48. La climatología del Esfuerzo del Viento (julio 1987 hasta mayo 2016) para la región entre los 10°S - 30°S de latitud y los 70°W - 80°W de longitud.

6.4.2.4. Velocidad de la Deriva de Ekman Superficial

A partir del EVS se calculó la deriva de Ekman hasta los 100 m de profundidad. La **Figura 49** muestra la velocidad (cm s^{-1}) en superficie, estrato en el cual resulta interesante analizar el aporte dinámico que entrega el EVS sobre la superficie del mar en la zona de estudio. En la región centro-sur del Perú se observa una circulación superficial hacia el Oeste, prácticamente perpendicular a la costa, con velocidades en otoño e invierno superiores a $0,08 \text{ cm s}^{-1}$. Al sur de los 25°S la circulación es NW con magnitudes comparativamente mayores ($>0,04 \text{ cm s}^{-1}$) en primavera-verano. Nuevamente destaca que en la curvatura Chile-Perú se encuentran las mínimas magnitudes ($<0,03 \text{ cm s}^{-1}$) de la velocidad superficial de Ekman con una dirección preferencial hacia el NW.

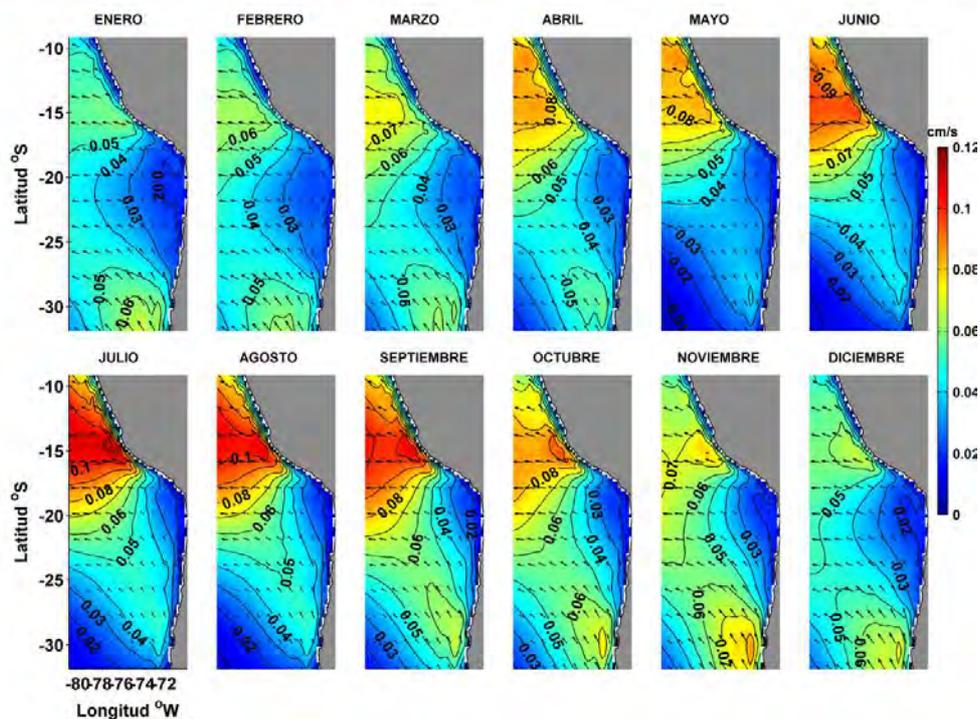


Figura 49. La climatología de la deriva de Ekman (cm s^{-1}) (julio 1987 hasta mayo 2016) para la región entre los 10°S - 30°S de latitud y los 70°W - 80°W de longitud.

6.4.2.5. Distribución vertical de la velocidad de la Deriva de Ekman

Los resultados asociados a la **Figura 49** si bien fueron muy informativos en términos espaciales horizontales, fueron limitados dado que no muestra cómo se comporta la corriente de Ekman en profundidad. Para poder discernir lo anterior se realizó un corte longitudinal a los 18 °S, donde se ubica la curvatura Chile-Perú, determinándose una climatología para los componentes zonal y meridional de la deriva de Ekman en la dimensión vertical, las que se presentan en la **Figura 50**.

La **Figura 50** muestra la distribución vertical de la deriva zonal de Ekman (valores negativos hacia mar afuera y valores positivos hacia la costa), revelando por una parte la ausencia de diferencias estacionales significativas, y por otra un conspicuo flujo de Ekman zonal hacia el oeste que se verifica con mayor intensidad desde los 74-75°W hacia mar afuera y entre la superficie y los 30-40 metros de profundidad, con velocidades superficiales superiores a los 0,04 cm s⁻¹. Por el contrario, la región más costera (<73°W) evidenció una dinámica costa-afuera mucho menor (<0,02 cm s⁻¹) especialmente en los meses de invierno y primavera, resaltado que esta región se comporta como una zona de muy baja dinámica.

Por su parte, la climatología de la componente meridional de la deriva de Ekman en la vertical, revela un patrón de distribución similar a lo largo de todo el año, con la presencia de un flujo costero (<73°W) y somero (0-20 m de profundidad) hacia el norte (valores positivos) con velocidades mayores a 0,01 cm s⁻¹, y por el contrario un flujo subsuperficial (20-40 m) más oceánico hacia el sur (valores negativos) con velocidades superiores a 0,015 cm s⁻¹ que se intensifican más allá de los 76°W.

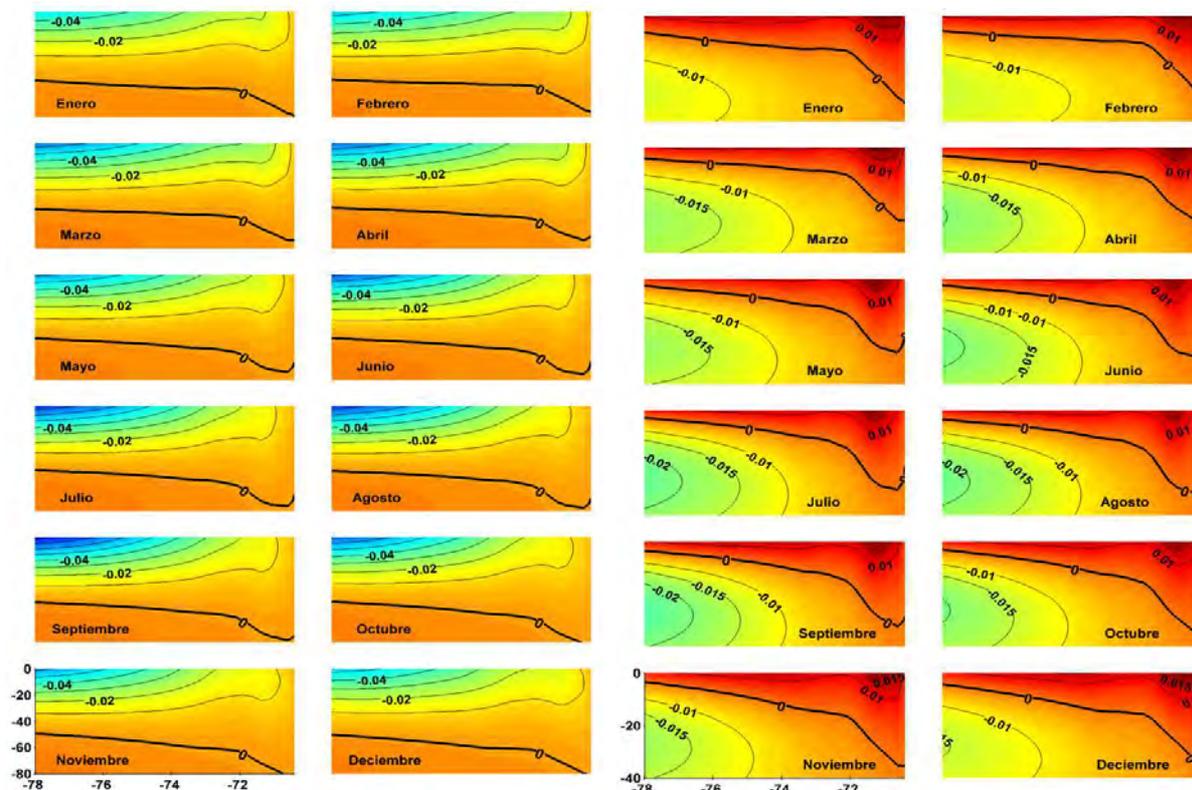


Figura 50. Climatología satelital CCMP (serie 1987-2016) de la deriva de Ekman zonal en la sección vertical transversal a la costa situada en los 18,6°S. Paneles de la izquierda corresponde a la componente zonal. Paneles de la derecha corresponde a la componente meridional. Valores positivos hacia el Este y hacia el Norte, respectivamente.

6.4.2.6. Velocidad geostrófica

En general, la climatología de la velocidad geostrófica (**Figura 51**) no muestra un patrón de circulación definido, como es el caso de la climatología de Ekman, revelando durante todo el año una circulación compuesta por giros y meandros, sin la presencia de diferencias estacionales significativas. Lo anterior permite suponer la presencia de un ambiente más retentivo que advectivo zonal o meridionalmente hacia los bordes del área costera (<78°W) estudiada. Cabe destacar que en la región costera (<73°W) de la zona norte de Chile (18-22°S) esta climatología verifica magnitudes similares a las velocidades de Ekman (ver **Figura 49**). Al sur de los 25°S tampoco se observa un patrón claro de circulación ratificando presencia de una circulación compuesta por giros y meandros.

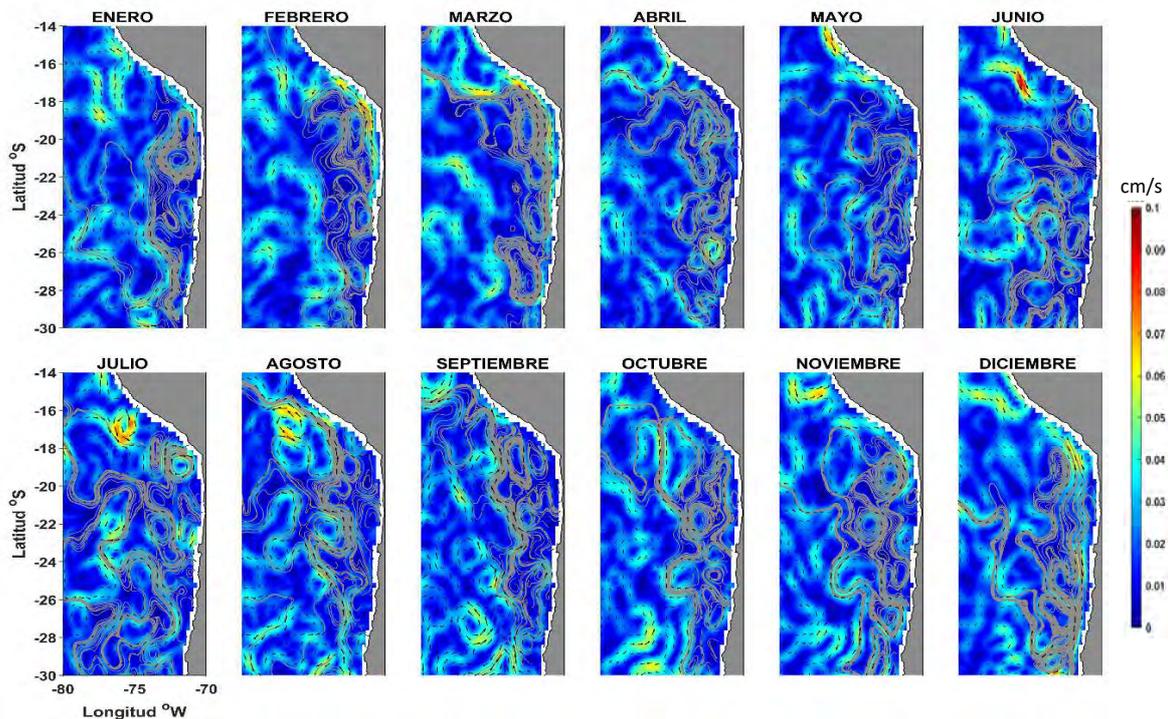


Figura 51. La climatología de la velocidad geostrófica (cm s^{-1}) (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S - 30°S de latitud y los 70°W - 80°W de longitud.

6.4.2.7. Energía cinética asociada a remolinos (EKE)

La **Figura 52** muestra la climatología de la energía cinética especialmente relacionadas con meandros y remolinos de mesoescala (Hormazábal *et al.* 2004) para la región costera del norte de Chile y centro-sur del Perú. Se muestra el promedio mensual de la energía turbulenta (EKE= Eddy Kynetic Energy) que da cuenta de la energía disponible para la formación de remolinos de mesoescala (Stevens *et al.* 1992, Hormazábal *et al.* 2004). Los resultados muestran diferencias espaciales relevantes en el área estudiada, verificando una franja con altos valores de EKE ($>80 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$) asociado a la región costera del centro-sur del Perú que se observa prácticamente durante todo el año, lo que contrasta significativamente con los bajos valores de EKE en la región de la curvatura Perú-Chile (16°S - 22°S) que registró valores menores a $20\text{-}30 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$ durante prácticamente todo el ciclo anual.

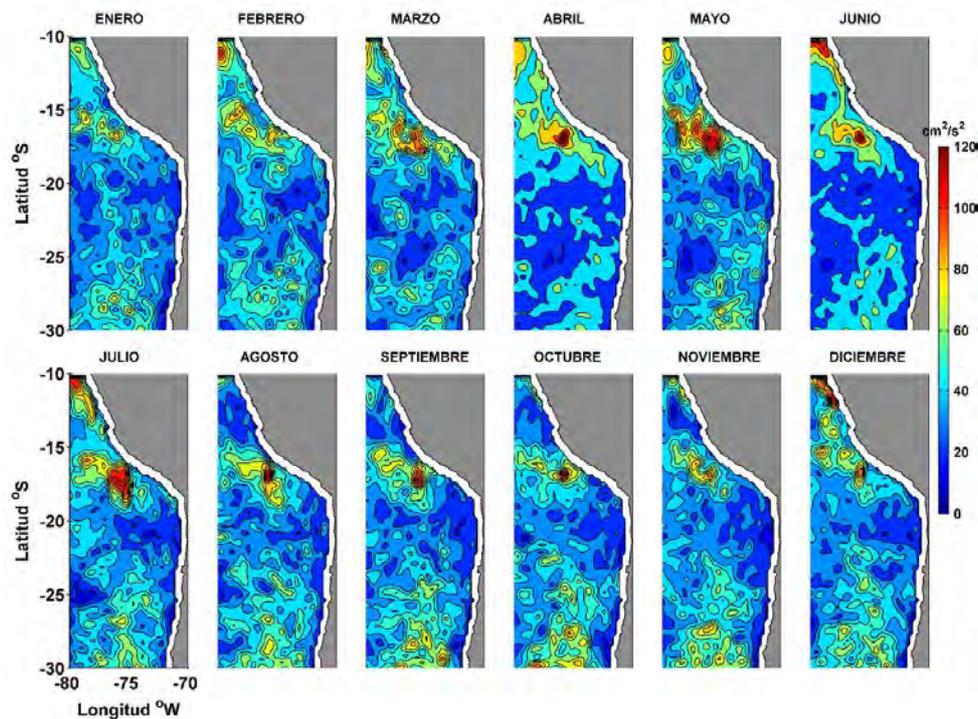


Figura 52. La climatología de la EKE en $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S - 30°S de latitud y los 70°W - 80°W de longitud.

6.4.2.8. Frentes térmicos

Los gradientes térmicos muestran la presencia de frentes en la zona sur de Perú y norte de Chile (**Figura 53**). Los resultados se presentan como una banda costera asociada a procesos de surgencia. La climatología muestra diferencias estacionales, es decir, frentes térmicos más definidos e intensos ($>7,5 \text{ }^\circ\text{C Km}^{-1} \times 10^{-2}$) en primavera-verano, en tanto que durante el invierno (junio a septiembre, período principal de desove de anchoveta) estos gradientes se debilitan ($<5 \text{ }^\circ\text{C Km}^{-1} \times 10^{-2}$), no obstante presenta un máximo en la zona frente a la desembocadura del río Loa. Estas estructuras desaparecen al norte de Arica entre agosto y septiembre para volver a aparecer en el inicio del verano (noviembre). A partir de marzo los mayores valores desaparecen y los frentes comienzan a debilitarse en toda la zona junto con la disminución de la radiación solar y el desplazamiento al norte del Anticiclón del Pacífico Sur.

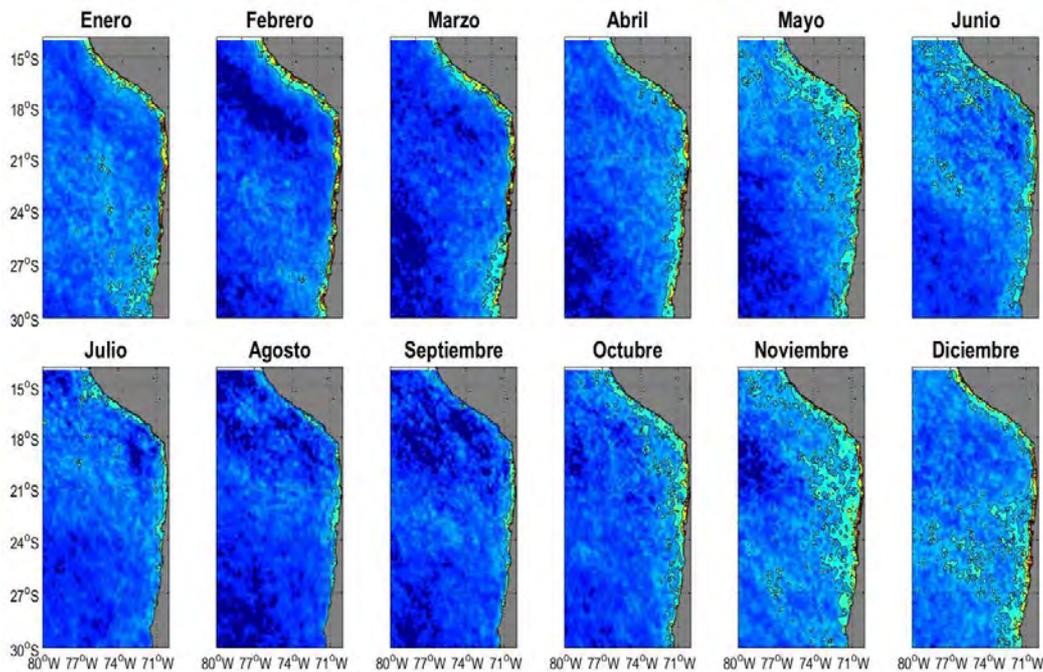


Figura 53. Climatología de frentes de surgencia derivados de gradientes térmicos superficiales determinados a partir de imágenes de TSM MODIS. Los contornos muestran los valores asociados a los colores indicando que los rojos son las zonas de mayor presencia de frentes durante los meses del año. En el periodo de desove (junio-diciembre) con máximo en agosto los frentes son débiles, aunque mayores en la costa de Chile y especialmente asociados a la zona de desove de del Loa. Los valores que se observan están entre 0 y 10 °C/Km escalados $\times 10^{-2}$.

6.4.2.9. Remolinos

La distribución espacial del índice Okubo-Weiss (W) (**Figura 54**) muestra la persistencia de remolinos de mesoescala, vinculados con procesos estacionales. Los remolinos se encuentran presentes durante todo el año (Valor crítico $W_0 = -2.2 \times 10^{-12}$), no obstante entre junio y noviembre se observa una mayor presencia de estas estructuras en la zona oceánica ($>73^\circ\text{W}$). Por su parte, entre diciembre y marzo se verifica una mayor presencia de remolinos en la banda costera.

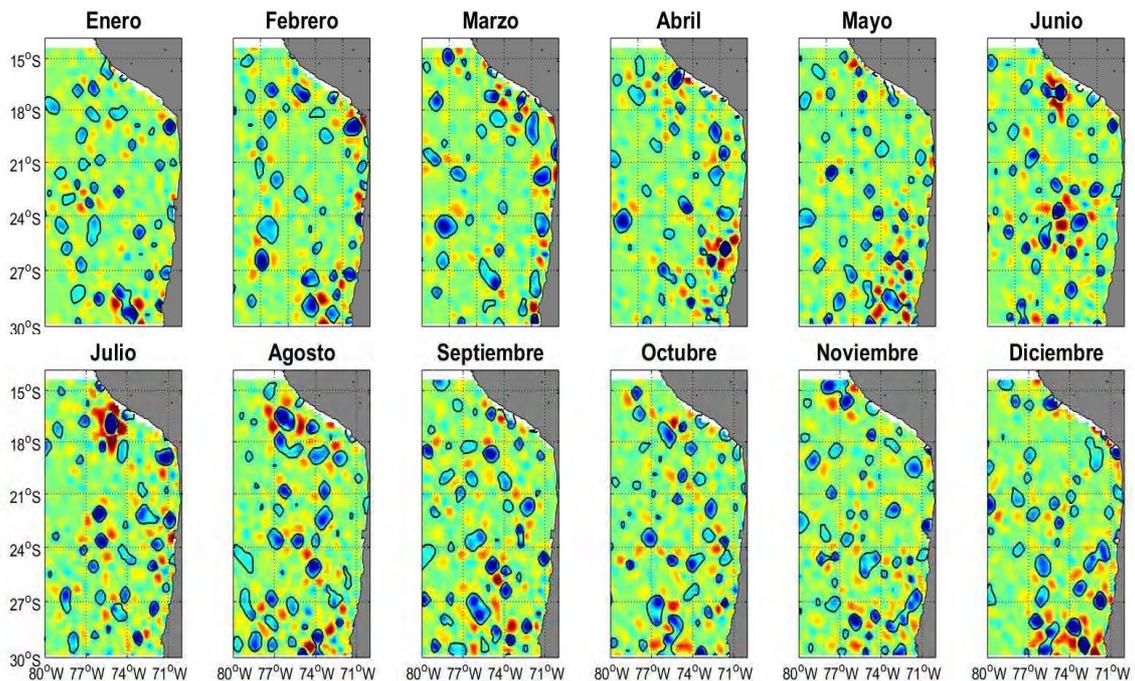


Figura 54. Climatología de Remolinos detectados mediante el índice de Okubo-Weiss(W). Los colores azules envuelto en contorno negro indican la presencia típica de remolinos en diferentes zonas. Los cálculos se realizaron en base a imágenes diarias por lo que son estructuras que prevalecen en el tiempo. Los contornos representan valores menores al 20% de la desviación estándar del campo analizado ($W_o = -0.2 * \text{std}(W)$) que definen remolinos de mesoescala persistentes.

No obstante los productos satelitales de altimetría han tenido importantes avances en resolver la topografía del océano, aún existen dificultades para capturar estructuras de meso y sub-mesoescala en el sector costero. Sin embargo, el ROMS implementado tiene la ventaja de permitir el análisis de dichas estructuras en el dominio costero a través del modelo hijo que aumenta la resolución espacial. Sin embargo, al ser ROMS un modelo sin asimilación de datos, las estructuras de meso y sub-mesoescala reproducidas son una representación promedio del océano real, las cuales no necesariamente ocurren en el mismo tiempo y espacio que el reproducido en el modelo (Echevin *et al.*, 2008).

Por lo anterior, para analizar la ocurrencia y persistencia de estructuras de meso y sub-mesoescala asociados al proceso de desove se obtuvo el patrón promedio de la altimetría y las corrientes superficiales para el periodo comprendido entre el inicio y el término de cada

crucero de evaluación del desove (un mes de duración aproximadamente). Sobre este patrón se identificó la ocurrencia de remolinos de meso y sub-mesoescala y se cuantificó el desove asociado a estas estructuras. La **Figura 55** muestra los remolinos ciclónicos y anticiclónicos asociados a cada año de evaluación de desove en el período 1997-2016 y las estaciones con detección de huevos de anchoveta. En general, el modelo describe la presencia de remolinos de meso y sub-mesoescala en el área de desove de anchoveta, los cuales conforman estructuras coherentes y persistentes.

El tamaño de los remolinos reproducidos por el ROMS se muestran en la **Figura 56**. Los remolinos anticiclónicos muestran mayor variabilidad interanual en su tamaño, variando desde estructuras coherentes de menos de 50 km de radio superior hasta 150 km, reafirmando la condición de estructuras de meso y submesoescala (**Figura 56**, panel superior). Los remolinos ciclónicos evidenciaron menor variabilidad en sus tamaños oscilando entorno a los 60 km de radio mayor en sus estructuras (**Figura 56**, panel superior). El número de remolinos presentes en el área de desove de anchoveta varió entre 5 (2005) y 12 (1999), siendo la proporción entre remolinos ciclónicos y anticiclónicos cercana a 1:1 a lo largo de todo el período de estudio (**Figura 57**).

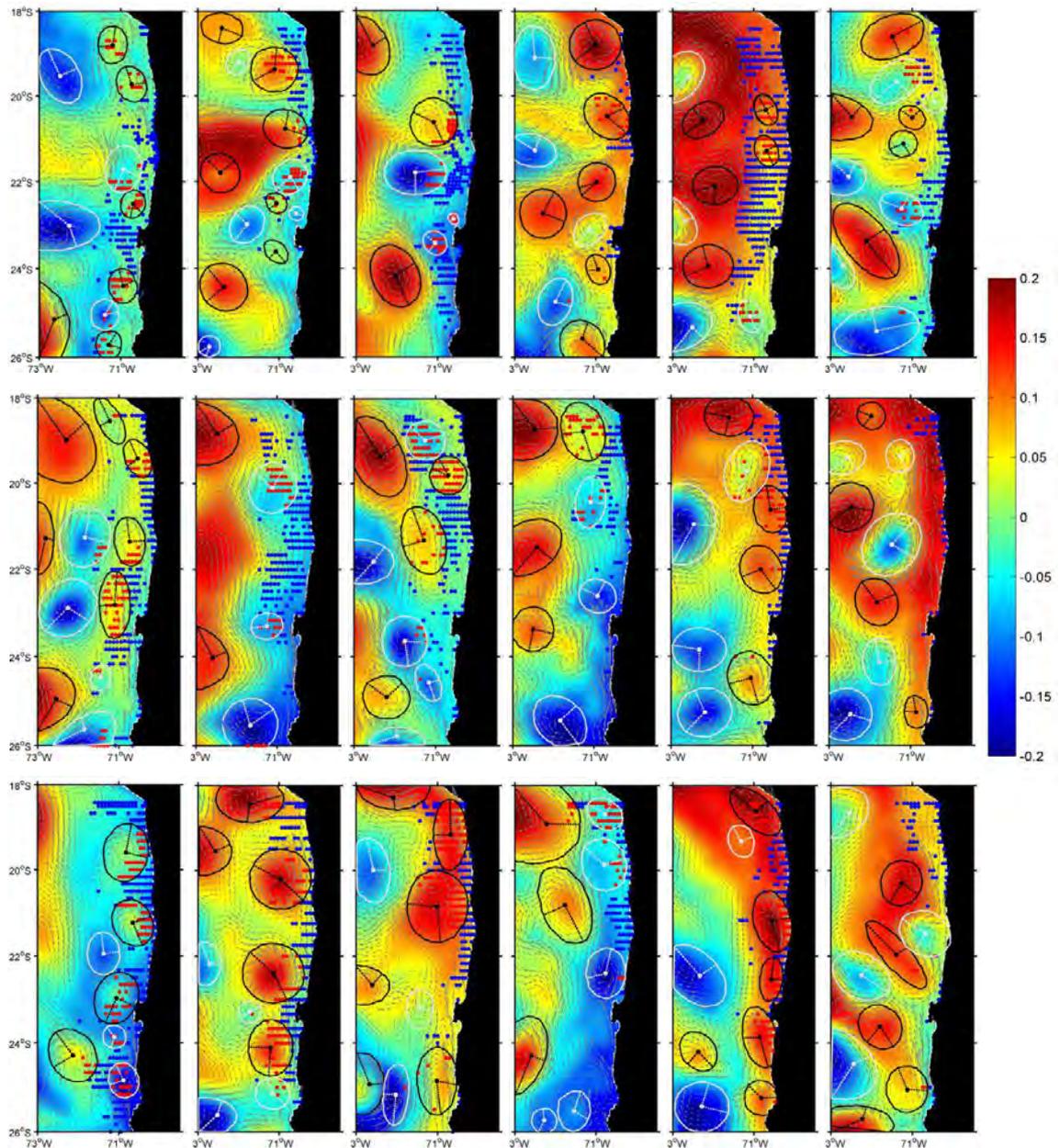


Figura 55. Remolinos de mesoescala y sub-mesoescala modelados por ROMS. El campo de colores indica la altimetría obtenida para el período de cada crucero de evaluación del desove de anchoveta. Los perímetros de los remolinos anticiclónicos se muestran en negro y los ciclónicos en gris. En puntos se muestran las estaciones positivas para huevos de anchoveta: puntos rojos estaciones positivas al interior de remolinos. Se muestran los radios estimados para evaluar el tamaño de cada remolino detectado.

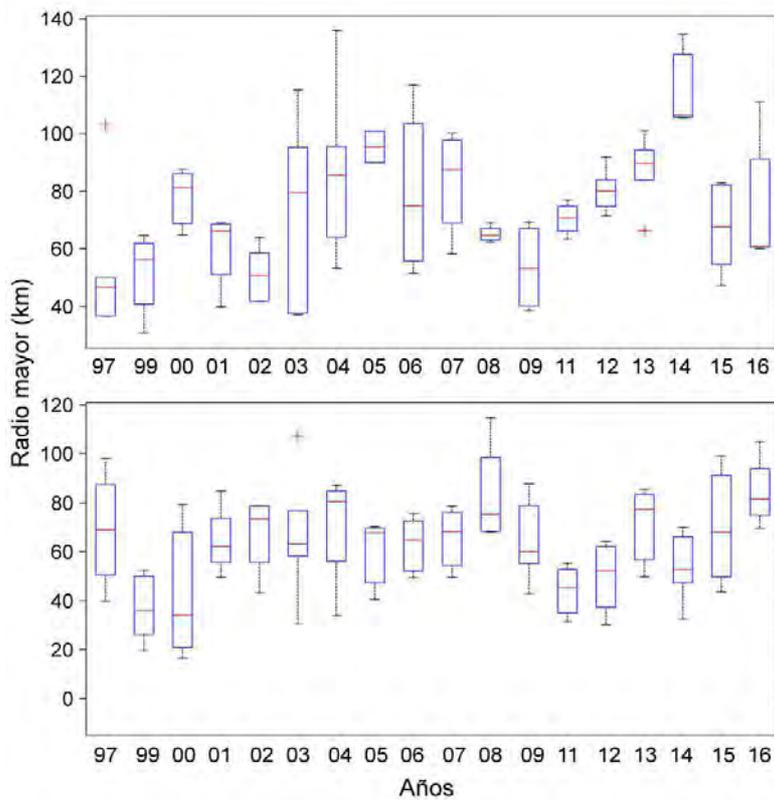


Figura 56. Tamaño de remolinos detectados en el área de desove de anchoveta durante el periodo de ejecución de cada crucero de evaluación separados pro polaridad del giro: remolinos anticiclónicos (panel superior) y remolinos ciclónicos (panel inferior).

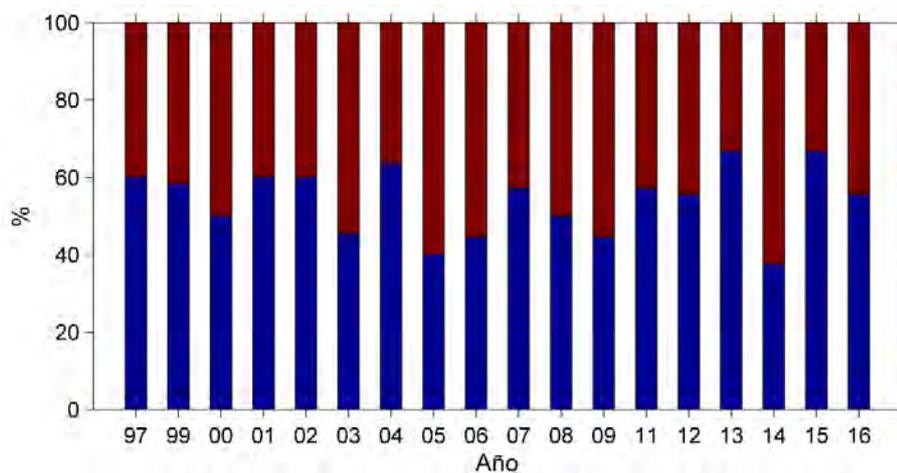


Figura 57. Proporción entre remolinos anticiclónicos (rojo) y ciclónicos (azul) detectados en el área de desove de anchoveta durante el periodo de ejecución de cada crucero de evaluación para el periodo 1997-2016.

Una vez detectados los remolinos de mesoescala se cuantificó la relación entre el proceso de desove y la ocurrencia espacial de los remolinos. Este análisis mostró niveles variables entre años de la ocurrencia de estaciones positivas de huevos de anchoveta al interior de remolinos de meso y submesoescala con un rango entre 0 y 53% , mientras que al analizar la abundancia del desove (densidad de huevos) esta osciló entre 0 y 59% evidenciando que el acoplamiento biofísico entre remolinos y desove es un rasgo altamente variable.

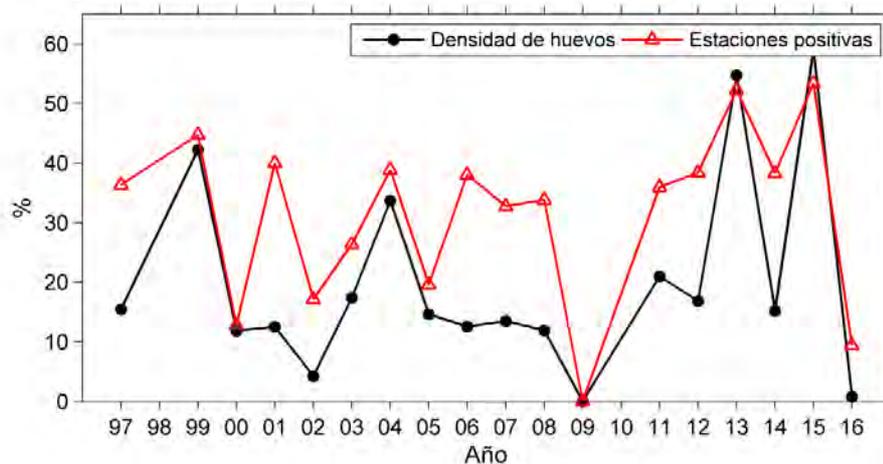


Figura 58. Análisis cuantitativo del desove de anchoveta asociado a remolinos de meso y submesoescala considerando el número de estaciones positivas (rojo) y la densidad de huevos de anchoveta (negro) para el periodo 1997-2016.

Los años que manifestaron una mayor asociación entre el proceso de desove y la ocurrencia espacial de huevos de anchoveta fueron 1999 (42,2%), 2004 (33,7%), 2013 (54,7%) y 2015 (59%), mientras que aquellos que mostraron menor asociación fueron el 2002 (4,2%), 2009 (0%) y 2016 (8%). Por otra parte, la **Figura 59** muestra que al analizar la ocurrencia de desove al interior de remolinos según su polaridad se demuestra que, en general, el proceso de desove está mayormente asociado a remolinos anticiclónicos, los cuales tienden a generar acumulación de materia en los bordes del giro y promover surgencia y enriquecimiento local (Bakun, 2006)

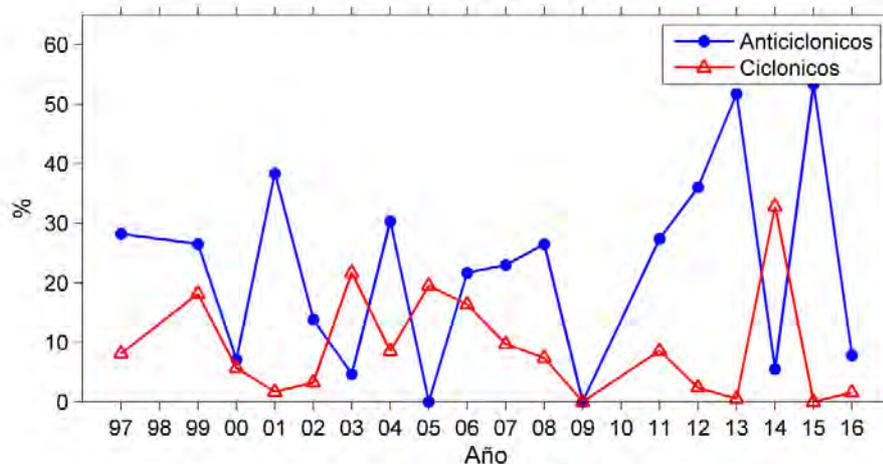


Figura 59. Análisis cuantitativo del desove de anchoveta asociado a remolinos de meso y submesoescala considerando el número de estaciones positivas y el tipo de polaridad del giro para el periodo 1997-2016: remolinos anticiclónicos (rojo) y ciclónicos (azul).

Se identifican a los remolinos como estructuras persistentes en el área de desove y crianza de anchoveta en el norte de Chile. Los mecanismos de asociación entre estas estructuras de meso y sub-mesoescala y la historia de vida temprana de la anchoveta constituye un desafío importante hacia la investigación biofísica de organismos pelágicos como la anchoveta, donde los resultados de este proyecto pueden ser un insumo inicial relevante.

6.4.3. Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs)

Se utilizaron Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs) con el objetivo de extraer la estructura espacial y la variabilidad temporal de las variables críticas ensayadas en este estudio. Se usó FEOs para las variables: temperatura superficial del mar, clorofila, energía cinética asociada a remolinos, frentes térmicos, como un *proxy* de frentes de surgencia, y deriva de Ekman zonal-meridional. Por su parte, se utilizó las FEOs complejas para forzantes vectoriales, esto es: esfuerzo del viento superficial, velocidad de la deriva de Ekman y velocidad geostrofica.

6.4.3.1. Temperatura superficial del mar

La **Figura 60** muestra la síntesis de 174 meses mediante las FEOs, a través de los tres primeros modos de variabilidad espacial y temporal. El primer modo rescata el 80% de la varianza total (**Figura 60a**), mostrando muchas similitudes con la climatología de la TSM

(ver **Figura 46**), es decir, la presencia de una lengua de mayores amplitudes proveniente desde el norte y que se atrapa en la zona de la curvatura Chile-Perú, además de bajas amplitudes en el borde oriental de la región sur del Perú y norte de Chile. Asimismo, para la región al sur de los 25°S se rescata la curvatura de las amplitudes hacia el NW y la intrusión desde la región sur apegada a la costa. La serie temporal del primer modo (**Figura 60d**, contorno rojo) muestra claramente un comportamiento estacional y sin oscilación hacia amplitudes negativas.

El segundo modo espacial que explica el 7% de la varianza (**Figura 60b**) y muestra un núcleo de altas amplitudes indicando claramente el dominio que perturba la zona de la curvatura. Este núcleo alcanza su máximo en verano (**Figura 60d**, contorno azul) y oscila a amplitudes negativas en invierno. Finalmente, el modo 3 resulta interesante debido que muestra las altas amplitudes de TSM atrapadas a la costa y decae hacia la zona oceánica rescatando el 4% de la varianza total (**Figura 60c**). La variabilidad en el tiempo es claramente estacional aunque oscilante (**Figura 60d**, contorno negro).

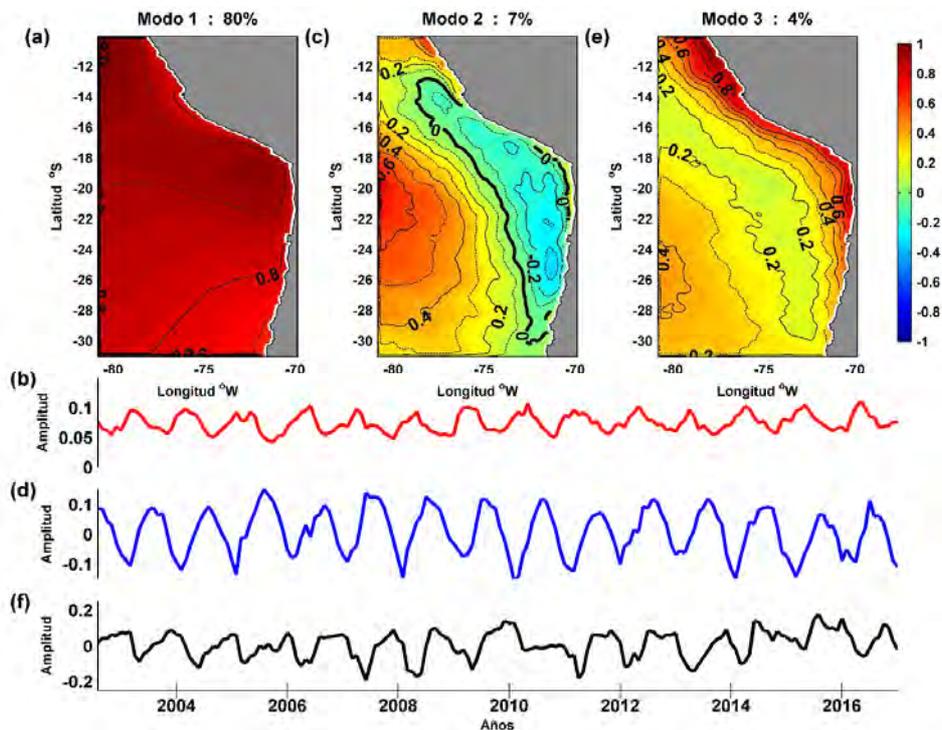


Figura 60. Funciones Empíricas Ortogonales de la TSM (julio 2002 hasta diciembre 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud. Estructuras espaciales: (a) Modo 1, (b) modo 2, (c) modo 3. Estructuras temporales (d) Modo 1, (e) modo 2, (f) modo 3.

6.4.3.2. Clorofila superficial del mar

La **Figura 61** muestra los tres primeros modos de la clorofila que explican el 65% de la varianza total. La estructura espacial del primer modo (**Figura 61a**) exhibe un patrón similar al observado en la climatología (ver **Figura 47**), es decir, las máximas amplitudes de concentración de clorofila se encuentran en la región norte del área estudiada y decaen gradualmente hacia el sur, verificando un comportamiento claramente estacional (**Figura 61d**, contorno rojo). Las estructuras espaciales de los dos modos restantes (**Figura 61b,c**) muestran que las mayores concentraciones de clorofila están ubicadas en región norte del Perú siguiendo un patrón claramente estacional (**Figura 61d**, contornos azules y negro, respectivamente). Resalta que en la zona de la curvatura Chile-Perú se observan concentraciones comparativamente menores.

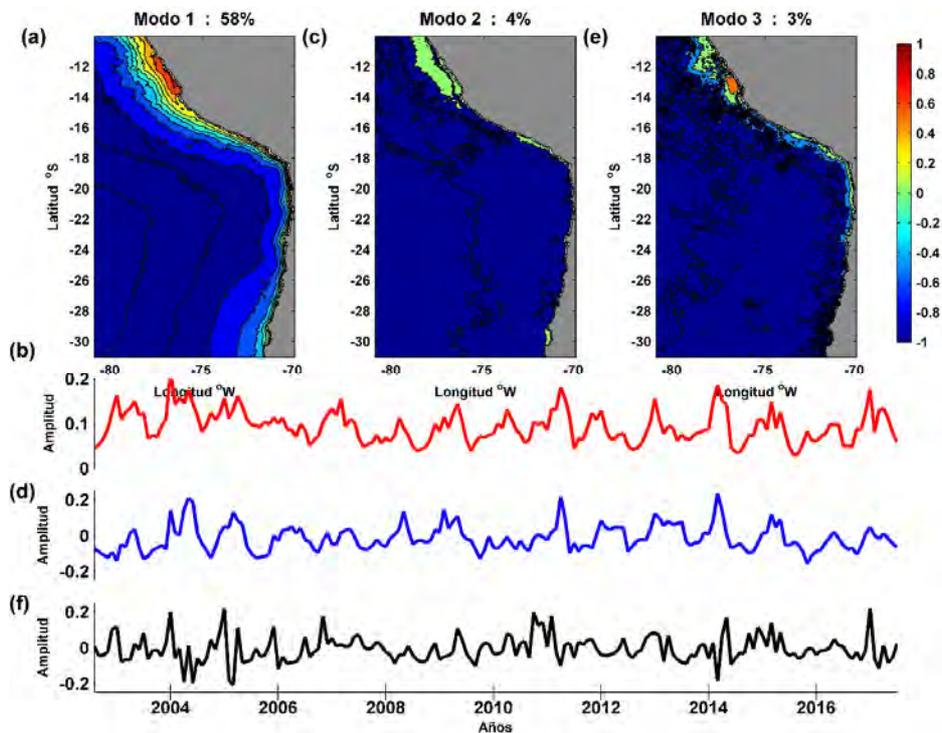


Figura 61. Funciones Empíricas Ortogonales de la Clorofila (julio 2002 hasta junio 2017) para la región entre los 10°S - 30°S de latitud y los 70°W - 80°W de longitud. Estructuras espaciales: (a) Modo 1, (b) modo 2, (c) modo 3. Estructuras temporales (d) Modo 1, (e) modo 2, (f) modo 3.

6.4.3.3. Esfuerzo del viento superficial

El EVS es mostrado a través de los dos primeros modos que rescatan el 98% de la varianza total (**Figura 62**). La estructura espacial del primer modo (93,7%) representa claramente la estructura espacial general exhibida por la climatología, es decir, la presencia de máximas amplitudes frente al Perú, y por el contrario mínimas amplitudes en la región costera del norte de Chile, aunque un patrón estacional no es claro (**Figura 62c**). Además, en la región sur se observa una divergencia meridional del EVS (vectores) entre los 24 y 26°S , lo que es consistente con lo reseñado en la literatura (Pizarro *et al.* 2002). La **Figura 62b** muestra la fase del primer modo, es decir, la propagación de la señal desde la zona oceánica hacia la región costera.

El segundo modo (**Figura 62d**) representa el 4,4% de la variabilidad total, con una estructura espacial que resalta la componente meridional hacia el norte en toda el área de

estudio (sin divergencia), destacando las máximas amplitudes hacia el Perú (<20°S). La fase muestra una propagación del EVS hacia la zona oceánica al sur de los 22°S (valores negativos), en tanto que hacia la región norte predomina una propagación de la señal hacia el NW. Destaca la zona costera de la curvatura Chile-Perú donde se observa una propagación hacia la región costera.

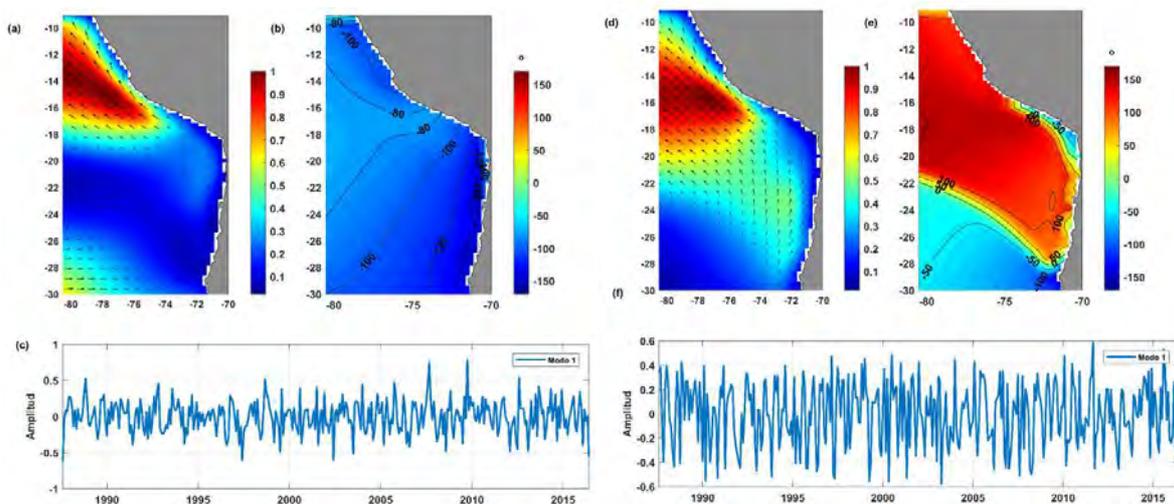


Figura 62. Funciones Empíricas Ortogonales complejas del esfuerzo del viento superficial (CCMP 1987-2016) para la región entre los 10°S-30°S y costa-80°W. Estructuras espaciales y temporales de los dos primeros modos.

6.4.3.4. Velocidad de la Deriva de Ekman Superficial

La **Figura 63** muestra la composición de las dos componentes de la velocidad de Ekman (zonal y meridional) a través de las Funciones Empíricas Ortogonales Complejas. El primer modo rescata el 95% de la varianza total, y su estructura espacial muestra una circulación hacia el NW que se intensifica hacia el norte, con máximas amplitudes frente al Perú. Por el contrario, en el norte de Chile se verifica amplitudes menores (<0,4) lo que implica una región costera de menor variabilidad, rescatando lo reseñado en la climatología. La fase muestra una propagación de la señal hacia el océano interior en gran parte de la región estudiada. La estructura temporal del primer modo que modula la estructura espacial, aunque es ruidosa muestra cierta tendencia a la estacionalidad (**Figura 63c**).

Por su parte, el segundo modo (**Figura 63**) muestra una estructura espacial que revela similar patrón de distribución que el modo 1, pero con mayores amplitudes ($>0,6$) frente a la región norte de Chile, y una estructura temporal oscilante sin un patrón claro de distribución. La fase en este segundo modo revela una franja costera donde la propagación de la señal es hacia la costa, al sur de los 20°S . Al norte de esta latitud se verifica una propagación hacia el océano interior (valores negativos).

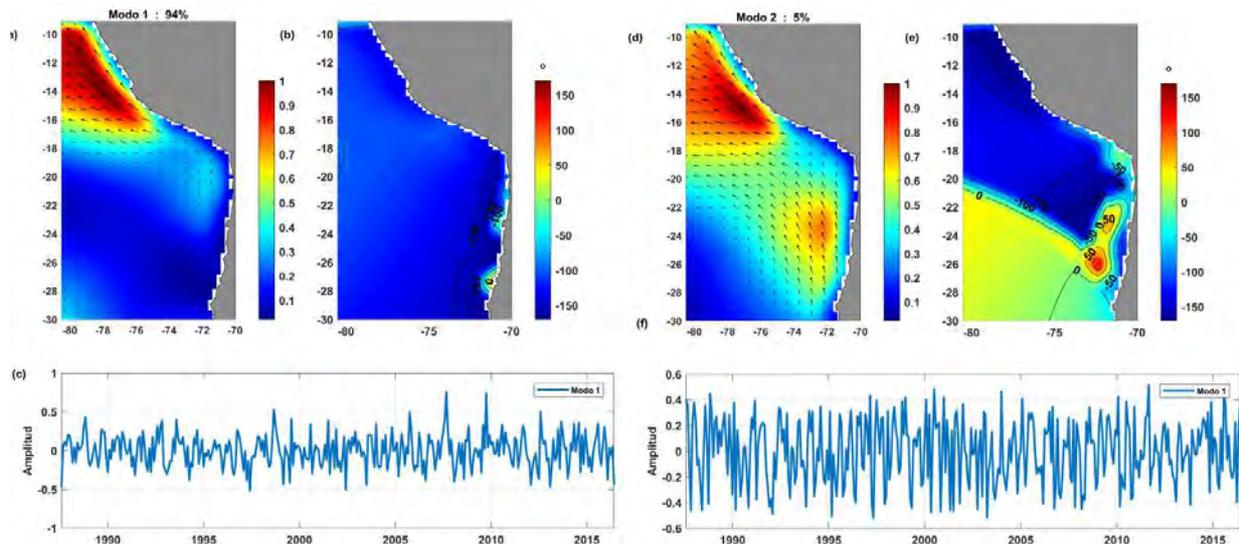


Figura 63. Funciones Empíricas Ortogonales de la velocidad superficial de Ekman (CCMP 1987-2016) para la región entre los 10°S - 30°S y costa- 80°W . Estructuras espaciales y temporales de los dos primeros modos.

Por su parte, la síntesis de los datos de la velocidad de Ekman (1987-2016) mediante las FEOs para un corte vertical perpendicular a la costa situado en los 18°S , se presenta en las **Figura 64** y **Figura 65** para la componente zonal y meridional de la velocidad de Ekman, respectivamente. La estructura espacial del primer modo (**Figura 64**) da cuenta de un alto porcentaje de varianza explicada (96%) y rescata de buena manera el comportamiento zonal de la velocidad de Ekman reseñado en la climatología, verificando claramente el flujo de Ekman hacia el oeste con mayores amplitudes ($>0,04$) en el estrato somero entre 20-30 metros de profundidad y desde los 74°W hacia mar afuera. Por el contrario, se destaca una menor dinámica hacia el océano interior en la región más costera ($<73^{\circ}\text{W}$) con amplitudes

menores a 0,2. La estructura temporal para ambos modos no exhibe un comportamiento estacional claro.

Por su parte, el primer modo (95%) de la estructura espacial de la componente meridional (**Figura 65**) rescata también el patrón vertical principal de los flujos de Ekman, con la presencia de un flujo costero ($<73^{\circ}\text{W}$) y somero ($<20\text{ m}$) hacia el norte (valores positivos) con amplitudes mayores a $0,1\text{ cm s}^{-1}$, que se intensifica hacia las cercanías de la costa ($<72^{\circ}\text{W}$); resaltando asimismo un flujo oceánico ($>76^{\circ}\text{W}$), sub-superficial (20-40 m) de dirección opuesta (hacia el sur), con amplitudes superiores a 0,2 que se intensifican más allá de los 76°W . Al igual que lo reseñado para la estructura temporal del primer modo, acá tampoco se evidencia un comportamiento estacional claro.

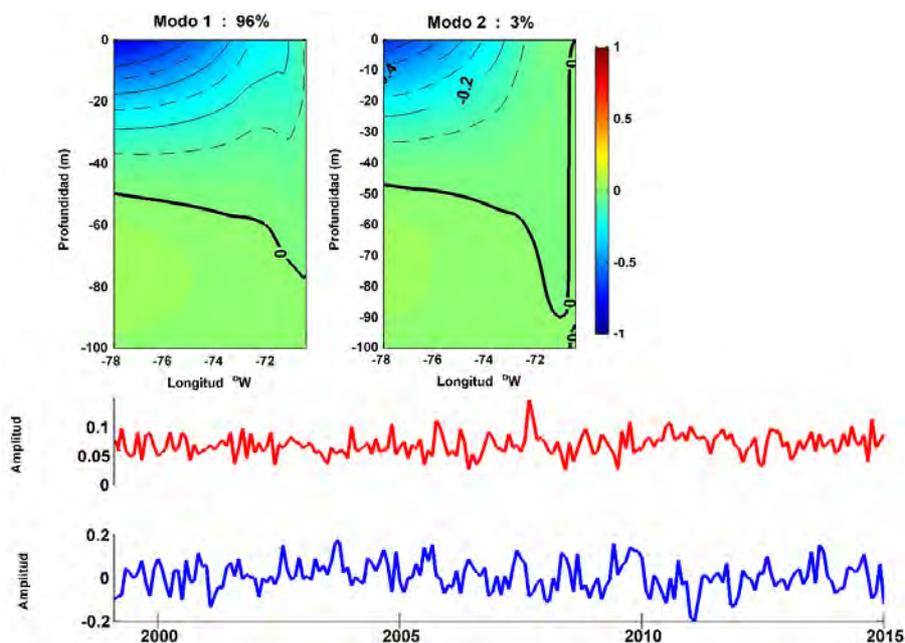


Figura 64. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas de la deriva de Ekman zonal de la serie CCMP 1987-2016. Las estructuras espaciales de (a) Primer y (b) Segundo modo. Las estructuras temporales de (c) Primer y (d) Segundo modo.

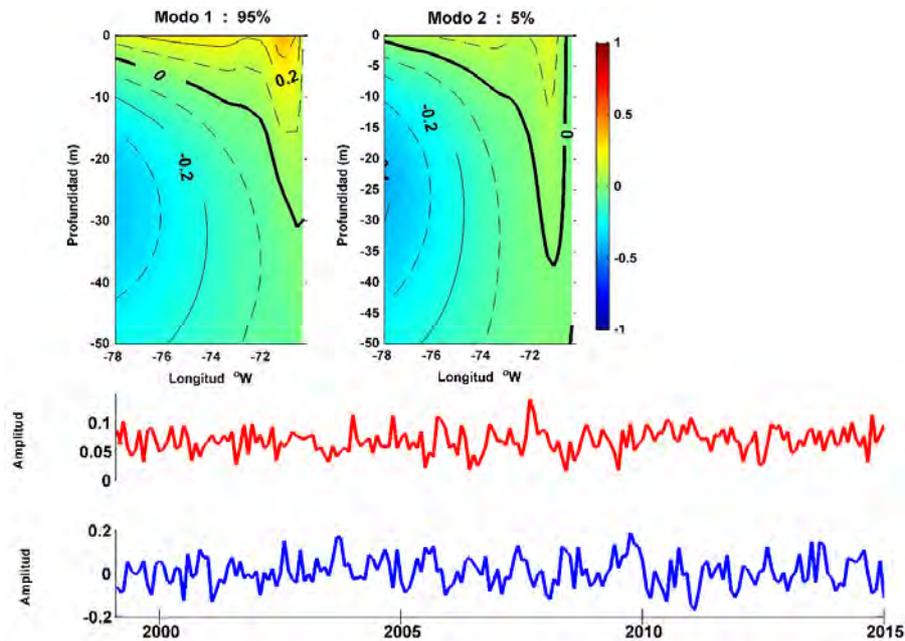


Figura 65. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas de la deriva de Ekman meridional de la serie CCMP 1987-2016. Las estructuras espaciales de (a) Primer y (b) Segundo modo. Las estructuras temporales de (c) Primer y (d) Segundo modo.

6.4.3.5. Velocidad geostrófica

Los resultados del análisis de las FEOs para la velocidad geostrófica reveló que los dos primeros modos rescataron el 50% de la varianza total (**Figura 66**), porcentaje bajo en comparación a los otros parámetros físicos, pero consistente con los resultados de la climatología que no había evidenciado un patrón claro de circulación. Este resultado es corroborado por la variabilidad temporal que no muestran un comportamiento estacional y solamente se observa un incremento de las amplitudes para el periodo 1997-1998, afectado posiblemente por señales remotas provenientes desde la zona ecuatorial (El Niño 1997-1998). La estructura espacial del primer modo revela una circulación compuesta por giros y meandros rescatando de buena forma lo reseñado para la climatología. El segundo modo de oscilación (22% de la varianza total) también presenta una estructura espacial similar con la presencia de meandros y giros en gran parte de la región estudiada. Esta variabilidad espacial de ambos modos es bien representada por las fases que no muestran propagaciones definidas.

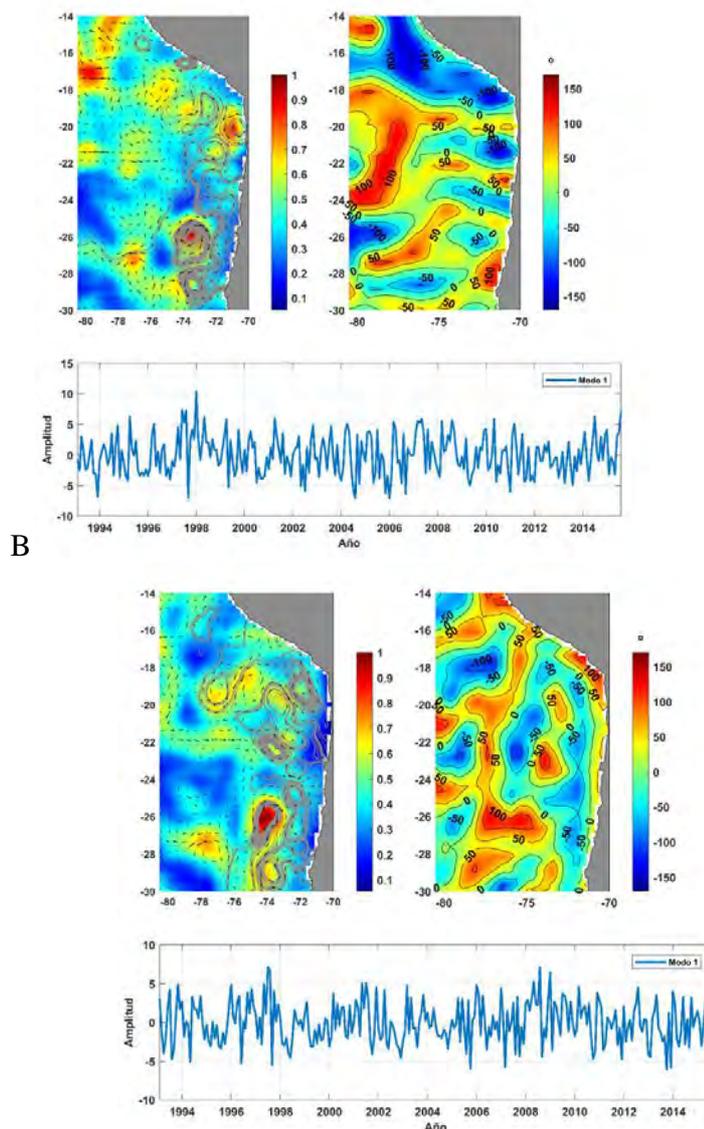


Figura 66. Funciones Empíricas Ortogonales de la velocidad geostrofica (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S y costa-80°W. Estructuras espaciales y temporales de los dos primeros modos.

6.4.3.6. Energía cinética asociada a remolinos (EKE)

Los primeros tres modos de FEOs de la EKE rescataron un 40% de la varianza total. Las estructuras espaciales de los dos primeros modos (**Figura 67a,c**) muestran un patrón similar al observado en la climatología (ver **Figura 52**) con la presencia de altas amplitudes frente al borde oriental del centro-sur del Perú, sin exhibir un comportamiento estacional como muestra la estructura temporal (**Figura 67b,d**, contornos rojos y azul), sino que sólo

una oscilación explosiva durante el evento de El Niño 1997-1998. La estructura espacial del tercer modo muestra una oscilación norte-sur (**Figura 67e**) sin un patrón temporal definido (**Figura 67f**, contorno negro). En la región costera del norte de Chile los tres primeros modos muestran amplitudes bajas en comparación con las reseñadas en la región costera frente al Perú.

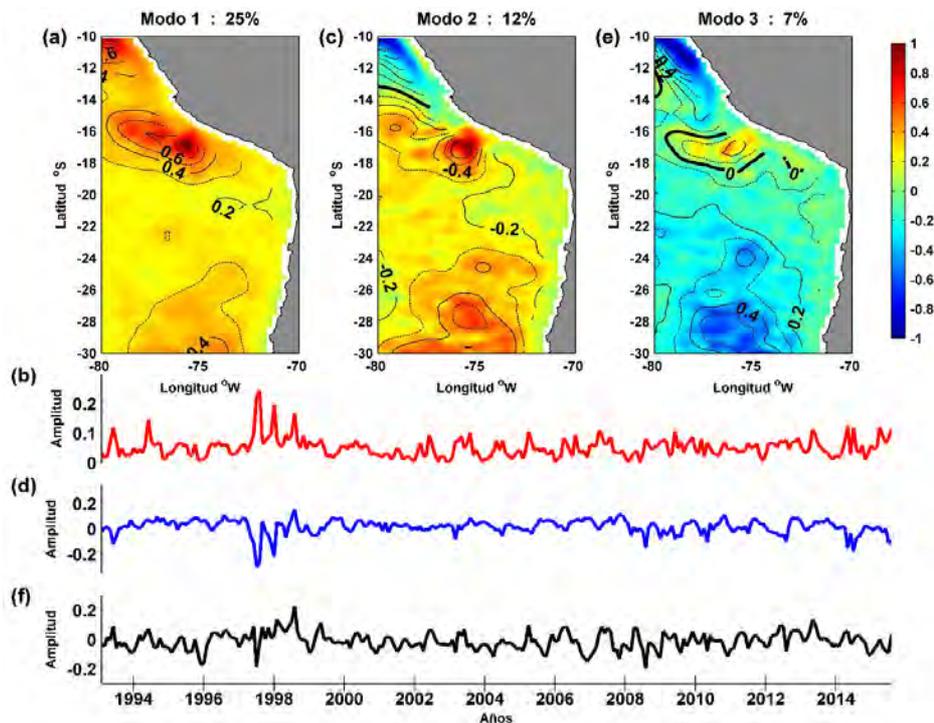


Figura 67. Funciones Empíricas Ortogonales de la EKE (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud. Estructuras espaciales: (a) Modo 1, (b) modo 2, (c) modo 3. Estructuras temporales (d) Modo 1, (e) modo 2, (f) modo 3.

6.4.3.7. Frentes térmicos

Los primeros tres modos de FEOs de los frentes térmicos rescataron un 45% de la varianza total. La estructura espacial del primer modo muestra la franja costera de alta amplitud ($>0,4$) lo largo de toda la región estudiada (**Figura 68**), corroborando lo observado en las climatologías mensuales. La estructura temporal que modula la estructura espacial del primer modo, muestra un comportamiento claramente estacional que coincide con lo reseñado en la climatología mensual. Por otro lado, la estructura espacial del segundo modo

muestra una oscilación meridional (norte-sur) con el cambio de signo (amplitud cero) situado oblicuamente entre los 20 y 24°S. La estructura temporal del segundo modo también muestra un comportamiento aproximadamente estacional.

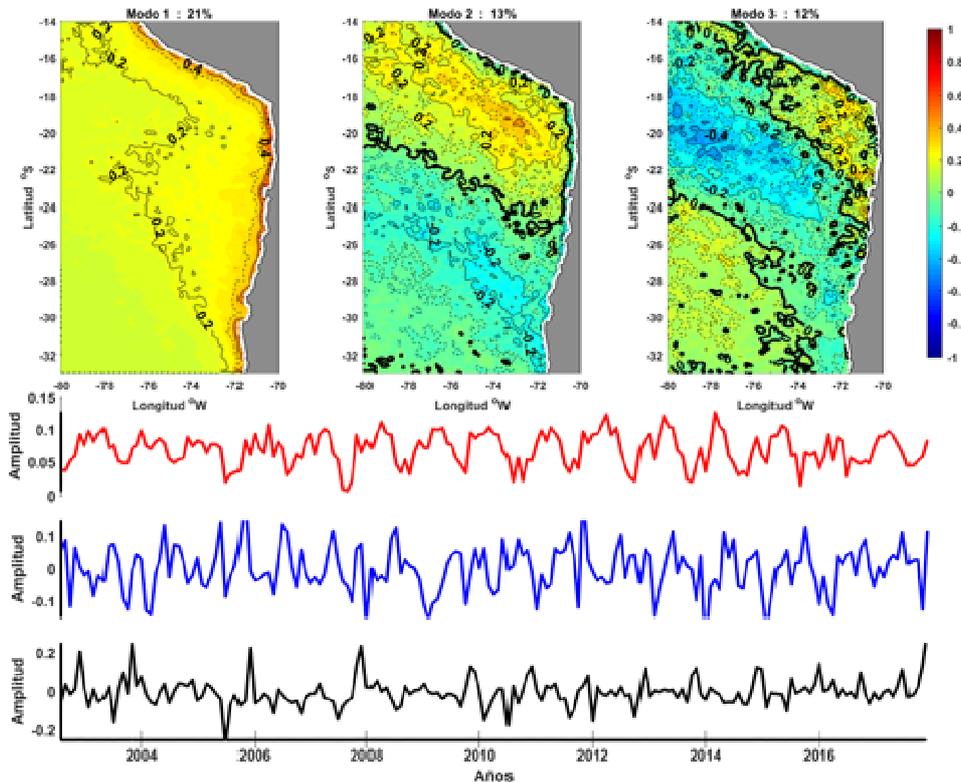


Figura 68. Funciones Empíricas Ortogonales de los frentes térmicos (2002-2017)) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud. Estructuras espaciales: (a) Modo 1, (b) modo 2, (c) modo 3. Estructuras temporales (d) Modo 1, (e) modo 2, (f) modo 3.

6.4.4 Series de estaciones costeras

El análisis de series de tiempo de la TSM provenientes de estaciones costeras de Arica, Iquique y Antofagasta se presenta en la **Figura 69**. La serie de TSM en la localidad de Arica un claro comportamiento estacional, con un rango que fluctuó entre 14,2 y 23,5°C. Por su parte, el análisis de la variabilidad interanual de la anomalía de la TSM (**Figura 72**) resalta que ésta se encuentra correlacionada y en fase con la señal del Índice Oceánico de El Niño (ONI), destacando las mayores anomalías positivas asociadas a los eventos cálidos El Niño, especialmente en los años 1997-1998 y 2015-2016. Por su parte, para la estación

costera de Iquique, la serie de TSM igualmente mostró un comportamiento estacional marcado, con un rango menor al de Arica (14-18 °C) sin considerar la perturbación de la serie en El Niño (1997-1998) que verifica TSM de 22°C. La serie interanual (**Figura 72**) muestra también correlación entre la anomalía de TSM interanual y el índice ONI, destacando los años cálidos 1991-1992 y 1997-1998, pero no para el caso del 2015-2016.

La serie de TSM para la estación costera de Antofagasta mostró un comportamiento estacional claro, con un rango entre 15 y 21°C, sin considerar los años cálidos El Niño (1997-1998) que verifica TSM de 22°C. La serie interanual (**Figura 72** muestra también correlación entre la anomalía de TSM interanual y el índice ONI, destacando los años cálidos 1991-1992 y 1997-1998, y 2015-2016. Por su parte, las series de datos del nivel del mar provenientes de estaciones costeras de Arica, Iquique y Antofagasta (datos del SHOA) se presenta en la **Figura 70**. En general se observa un patrón estacional menos claro que lo reseñado para la TSM. La localidad de Arica mostró un rango mayor (140-180 cm) el que disminuye hacia el sur (Iquique: 76-113 cm, Antofagasta: 59-90 cm). Por su parte, el análisis de la variabilidad interanual de la anomalía del nivel del mar (**Figura 73**) resalta la correlación y fase con la señal del Índice Oceánico de El Niño (ONI).

La distribución temporal del viento se representa en la **Figura 71** mediante diagramas temporales (“chascones”) de vectores de viento para las series de datos de las localidades de Iquique y Antofagasta (Dirección Meteorológica de Chile, 2000-2017), evidenciando en ambas series el predominio de los vientos del sur.

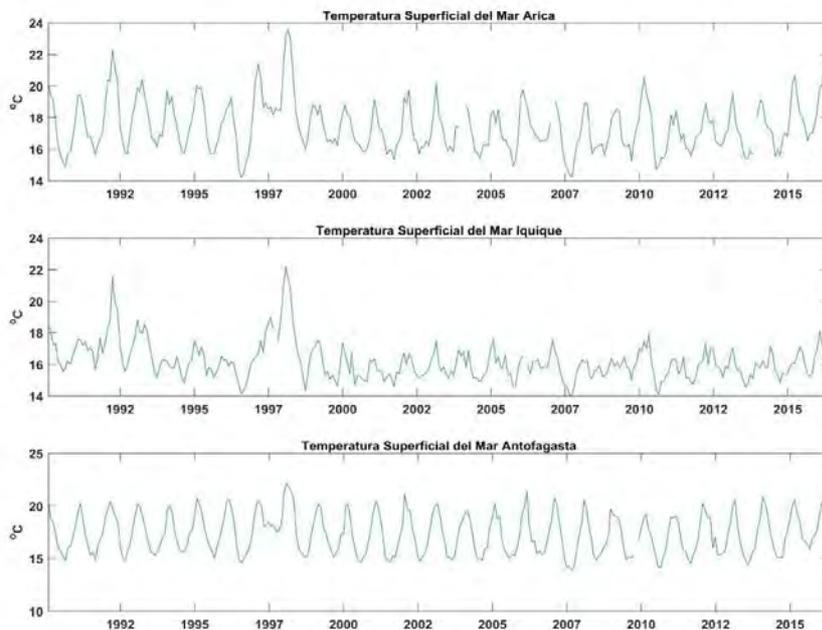


Figura 69. Distribución temporal de la TSM (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 1990-2015), para las estaciones costeras de Arica, Iquique y Antofagasta.

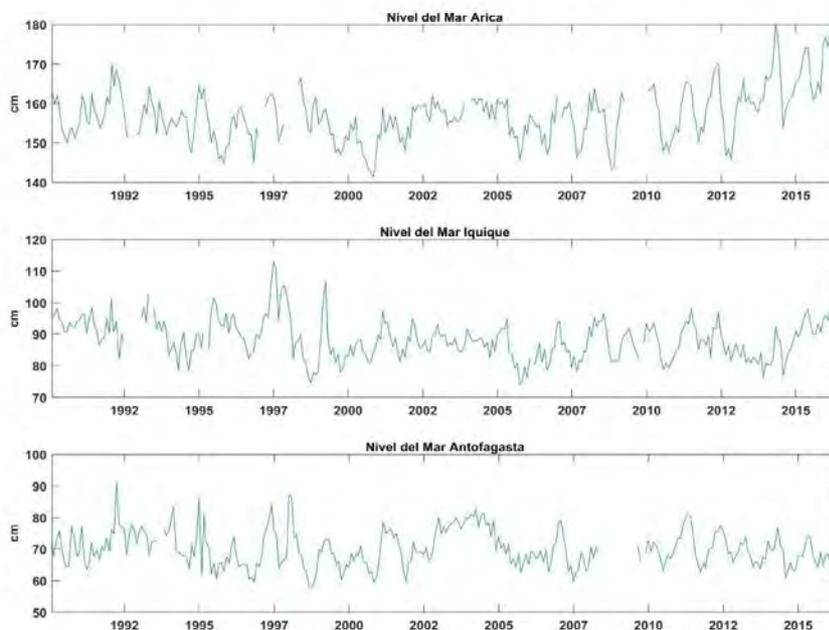


Figura 70. Distribución temporal del nivel del mar (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 1990-2015), para las estaciones costeras de Arica, Iquique y Antofagasta.

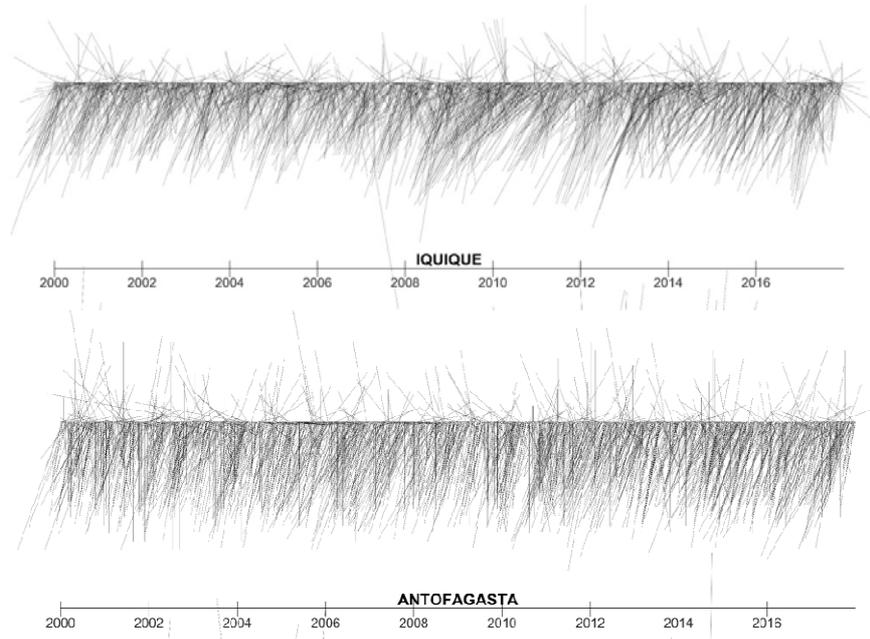


Figura 71. Distribución temporal del viento (DMC, 2000-2017) en estación costera de Iquique y de Antofagasta.

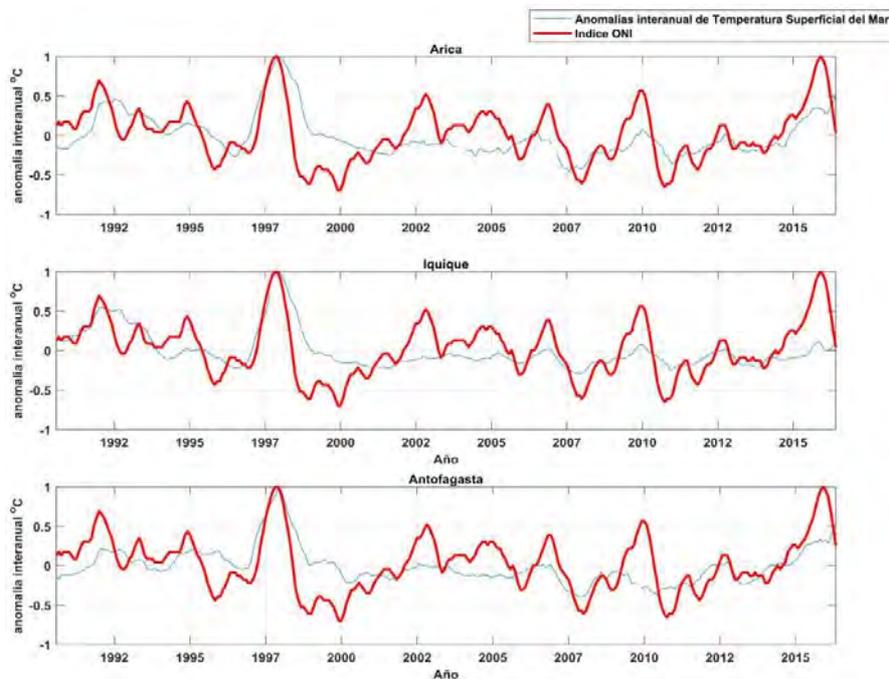


Figura 72. Distribución temporal interanual de la anomalía de la TSM (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 1990-2015), para las estaciones costeras de Arica, Iquique.

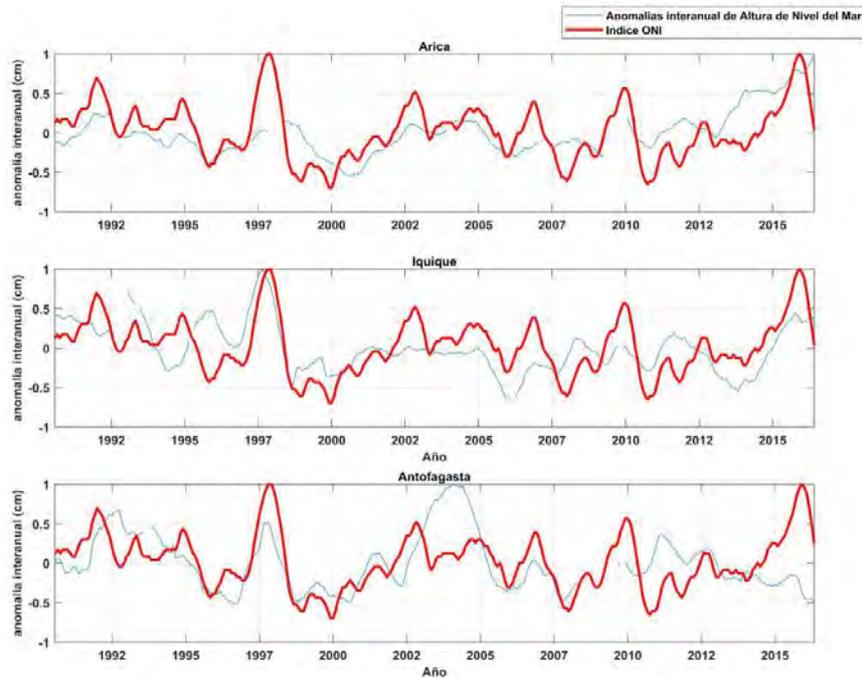


Figura 73. Distribución temporal interanual de la anomalía del nivel del mar (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 1990-2015), para las estaciones costeras de Arica, Iquique y Antofagasta, en conjunto con la serie de tiempo e índice ONI (El Niño oceánico).

6.4.5. Escala anual. Diagramas de Hovmöller

Con el propósito de observar la variabilidad estacional a lo largo de la costa de las variables críticas discutidas anteriormente, se confeccionó gráficos de espacio-tiempo, en la región costera del área de estudio (primeros píxeles paralelos a la costa), abarcando en promedio 20 km aproximadamente.

6.4.5.1. Temperatura superficial del mar

En general, al analizar la distribución espacial de la TSM con la latitud, se esperaría que la radiación solar máxima actuara sobre la zona ecuatorial y la TSM presente un decaimiento gradual hacia las altas latitudes, sin embargo este patrón es modulado frecuentemente por factores locales que cambian el patrón de distribución cercano a la costa. La **Figura 74** muestra la existencia de un incremento de TSM significativo con la latitud, entre los 10°S y los 14°S, alcanzando una media máxima de ~19,5°C (**Figura 74b**). Posteriormente la distribución de TSM decae abruptamente en ~2,5°C entre los 14°S y 17°S, y por el

contrario, a medida que se aproxima a la zona de la curvatura Chile-Perú la TSM aumenta gradualmente hasta alcanzar su media máxima de $\sim 18,8^{\circ}\text{C}$ justo en los 18°S (**Figura 74b**). Uno de los efectos locales que se verifica en la región de la curvatura del codo norte de Chile dice relación con la orientación de la línea de costa y su efecto sobre el viento regional, baja ventilación que posibilita el incremento de la TSM en dicho sector. Hacia el sur las bandas de TSM decaen gradualmente entre los 20 y los 30°S donde se reportan las TSM promedio más bajas ($\sim 14^{\circ}\text{C}$), aunque se observa un aumento significativo de la TSM frente a la península de Mejillones.

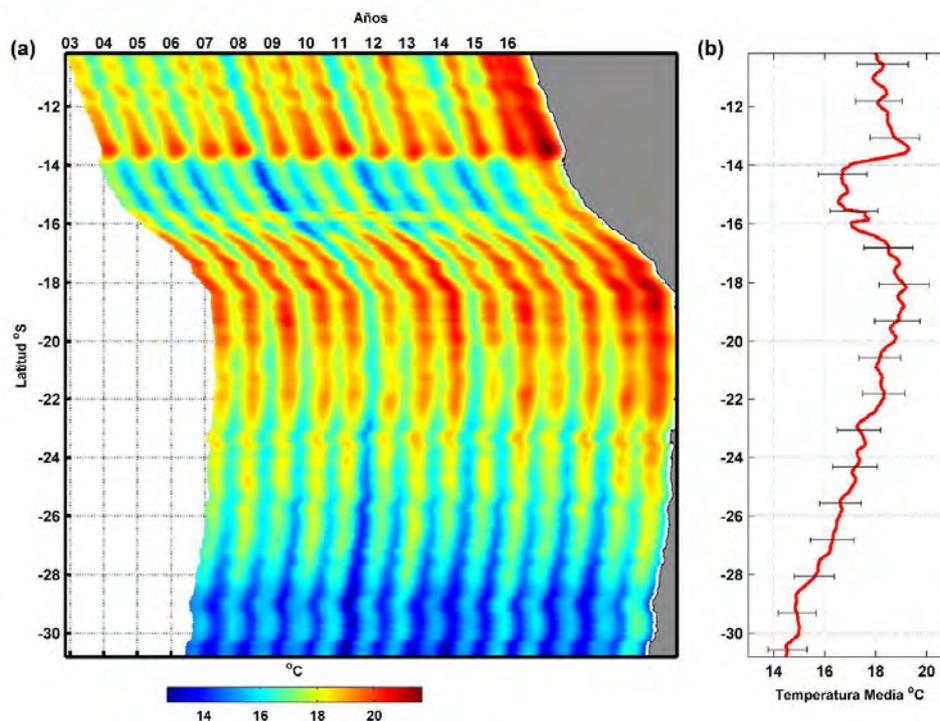


Figura 74. Diagrama Hovmöller de TSM a lo largo de la costa (julio 2002 hasta diciembre 2016) para la región entre los 10°S - 30°S de latitud y los 70°W - 80°W de longitud.

6.4.5.2. Clorofila superficial

La distribución espacial de clorofila a lo largo de la costa (**Figura 75a**) muestra un patrón muy similar al observado en la TSM, es decir, desde los $\sim 11^{\circ}\text{S}$ se incrementa gradualmente hasta alcanzar un máximo en los 14°S , evidenciando un núcleo de alta concentración de clorofila que alcanza $\sim 17 \text{ mg m}^{-3}$ como muestra la **Figura 75b**. Entre los 14°S y 16°S la

concentración de clorofila disminuye drásticamente hasta alcanzar en promedio un mínimo de $\sim 4 \text{ mg m}^{-3}$ (**Figura 75b**).

En cambio, en la zona costera del sur del Perú (entre 16 y 18°S) y en la vecindad de la curvatura Chile-Perú, se observa un incremento gradual con un máximo en los $17^\circ 30'\text{S}$, de $\sim 10 \text{ mg m}^{-3}$ (**Figura 75b**). Hacia bajas latitudes el diagrama de Hovmöller muestra una disminución gradual hasta los $\sim 3 \text{ mg m}^{-3}$, aunque destaca la disminución drástica frente a la península de Mejillones.

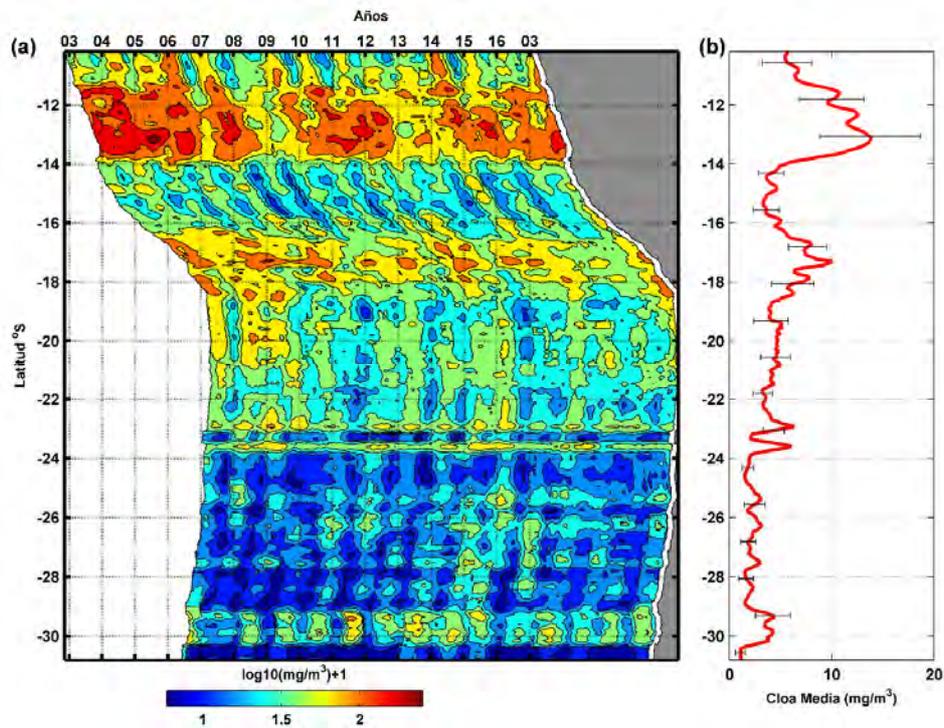


Figura 75. Diagrama de Hovmöller de Clorofila a lo largo de la costa (julio 2002 hasta junio 2017) para la región entre los 10°S - 30°S de latitud y los 70°W - 80°W de longitud.

6.4.5.3. Esfuerzo del Viento Superficial

Una interrogante interesante de analizar es como varía la magnitud del EVS paralelo a la costa. El diagrama de Hovmöller (**Figura 76**) muestra un comportamiento estacional desde los 10 a los 14°S con un valor promedio de $0,04 \text{ N m}^{-2}$ (**Figura 76b**), que aumenta

drásticamente entre los 14°S y los 16°S alcanzando un máximo promedio de $0,06 \text{ N m}^{-2}$. En esta región resalta que mientras el viento aumenta la TSM y la clorofila disminuyen.

Por su parte, frente a la región de la curvatura Chile-Perú, el EVS disminuye fuertemente hasta los 18°S alcanzando un mínimo de $0,02 \text{ N m}^{-2}$ (**Figura 76b**), verificando una muy baja variabilidad en esta región, tal como muestran los rangos de la desviación estándar. Hacia el sur se observa un incremento paulatino del EVS hasta alcanzar los $\sim 0,06 \text{ N m}^{-2}$ en los 30°S. Estos resultados son consistentes con lo reportado por Córdova *et al.* (2014) quienes verifican en cruceros RECLAN vientos de baja intensidad (72,7% con intensidad menor a 5 m/s) distribuidos a lo largo de toda la región norte de Chile, con la excepción del área oceánica frente a caleta Chipana (sur de Iquique) con vientos de intensidad moderada. Asimismo, verifican el dominio de vientos desde los cuadrantes del sur (vientos desfavorables a la surgencia representan menos del 15% de los registros).

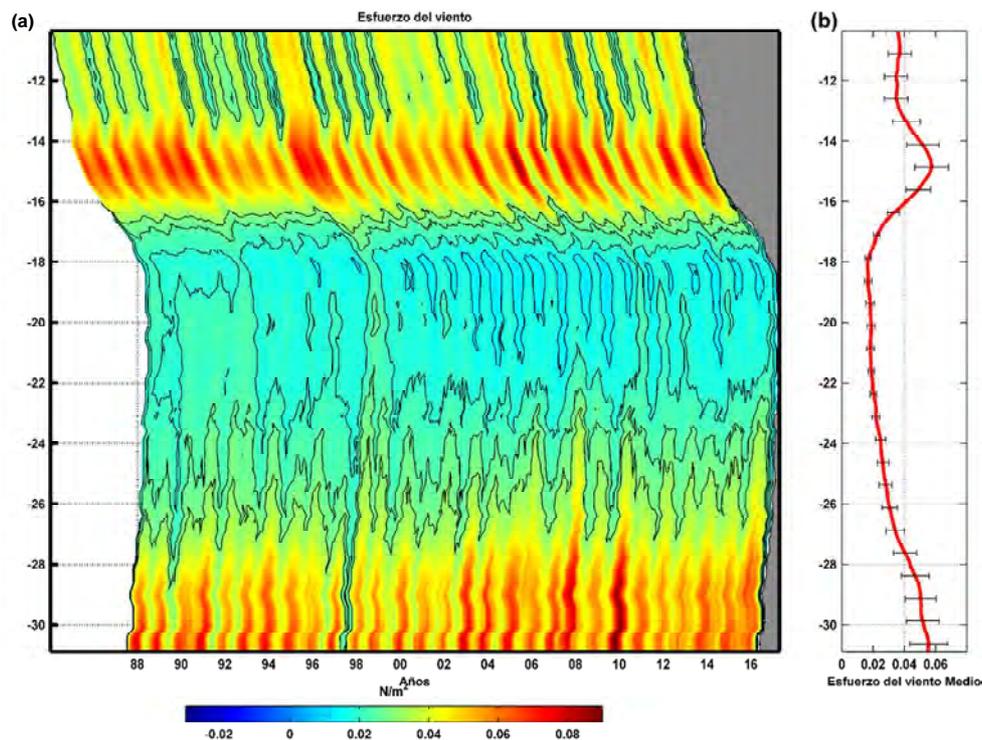


Figura 76. Diagrama de Hovmöller del Esfuerzo del Viento a lo largo de la costa (julio 1987 hasta mayo 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud. Los contornos de colores son las magnitudes del EVS.

6.4.5.4. Velocidad de la Deriva de Ekman

El diagrama espacio-tiempo de la magnitud de la deriva de Ekman (**Figura 77a**) muestra un comportamiento similar al EVS, debido fundamentalmente a que los cálculos de la deriva de Ekman provienen directamente del viento. Los máximos rangos de magnitud de la deriva de Ekman se alcanzan entre los 14°S y 16°S con magnitudes de $0,07\text{m s}^{-1}$ (**Figura 77b**), y en la zona de la curvatura que abarca entre los 18°S y 22°S las magnitudes fueron mínimas ($0,02\text{m s}^{-1}$) (**Figura 72b**). Hacia el sur la magnitud de la velocidad de la deriva de Ekman aumentó gradualmente hasta alcanzar los $0,04\text{m s}^{-1}$ en el límite austral del área estudiada. Por otra parte, para observar hacia donde deriva la corriente de Ekman se graficaron los diagramas de Hovmöller zonales (**Figura 78a**) y meridionales (**Figura 78b**). La deriva de Ekman zonal tuvo una dirección hacia el Oeste a lo largo de la costa, en tanto que la velocidad meridional derivó preferencialmente hacia el Norte. Resalta que las magnitudes zonales fueron levemente superiores a las magnitudes meridionales.

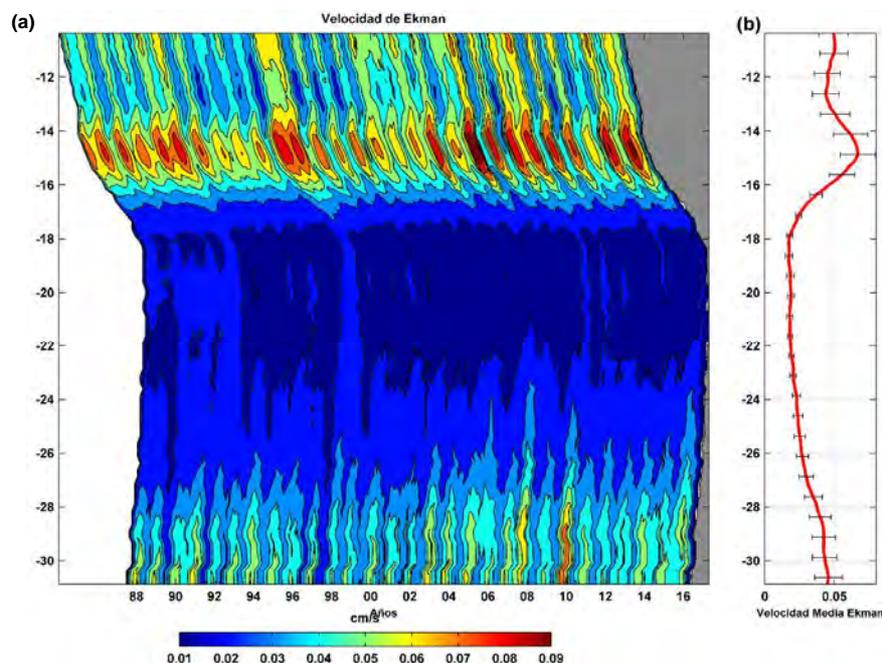


Figura 77. Diagrama de Hovmöller de la deriva de Ekman a lo largo de la costa (julio 1987 hasta mayo 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud. Los contornos de colores son las magnitudes del EVS.

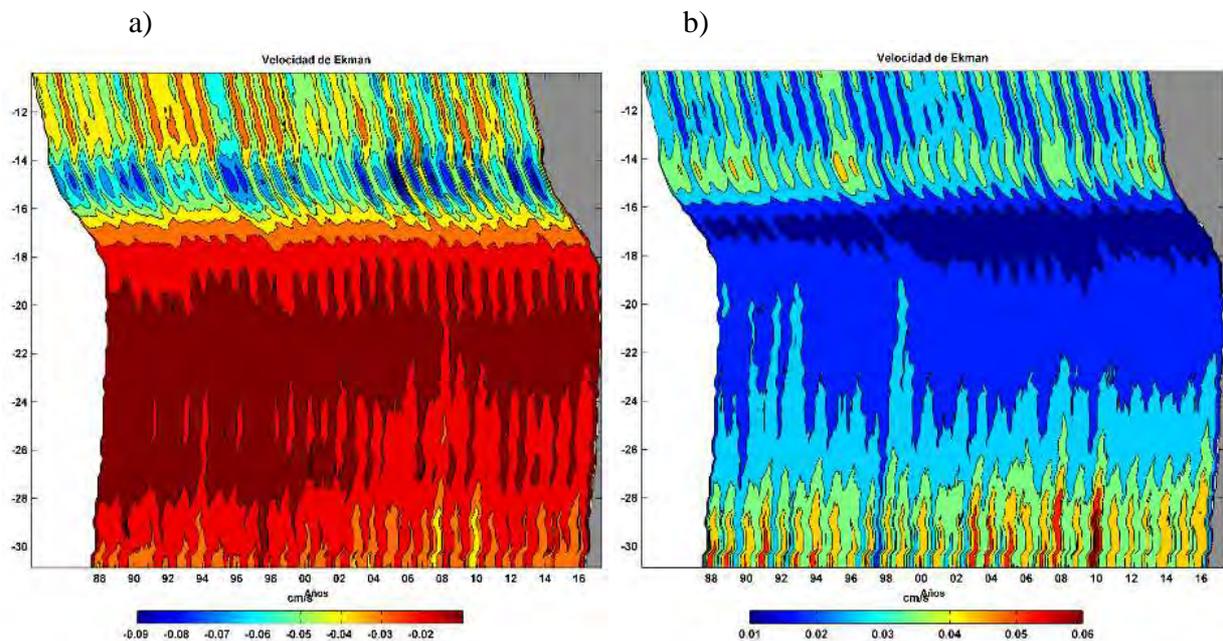


Figura 78. Diagrama de Hovmöller de la deriva de Ekman a lo largo de la costa (julio 1987 hasta mayo 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud. Los contornos de colores son las magnitudes del EVS. (a) Zonal y (b) Meridional.

6.4.5.5. Velocidad Geostrofica

El diagrama de Hovmöller de la magnitud de las velocidades geostroficas no mostró un patrón definido de circulación (**Figura 79a**), aunque las magnitudes máximas se reportaron para la región central del Perú. Por otro lado, destaca las bajas magnitudes entre los 18°S y 22°S asociado a la zona de la curvatura de Chile-Perú (**Figura 79b**), comportamiento que fue similar a lo mostrado con la deriva de Ekman. En síntesis, las magnitudes asociadas a la rotación terrestre duplican a las generadas por el forzante viento.

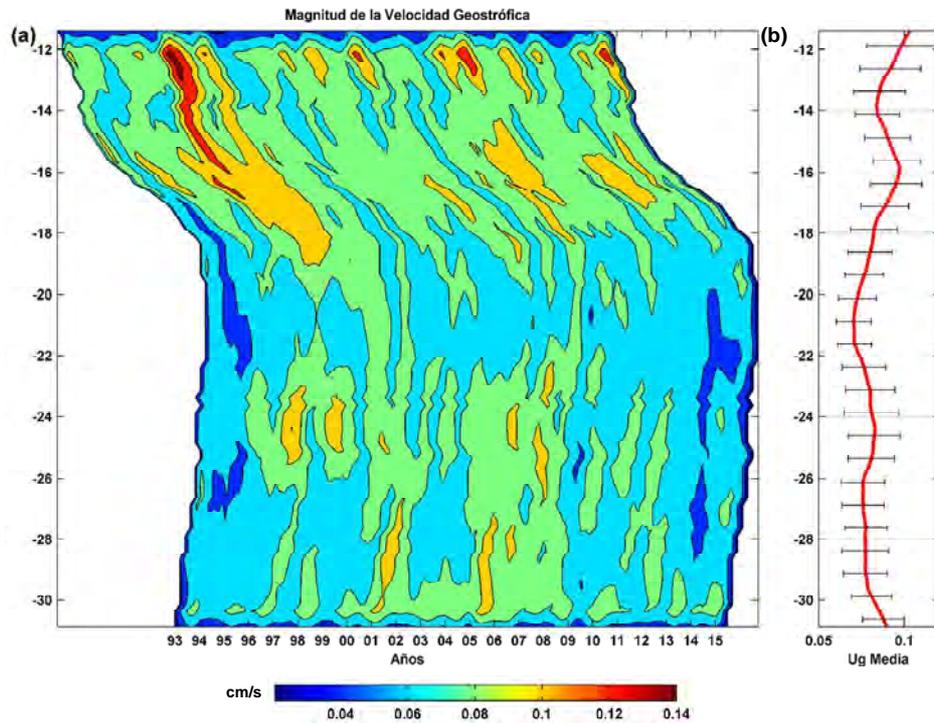


Figura 79. Diagrama de Hovmöller de la velocidad geostrófica a lo largo de la costa (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud.

6.4.5.6. Energía cinética asociada a remolinos (EKE)

El diagrama de Hovmöller (**Figura 80a**) para la EKE muestra una zona de mayor energía, aunque no se observa un patrón estacional definido, para región norte del área de estudio (centro-sur del Perú), que se caracterizó por ser una región más energética hasta los ~18°S, en tanto que la zona de la curvatura Chile-Perú mostró nuevamente una región con mucho menos dinámica. Durante el periodo 1997-1998 el mecanismo energético traspasa el umbral de la curvatura desplazándose levemente al sur.

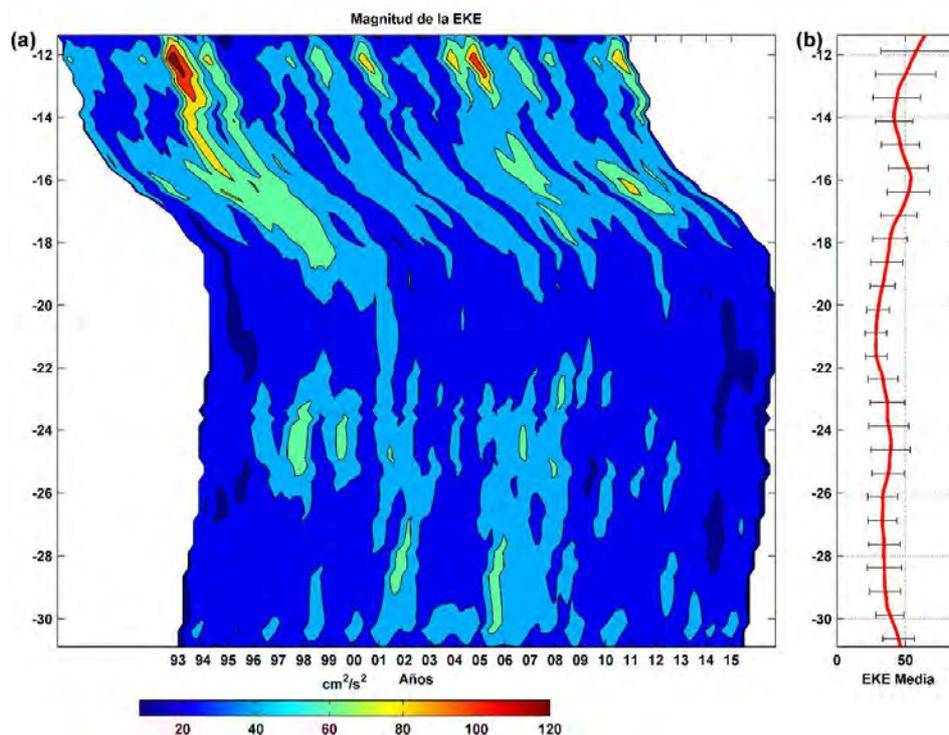


Figura 80. Diagrama de Hovmöller de la EKE a lo largo de la costa (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S de latitud y los 70°W-80°W de longitud.

6.4.5.7. Frentes térmicos

Utilizando la serie satelital de TSM MODIS mensual (2002-2017) se extrajo el valor promedio de la magnitud de los frentes presentes de la banda costera (40 km), abarcando desde el 14°S hasta 32,5°S. Los resultados se muestran en un diagrama latitud versus tiempo (**Figura 81**) así como la distribución latitudinal promedio de los gradientes térmicos, incluyendo el rango de valores para esta variable. El diagrama muestra valores filtrados con un filtro mediana de 9 x 9 pesos “pasa bajo” que elimina gran parte de la señal anual.

Las variaciones interanuales de los frentes derivados de los gradientes térmicos superficiales claramente la presencia significativa de estas estructuras entre la costa y los 40 km entre Arica y Antofagasta. En el norte de Chile predomina gradientes térmicos mayores a los $6 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km} \times 10^{-2}$, incluso superando los $7,5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km} \times 10^{-2}$. El resto de la zona costera más bien verifica valores bajos ($<5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km} \times 10^{-2}$). En esta zona, aunque su presencia es casi

permanente, se muestra cierta diferencia entre años, asociada al parecer a oscilaciones interanuales. Estas estructuras aparecen intensas ($>7,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km} \times 10^{-2}$) entre 2002 y finales de 2004 para luego debilitarse en la banda costera entre 2005 y finales de 2007. Posteriormente se observa nuevamente frentes intensos ($>7,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km} \times 10^{-2}$) entre 2008 y principios de 2013 entre Arica y Antofagasta, pero a partir de 2013 se debilitan los gradientes que se ubican al sur de los 22°S ($< 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km} \times 10^{-2}$). La **Figura 81** evidencia que entre 2002 y 2017, la zona costera entre Arica e Iquique presenta gradientes más intensos.

Por otro lado, la evolución temporal promedio de la intensidad de los frentes de la zona de estudio (**Figura 81**) muestra fluctuaciones interanuales significativas, es así que en los periodos entre 2002 y 2004 como también entre 2009 y 2012 se verifican gradientes mayores ($>7,4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km} \times 10^{-2}$) en relación a los periodos 2005-2007 y 2015-2017 ($<7 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km} \times 10^{-2}$). Lo anterior, en conjunto con otros factores dinámicos, permite definir periodos menos advectivos (mayor retención).

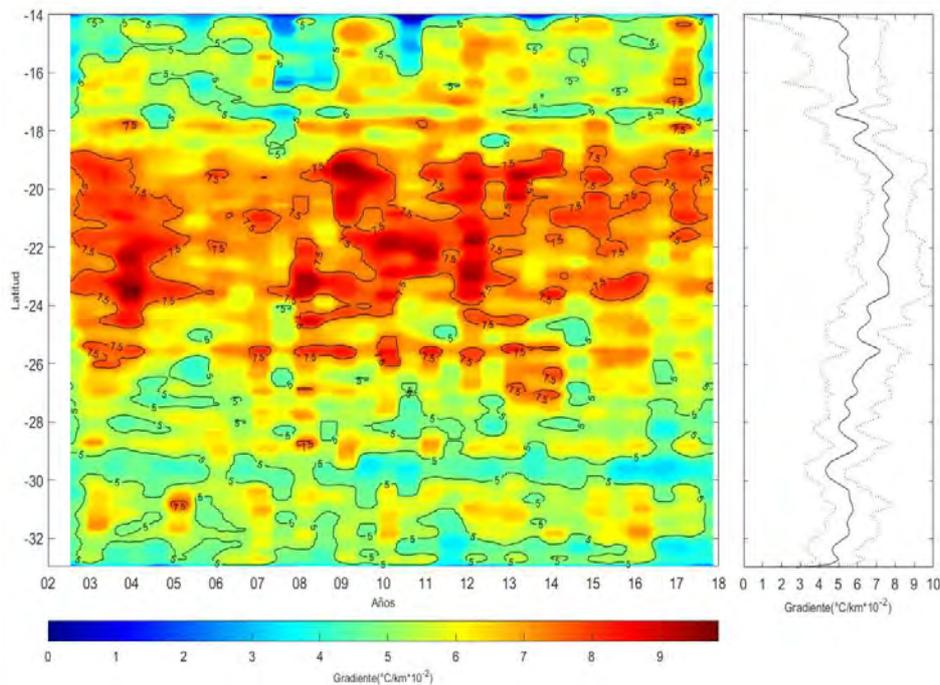


Figura 81. Evolución temporal de los gradientes térmicos ($^\circ\text{C}/\text{km} \times 10^{-2}$) a lo largo de la costa sur de Perú y norte de Chile entre 2002 y 2017. El panel de la derecha es el promedio temporal (y rango).

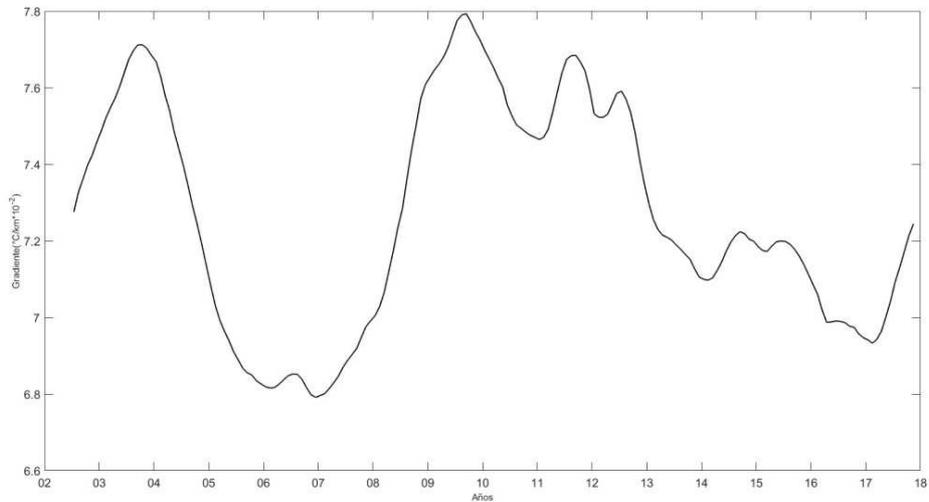


Figura 82. Evolución temporal de los gradientes térmicos promedios ($^{\circ}\text{C}/\text{km} \cdot 10^{-2}$) de la banda entre los 18°S y 24°S , que representa la zona de mayor presencia de estas estructuras entre 2002 y 2017.

6.4.6. Escala interanual. Diagramas de Hovmöller

Con el propósito de observar si las variables estudiadas están influenciadas por señales de origen ecuatorial, a todas las variables se les extrajo la señal estacional mediante medias móviles. Se analizó las señales interanuales mediante diagramas espacio-tiempo (diagramas de Hovmöller). La señal ecuatorial que se utilizó fue el Índice Oceánico de El Niño que constituye el estándar de la NOAA para la identificación de eventos cálidos (El Niño) y eventos fríos (La Niña) en el océano Pacífico tropical (**Figura 83**). Este índice se calcula como la media móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar para la región El Niño 3.4 (www.ggweather.com).

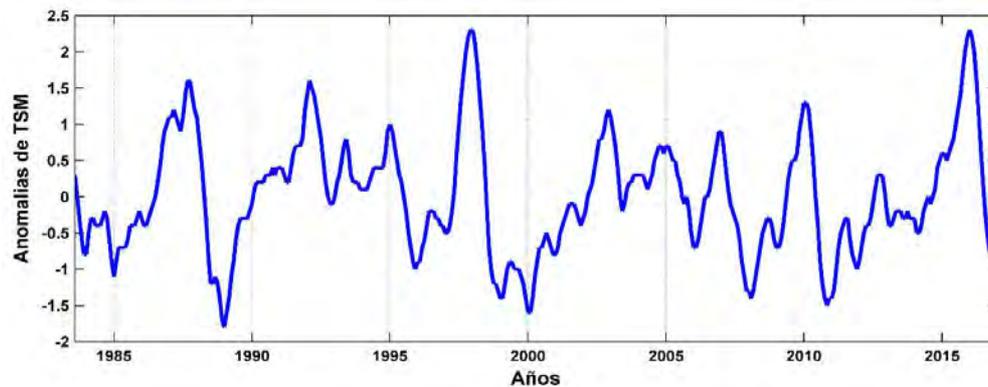


Figura 83. Índice Oceánico de El Niño para el período comprendido entre 1984 y 2016.

6.4.6.1. Anomalías de la temperatura superficial del mar

La **Figura 84a** muestra las anomalías de la TSM a lo largo de la costa, donde se observa la presencia de 4 bandas frías (2003-2004, 2007, 2010 y 2013) asociados a eventos de La Niña, lo que coincide con el Índice ONI. Además, debido a los años considerados en el diagrama de espacio-tiempo Hovmöller (**Figura 84a**) permite observar el intenso evento cálido asociado a El Niño 2015-2016. La mayoría de los eventos anómalos cubren en su totalidad la zona de estudio impactando también a la región sur (**Figura 84b**). La zona de la curvatura Chile-Perú que ha sido el atenuador de las señales en la escala anual, para el caso de las señales interanuales esta región no ha constituido un filtro para señales provenientes del Ecuador. Entre los 18°S y los 22°S la anomalías de TSM persiste en mantenerse rangos altos, similares a los observados en la escala anual.

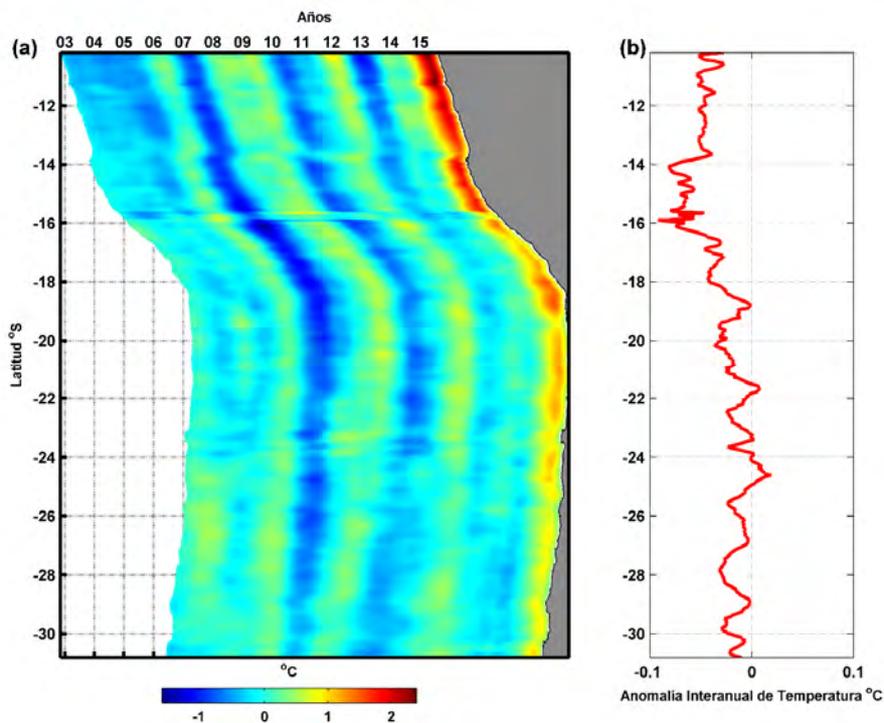


Figura 84. Diagrama Hovmöller de las anomalías de la TSM a lo largo de la costa (julio 2002 hasta diciembre 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud.

6.4.6.2. Anomalías de la clorofila

La distribución de anomalías de clorofila (**Figura 85**) muestra un incremento de las anomalías durante el evento frío de La Niña 2002-2005, tal como se verifica en las anomalías de TSM. Este evento anómalo sobrepasa la zona de la curvatura con un incremento de las anomalías de clorofila en esta región. En los eventos fríos de menor intensidad se observa asimismo un mayor incremento de las anomalías positivas de clorofila a lo largo de la costa, alcanzando hasta la región sur del área estudiada. Al igual que lo reseñado para la serie temporal de anomalías de TSM, en este caso se verifica un incremento de las anomalías positivas de clorofila durante eventos fríos interanuales, y por el contrario, durante el intenso evento cálido 2015-2016 se observó una drástica disminución de las concentraciones de clorofila (como estimador de la biomasa de fitoplancton) que se verificó en la presencia de anomalías negativas en la región norte de Chile (18-22°S).

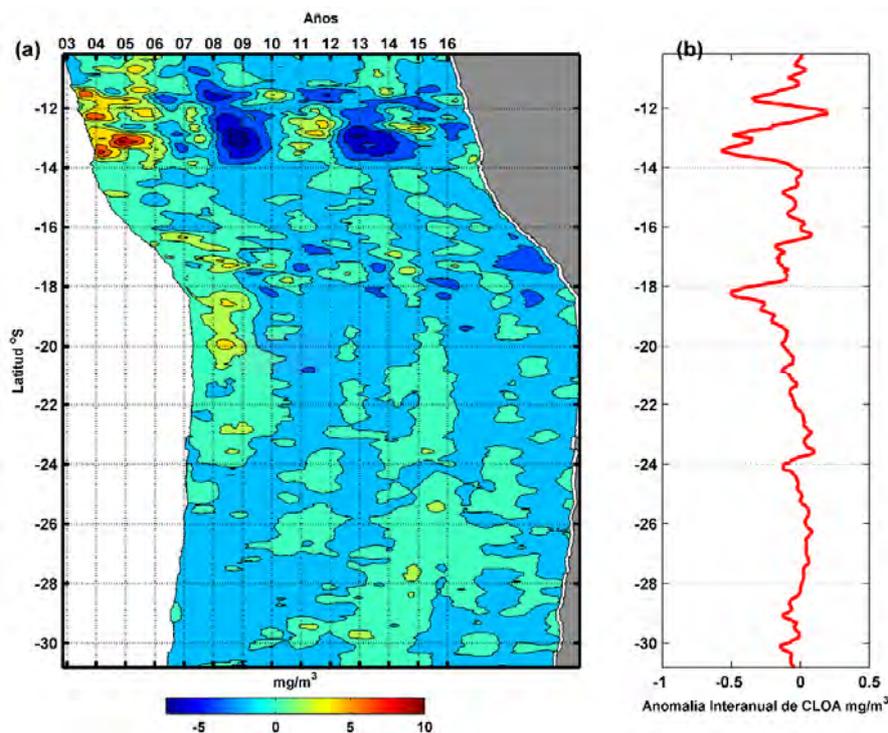


Figura 85. Diagrama de Hovmöller de las anomalías de la Clorofila a lo largo de la costa (julio 2002 hasta junio 2017) para la región entre los 10°S-30°S de latitud.

6.4.6.3. Anomalías del Esfuerzo del Viento Superficial

El diagrama de anomalías de EVS muestra que este forzante está fuertemente impactado por eventos interanuales (**Figura 86**), verificando la presencia de anomalías positivas ante eventos cálidos mostrados por el índice ONI, y por el contrario anomalías negativas del EVS asociadas a eventos fríos. Esta asociación es principalmente válida para la región centro-sur del Perú, aunque también es posible verificar el impacto en la región de la curvatura Chile-Perú.

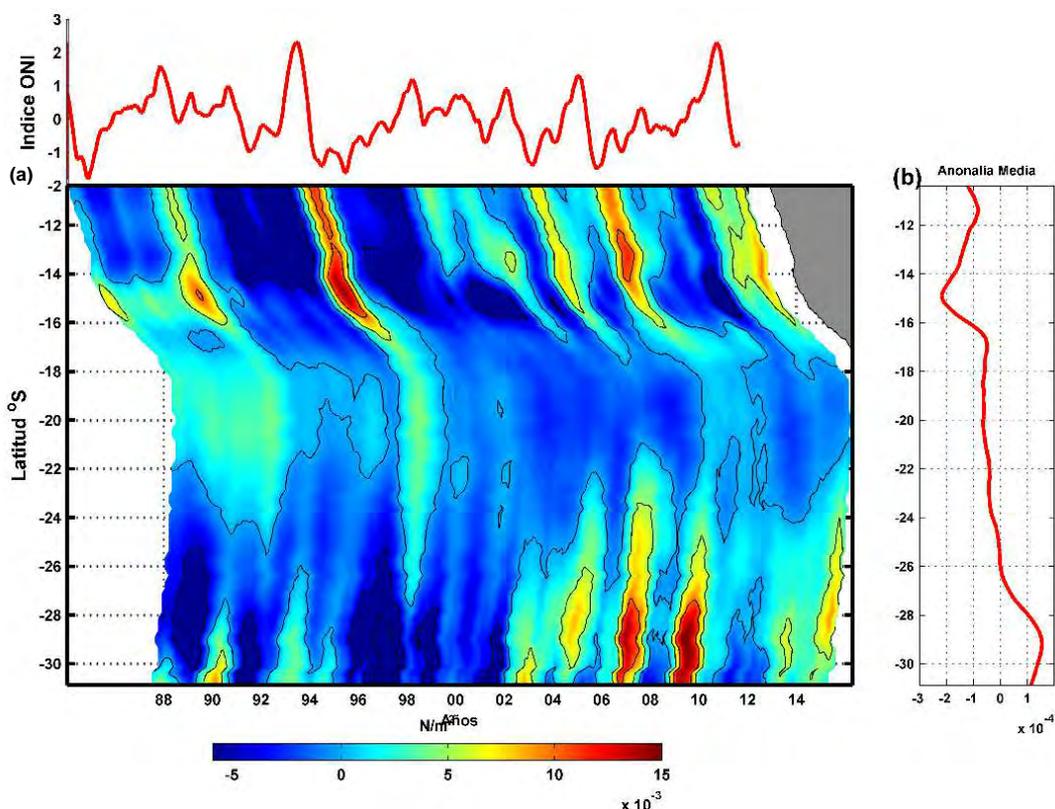


Figura 86. Diagrama de Hovmöller de anomalías del Esfuerzo del Viento a lo largo de la costa (julio 1987 hasta mayo 2016) para la región entre los 10°S-30°S de latitud.

6.4.6.4. Anomalías de la velocidad de la deriva de Ekman

El diagrama de anomalías de la velocidad de deriva de Ekman (**Figura 87**) muestra similitudes con el comportamiento espacio-tiempo de las anomalías del EVS, debido a que los cálculos de la deriva provienen directamente del forzante viento. Por lo tanto, durante eventos cálidos y fríos de origen ecuatorial, las velocidades de la deriva de Ekman son moduladas especialmente en la región costera del centro-sur del Perú.

6.4.6.5. Anomalías de la velocidad geostrófica

Al igual que las anomalías de la velocidad de la deriva de Ekman, las anomalías de velocidad geostrófica interaccionan antes eventos anómalos de origen ecuatorial (**Figura 88a**). Para El Niño 1997-1998, por ejemplo, las anomalías positivas de la velocidad geostrófica se intensifican y su efecto alcanza hasta la región situada al sur de los 25°S

(Figura 88b). En los eventos cálidos de menor intensidad también el sector centro-sur del Perú es impactado con anomalías positivas.

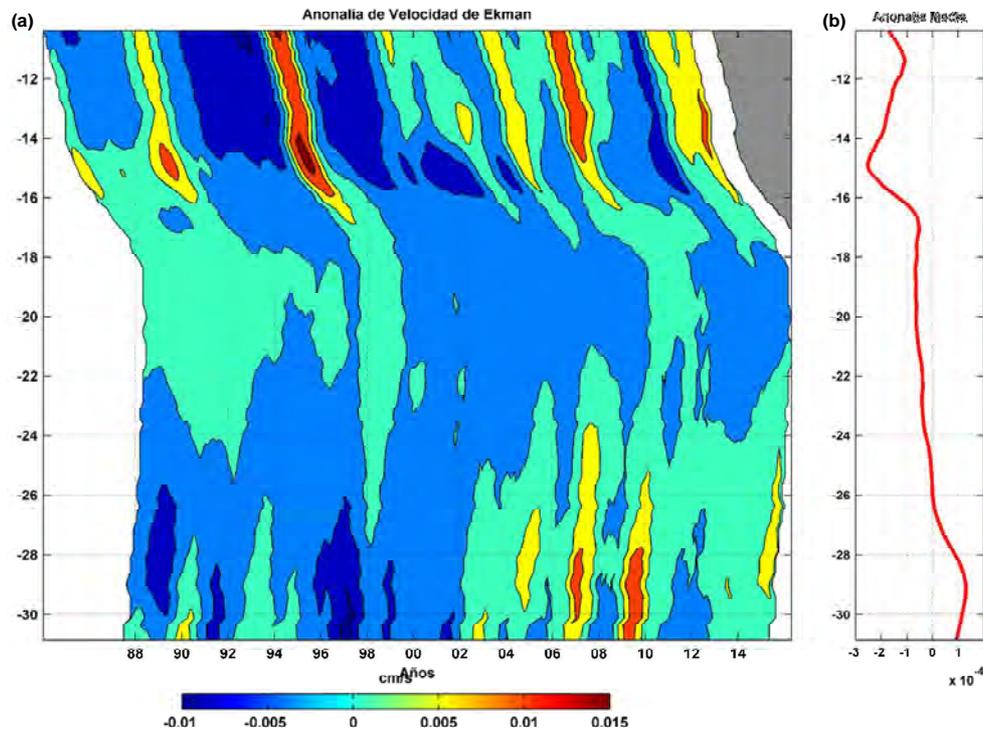


Figura 87. Diagrama de Hovmöller de las anomalías de la velocidad de Ekman a lo largo de la costa (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S de latitud.

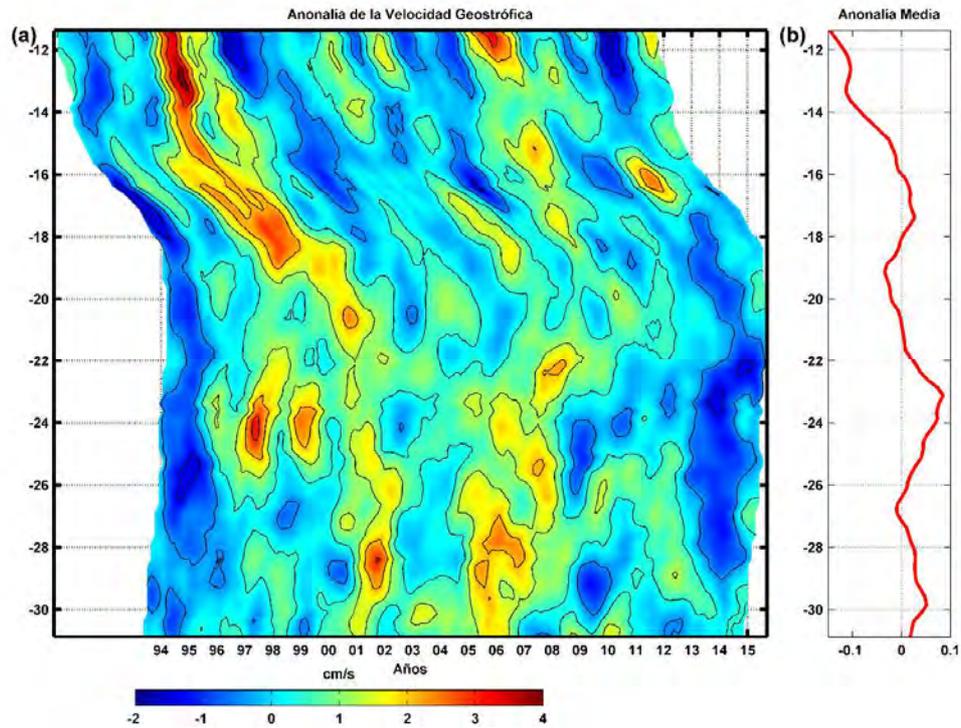


Figura 88. Diagrama de Hovmöller de las anomalías de velocidad geostrófica a lo largo de la costa (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S de latitud.

6.4.6.6. Anomalías de la EKE

Las anomalías de EKE (**Figura 89**) muestran similitudes con las anomalías de la velocidad geostrófica dado que los cálculos provienen de la misma fuente. En resumen, durante eventos anómalos (eventos cálidos/fríos), las anomalías de EKE cambian significativamente especialmente al norte de los 22°S. Dentro de este contexto, la evolución temporal promedio de la energía (**Figura 89**) no obstante muestra valores de energía superiores a $25 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ durante casi todo el período, se verifican diferencias interanuales con dos mínimos ($<20 \text{ cm}^2/\text{s}^2$) durante 1993-1995 y 2012-2014, y dos máximos asociados a los periodos cálidos 1997-1998 y 2005-2006 al cual se agrega un máximo el 2015.

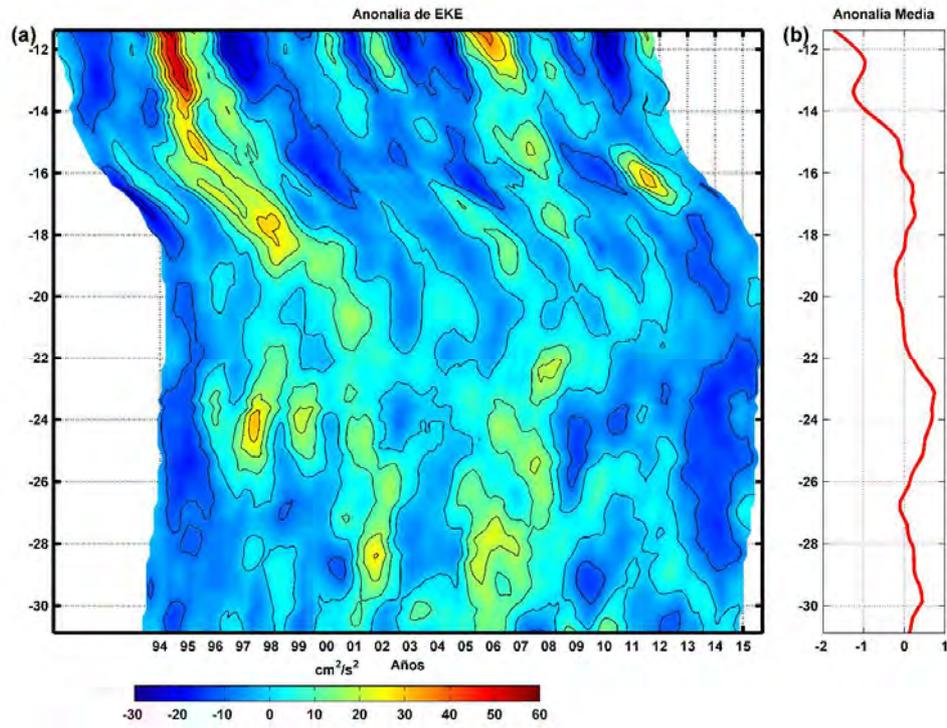


Figura 89. Diagrama de Hovmöller de las anomalías de EKE a lo largo de la costa (enero 1993 hasta julio 2015) para la región entre los 10°S-30°S de latitud.

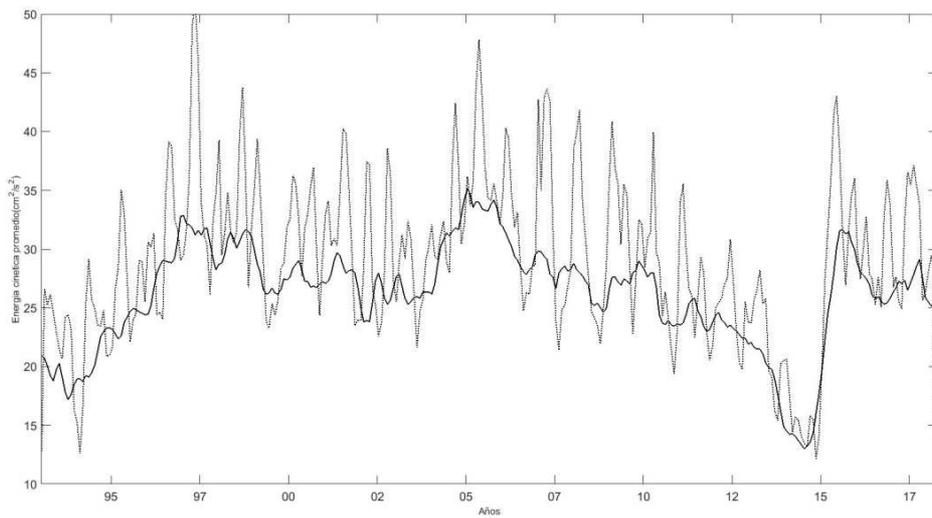


Figura 90. Evolución temporal promedio de la Energía Cinética de Remolinos (cm^2/s^2) de la banda entre los 18°S y 30°S entre 1992 y 2017.

6.4.7. Correlaciones cruzadas

En el análisis de los gráficos espacio-tiempo (diagramas de Hovmöller) se pudo observar que las variables TSM, Clorofila y EVS, mostraron áreas latitudinales con patrones muy marcados. Desde estos gráficos fue posible delimitar cuatro áreas principales muy definidas, a saber: 10°S-14°S, 14°S-16°S, 16°S-22° y 22° al sur, las cuales están asociadas en directa respuesta a la forma de la línea de costa. Los resultados de las correlaciones cruzadas entre estas variables verifican lo siguiente:

6.4.7.1. Correlación cruzada entre TSM y clorofila

Para el caso de la correlación cruzada entre la TSM y la clorofila, entre los 10°S y ~14°S se observó un coeficiente de correlación significativo ($>0,7$) (**Figura 90**), mientras que en la vecindad de las interfaces (~14°S y ~18°S) se observó claramente zonas de transición que evidencian un cambio drástico en los coeficiente de correlación. De igual forma, entre los 14°S y 18°S, el coeficiente de correlación entre ambas variables fue igualmente alto ($>0,7$), y en la zona de la curvatura de Chile-Perú las correlaciones fueron menores ($>0,5$).

Por su parte, la correlación cruzada entre el esfuerzo del viento superficial (EVS) y la TSM evidencia una relación inversa viento-temperatura. En la región centro-sur del Perú (entre 14°S y 16°S) el coeficiente de correlación fue alto (~ -1) indicando que a mayor intensidad del viento disminuye drásticamente la temperatura, reflejando probablemente una fuerte zona de surgencia. En cambio, en la zona de la curvatura de Chile-Perú (entre 18°S y 22°S) la correlación es baja, indicando que la baja ventilación implica la ausencia de aguas frías. Hacia el sur, el grado de correlación aumenta gradualmente verificando un alto grado de incidencia del viento sobre la TSM.

La correlación cruzada entre EVS y la clorofila muestra una alta correlación en el lag-0 ($\sim 0,8$) para la región central del Perú (entre los 10 y 14°S). Por el contrario, en la región centro-sur del Perú (entre los 14 y 16°S) estos parámetros se encuentran en fase opuesta con correlaciones de $\sim -0,5$. Por su parte, en el área de la curvatura de Chile-Perú se observa la inexistencia de correlación cruzada ($<0,2$) debido probablemente a que ambas variables son muy bajas en magnitud (viento y clorofila) en esta región.

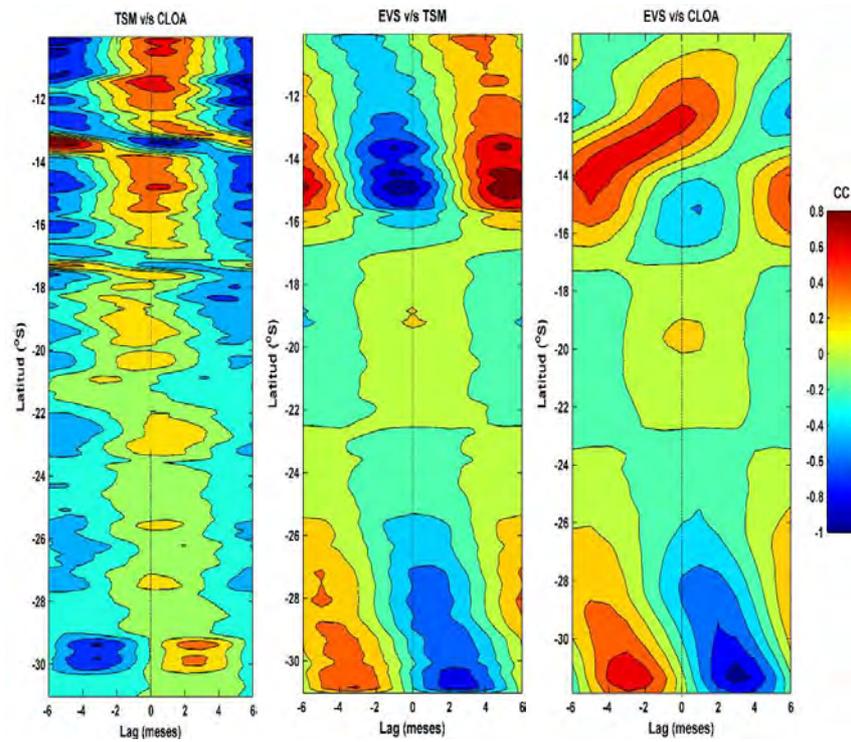


Figura 91. Correlación cruzada entre la TSM y la Clorofila, el EVS y la TSM, y el EVS y Clorofila.

6.4.7.2. Correlaciones cruzadas mediante Wavelet

Para los análisis de correlación cruzada mediante wavelet, se extrajo las series temporales de EVS con la TSM frente a la curvatura de Chile-Perú en la vecindad de los primeros 20 km, específicamente en los 19°S de latitud. La **Figura 92** muestra que la máxima potencia espectral ubica en el periodo de 12 meses, indicando claramente que ambas señales siguen un patrón estacional, además, de estar en fase durante todo el dominio temporal.

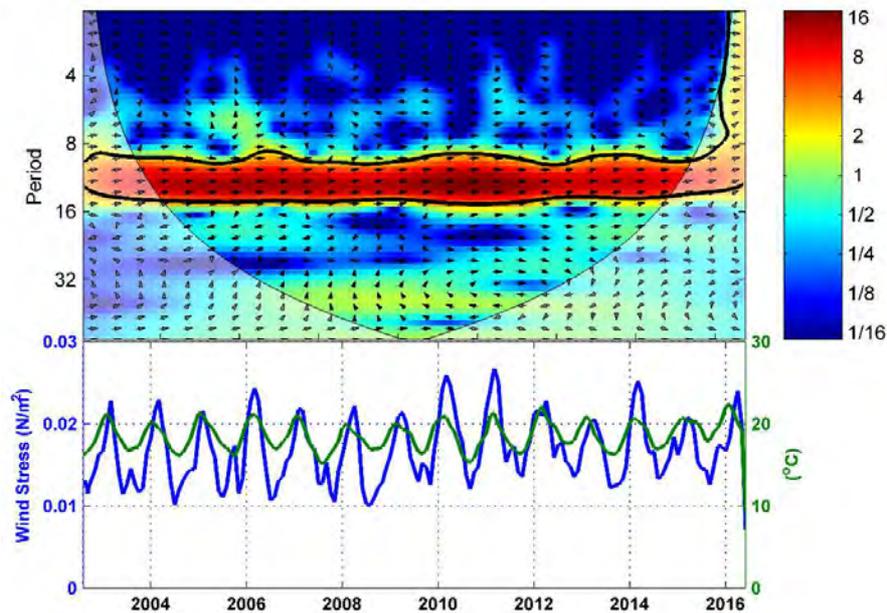


Figura 92. Correlación cruzada mediante wavelet entre las series temporales EVS y TSM.

6.4.8. Indicadores derivados del modelo hidrodinámico ROMS

Se obtuvieron las climatologías de las corrientes superficiales que provienen del Modelo Hidrodinámico (MH) ROMS2, el cual fue utilizado en la modelación biofísica para el presente proyecto. Las climatologías de las corrientes superficiales corresponden al promedio de estas variables en el periodo modelado 1994-2016. En líneas generales, las corrientes entregadas por el modelo ROMS2 exhiben la presencia del Sistema de Corrientes de Humboldt (SCH). Este tipo de sistemas son forzados por vientos con dirección hacia el ecuador y son dominados por procesos de surgencia en la región costera y una corriente sub-superficial hacia el polo (Hill *et al.* 1998). Además del bombeo de Ekman, en estas regiones domina la presencia de remolinos de meso-escala debido a inestabilidades baroclínicas (Leth & Shaffer, 2000, Leth & Middleton 2004, Marchesiello *et al.* 2003, 2004) y ondas atrapadas a la costa de origen ecuatorial (Brink 1982, Clarke 1983).

El SCH se extiende desde los 7°N hasta los 35°S, en tanto que durante el verano el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (ASPS) se desplaza hacia el sur, lo cual genera un aumento de la surgencia costera desde los 40°S hacia el ecuador. Durante los meses de diciembre-febrero y marzo el modelo ROMS2 (**Figura 93**) muestra este comportamiento,

donde la mayor intensidad (color rojo) se extiende desde el límite sur del dominio hacia el norte, destacando el mes de marzo con la mayor intensidad a lo largo de toda la costa. Por otro lado, durante el invierno el ASPS se desplaza hacia el ecuador debilitando los vientos en la parte centro-sur de Chile, sin embargo, el viento aumenta en la costa de Perú (Bakun & Nelson 1991), proceso que el modelo ROMS2 reproduce durante los meses de junio-agosto y septiembre, donde las intensidades de corriente son más bajas a lo largo de la costa chilena (**Figura 93**). El modelo ROMS2 logra reproducir la dinámica del SCH, no obstante muestra una prolongación de un mes tanto para la estación de verano (marzo) e invierno (septiembre). El modelo reproduce la surgencia permanente durante todo el año en las costas de Perú tal como lo describe Strub *et al.* (1998), y muestra el ciclo estacional de la surgencia en la costa de central de Chile, siendo más intensa (débil) en verano (invierno).

Este sistema de alta velocidad y componente norte registrado para las corrientes superficiales en el extremo costero constituye una de los principales mecanismos de transporte de huevos y larvas manifestado por el modelo biofísico. Las matrices de conectividad han evidenciado importantes niveles de conectividad entre la zona de desove y la región costera y oceánica adyacente del sur de Perú. Al mismo tiempo, las matrices de conectividad evidenciaron una ausente o excepcional conectividad entre el área de desove evaluada al norte de los 26°S y la región contigua al sur (regiones de Atacama y Coquimbo), sugiriendo que estas corrientes superficiales promoverían un mecanismo oceanográfico para el auto-reclutamiento en la zona norte de Chile y aporte de reclutas hacia el sur de Perú, limitando los aportes hacia el sur.

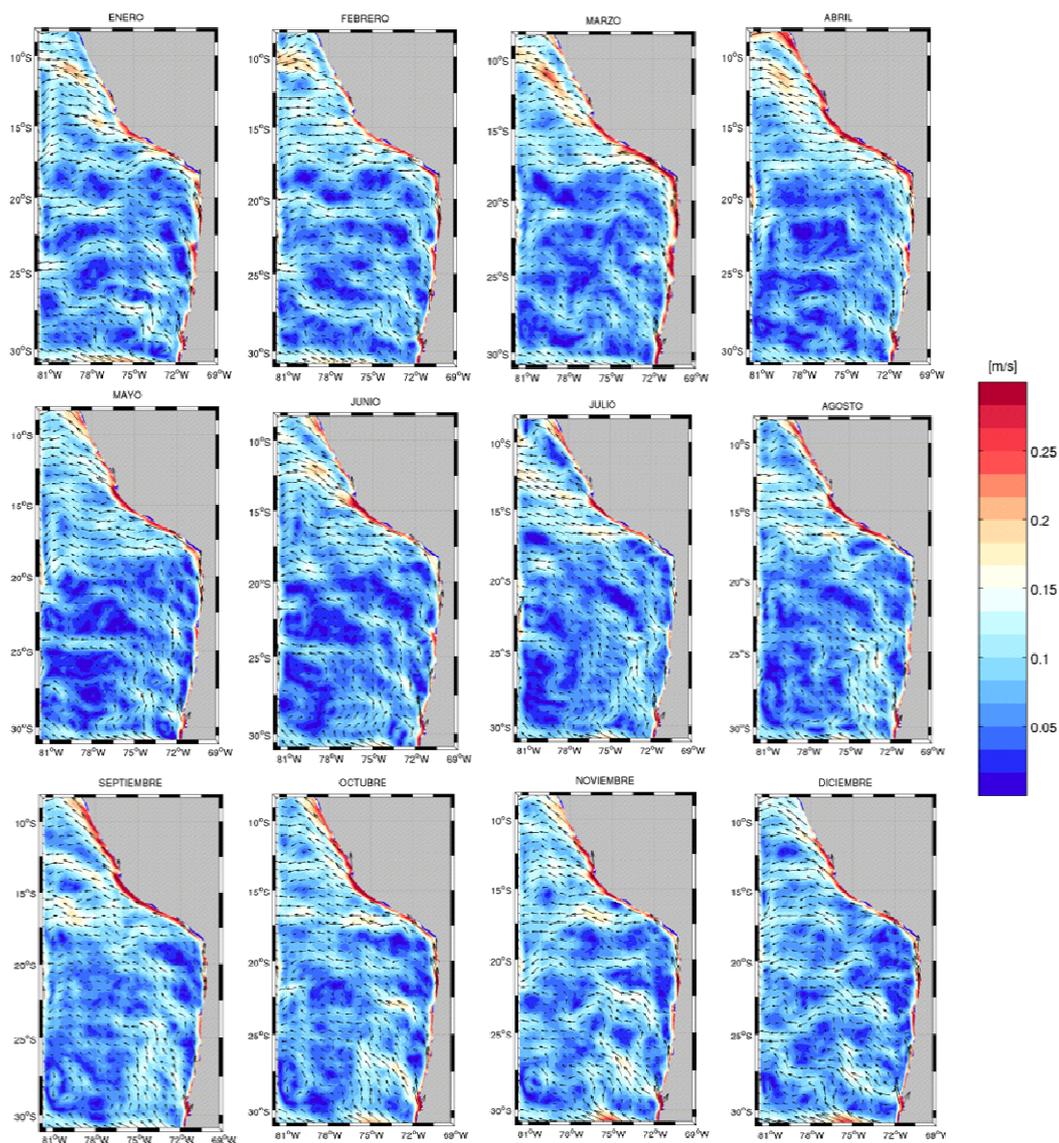


Figura 93. Corriente superficial modelo ROMS2 promedio mensual.

6.4.8.1. Dinámica de corrientes verticales

A lo largo de la costa centro de Chile se identifican cuatro corrientes principales. La primera corresponde a una corriente superficial llamada Corriente Costera de Chile (CCC) con dirección al ecuador, se ubica entre los primeros 100 metros de profundidad y predomina a lo largo de la costa chilena y peruana, cubriendo una franja de 100 km desde la costa hacia el oeste, esta corriente pertenece al sistema de surgencia (Conejero, 2013). El modelo ROMS2 logra reproducir esta corriente tal como se observa en los cortes verticales

para los promedios mensuales de la corriente meridional a las latitudes de 14°S, 18°S, 22°S y 26°S (**Figuras 94 a 97**). El modelo reproduce la CCC con valores positivos hacia el ecuador, en los primeros 100 km pegados a la costa, con una profundidad menor a los 100 metros. Los cortes para las siguientes latitudes sugieren que hacia el sur el modelo muestra una CCC más intensa y extensa (mar afuera), a diferencia de lo que sucede en la parte norte, donde está más restringida espacialmente.

La Corriente Subsuperficial Perú-Chile (CSPC), localizada justo por debajo de la CCC sobre la plataforma continental, alcanza una profundidad aproximada de 200-700 metros. Presenta una dirección hacia el polo y comienza en la costa de Perú alcanzado los 40°S. La intensidad de esta corriente es menor a la CCC, promediando valores de 0,1 m/s (Huyer *et al.* 1991, Shaffer *et al.* 1999). Estas aguas se caracterizan por bajos niveles de oxígeno, altos contenidos de nutrientes y relativa alta salinidad (Silva & Neshyba 1979). El modelo ROMS2 es capaz de reproducir esta corriente en todas las secciones verticales a las diferentes latitudes (**Figuras 94 a 97**). El modelo muestra intensidades de corriente en torno a los 0,1 m/s, lo cual está en concordancia a lo descrito anteriormente. Así mismo, se aprecia un ensanchamiento de la CSPC a medida que este flujo se mueve hacia la zona central de Chile, al comparar los cortes a los 14°S (**Figura 94**) y a los 26°S (**Figura 97**) se nota un aumento en el área que abarca la CSPC.

La Contra-Corriente Perú-Chile (CCPC), con una dirección hacia el polo, comienza desde los 7°S hasta los 35°S-40°S. Se ubica hacia el oeste de la CCC ocupando una franja entre los 100-300 km de la costa (Conejero 2013). Su máxima intensidad se registra en primavera (Septiembre-Noviembre) y la mínima en otoño (Marzo-Mayo) (Strub *et al.* 1995). El modelo ROMS2 reproduce en menor grado esta corriente; sin embargo, en los cortes de la latitud 22°S y 26°S (**Figura 96 y Figura 97**) se aprecia el aumento de la CCPC en el mes de Agosto, permaneciendo durante primavera (Septiembre-Noviembre) hasta el mes de Diciembre con un extensión hacia el oeste de 300 km aproximadamente.

Por último, la Corriente Chile-Perú (CCP) también conocida como Corriente de Humboldt, con dirección hacia el ecuador, es una corriente más bien oceánica distante a unos 500 km

de la costa. Verticalmente se extiende desde la superficie hasta los 700 metros de profundidad. Muestra una intensidad baja (promedio 0,06 m/s) (Chaigneau & Pizarro 2005). En el modelo ROMS2 esta corriente se aprecia en la sección vertical para la latitud 26°S fortaleciéndose entre los meses de Mayo y Noviembre: Así mismo la intensidad que entrega el modelo es consistente con lo reseñado en la literatura. El modelo para los 22°S muestra la CCP fortalecida en los meses de Agosto-Octubre, sin embargo para los restantes meses esta corriente se acerca hacia la costa, dificultando su identificación. En la sección a los 18°S (**Figura 95**) la CCP se identifica en los meses de Octubre-Diciembre, sin embargo, para la sección de latitud 12°S es difícil detectarla.

Por su parte, la **Figura 98** muestra la distribución espacio-tiempo de la temperatura del mar modelada (ROMS) para estaciones situadas en la región costera (<20 mn) para las latitudes de 18°30'S, 21°S y 23°S, las cuales han sido seleccionadas por representar áreas de desove permanentes de anchoveta en el norte de Chile, según los resultados del modelo biofísico (este estudio). El análisis consideró información mensual entre los años 1994 y 2017, verificando por una parte, una clara variación estacional con aguas superficiales (0-50 m) más cálidas (20-21°C) en el período estival y más frías (16°C) durante el invierno. La expresión de la variación estacional alcanza en general los 50 metros de profundidad.

Asimismo, la temperatura modelada rescata de buena forma la variabilidad interanual cálida El Niño, especialmente al evento 1997-1998, evidenciado una profundización hasta más de 150 metros de la termoclina (y de la mínima de oxígeno acoplada a la isoterma de 15°C), así como la presencia de aguas más cálidas (+ 3°C) en superficie, lo que posibilita pensar un impacto en la región de desove de anchoveta en estos sectores. La distribución espacio-temporal de la temperatura del mar modelada rescata bien el debilitamiento de la señal anómala ecuatorial hacia latitudes más altas en la región de estudio.

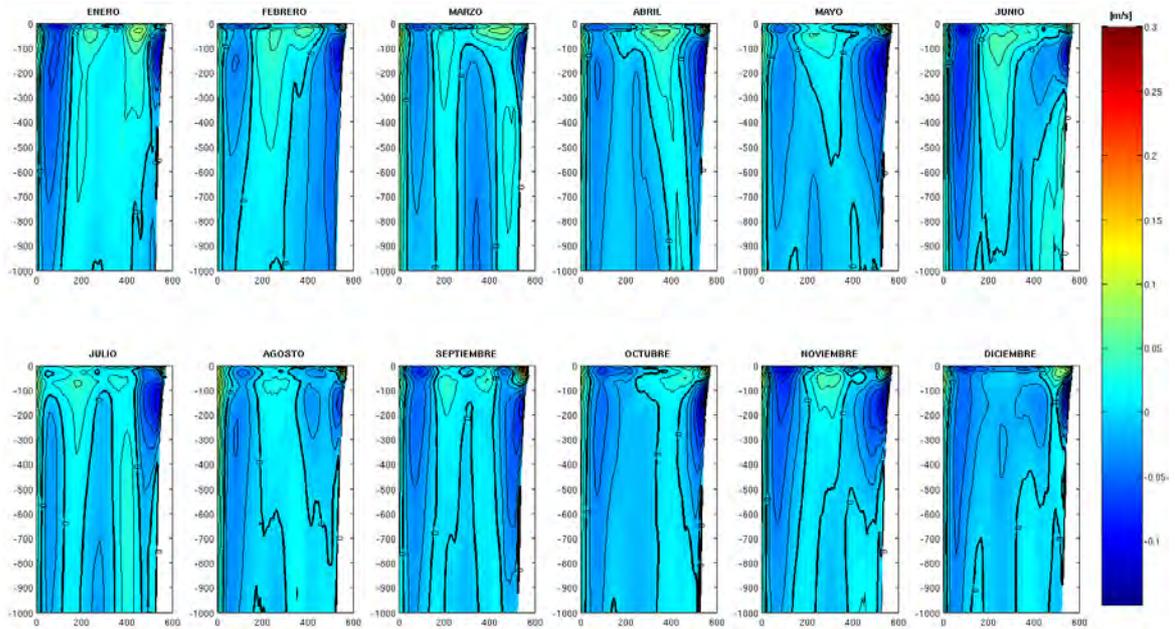


Figura 94. Sección vertical corriente meridional promedio mensual, latitud 14°S.

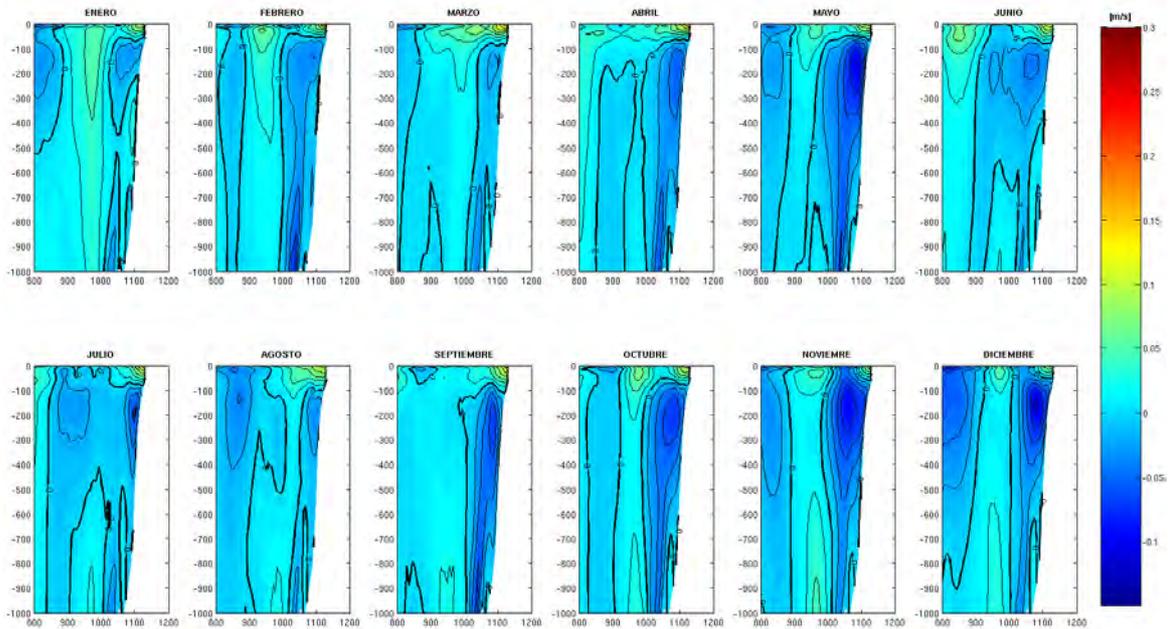


Figura 95. Sección vertical corriente meridional promedio mensual, latitud 18°S.

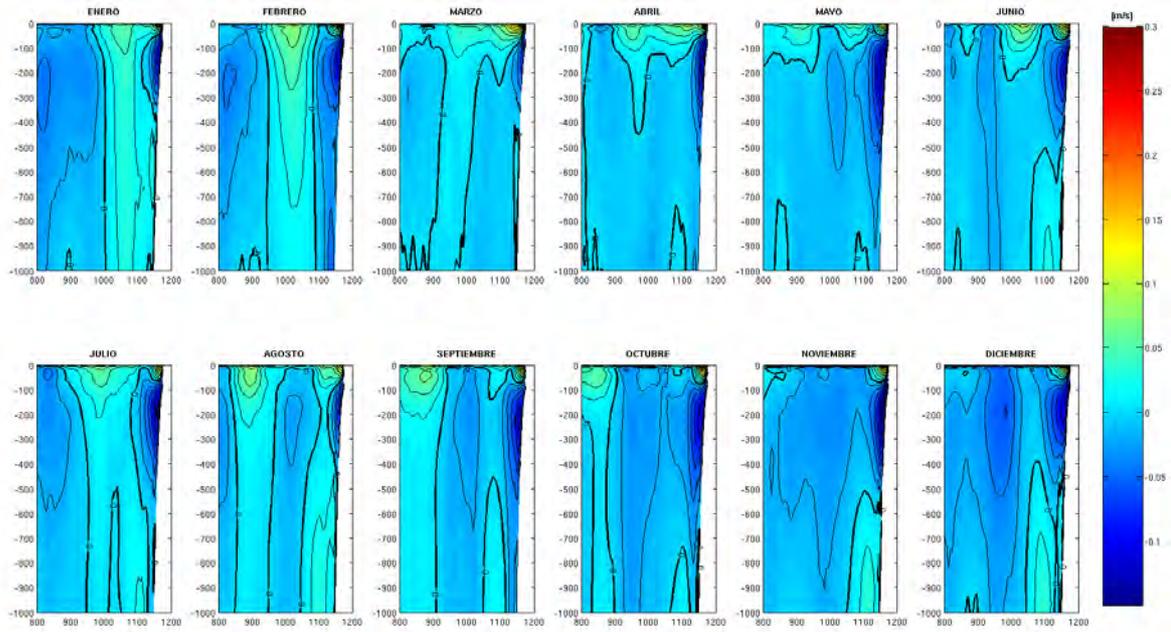


Figura 96. Sección vertical corriente meridional promedio mensual, latitud 22°S.

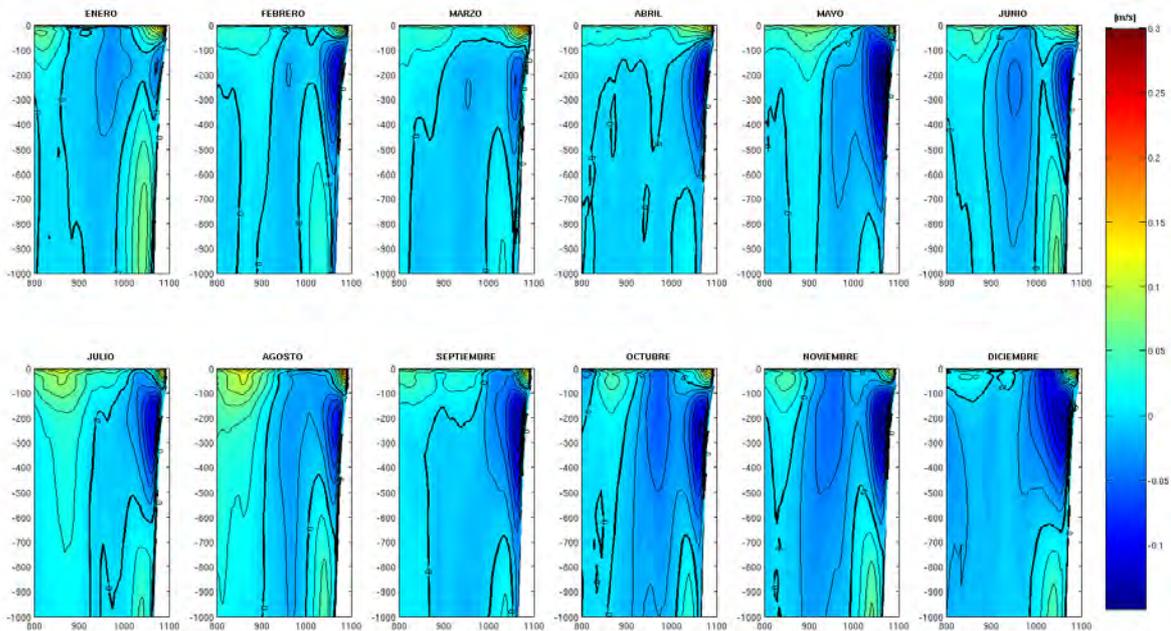


Figura 97. Sección vertical corriente meridional promedio mensual, latitud 26°S.

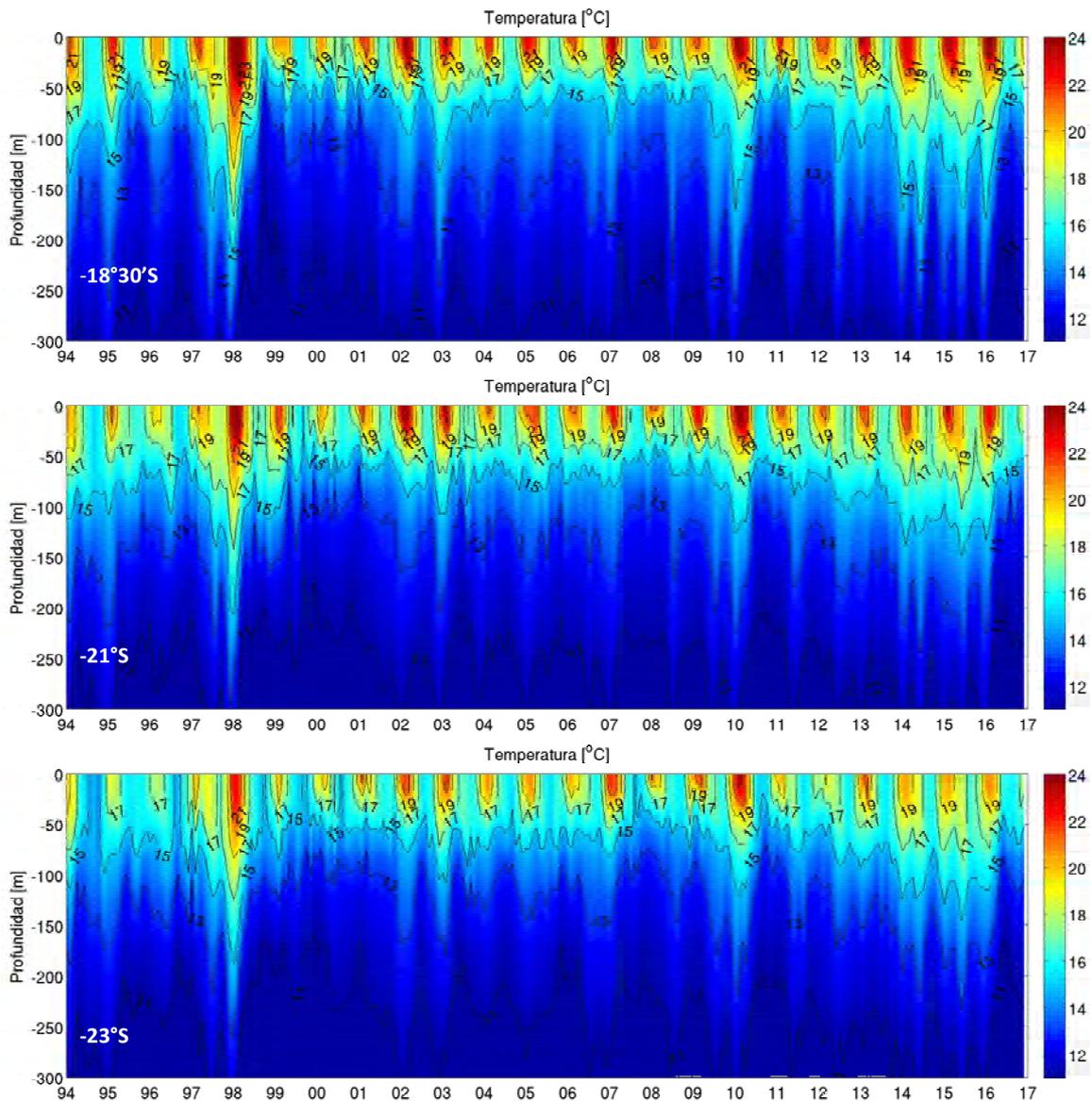


Figura 98. Gráfica de espacio-tiempo (Diagrama Hovmöller) para la temperatura del mar modelada (°C) para estaciones situadas en la región costera (<20 mm) a las latitudes de 18°30'S, 21°S y 23°S, donde se verifican áreas de desove permanentes de anchoveta.

6.5. Identificación de zonas de crianza/reclutamiento

Una de las características principales del esquema de modelación biofísica que sustenta a este estudio, es la capacidad de generación de indicadores espacialmente explícitos hacia el pre-reclutamiento. Estos indicadores espaciales permiten analizar cambios en los patrones dependiendo de las condiciones oceanográficas así como generan una herramienta de contraste respecto a observaciones directas de la estructura espacial de la fracción recluta.

6.5.1. Índice de pre-reclutamiento espacial y patrón de transporte

Una vez realizadas simulaciones del proceso de transporte y sobrevivencia de estadios tempranos de desarrollo de anchoveta originados a partir de zonas y pulsos realistas de desove, se cuantificó espacialmente la distribución de individuos que alcanzaron una edad de 60 días y que estuvieron restringidos al sector costero al interior del área de crianza (ver sección 5.4.2. *Definición de área de crianza*). La **Figura 99** muestra los indicadores espaciales de pre-reclutamiento biofísico para cada año modelado a partir de las temporadas de desove del periodo 1995-2016. No obstante existe un alto nivel de variabilidad interanual, un rasgo característico y repetitivo es la mayor densidad de individuos conectados y retenidos entre los 16° y 24°S (Punta de Lobos, Perú y sur de Antofagasta, Chile). De esta manera, se establece que la fracción del área de desove ubicada en el norte de Chile no solo funciona como fuente de pre-reclutas para el sector costero del norte de Chile, sino que a través del transporte de huevos y larvas puede aportar con individuos pre-reclutas hacia el sector costero del centro-sur de Perú. La extensión meridional de la dispersión de la anchoveta manifiesta variabilidad interanual, con años donde el proceso tiene una mayor extensión hacia el sur como los años 1997, 1998, 2000, 2005, 2006, 2012, 2014 y 2015 con los años de influencia ecuatorial El Niño en fase positiva siendo los más extremos (**Figura 99**). Por otra parte, existen años donde el proceso de dispersión es más acotado con conexión preferentemente al norte, pero con una amplitud menor, como es el caso de los años 1996, 2003, 2007, 2013 y 2016 (**Figura 99**). La distribución simulada de pre-reclutas de anchoveta evidencia que el proceso de conectividad desde la zona de desove situada en el norte de Chile extiende el área de crianza mayormente hacia el norte, y eventualmente hacia el sur bajo condiciones menos frecuentes. Además, los patrones de distribución espacial sugieren que el área entre Arica y Antofagasta constituyen áreas de crianza donde existe una mayor probabilidad de agregación de individuos pre-reclutas de anchoveta, siendo un área de retención de acuerdo a los resultados relacionados con los forzantes físicos hacia el proceso de transporte.

La dinámica oceanográfica evidencia que el área de desove de la anchoveta en el norte de Chile es una área que cumple con las características para constituir áreas de crianza, pudiendo esta extenderse más costa-afuera y preferentemente hacia el norte. La baja

dinámica de vientos, la presencia de estructuras de mesoescala estacionarias (remolinos) y los frentes de densidad producto de la temperatura, generan un escenario propicio para el crecimiento de larvas, post-larvas y juveniles de anchoveta, y consecuentemente para sustentar el reclutamiento posterior. Además, durante la época de desove esta zona se caracteriza por tener temperaturas comparativamente más altas que las zonas inmediatas situadas al sur y al norte, propiciando el crecimiento más rápido de estadios tempranos de desarrollo, lo que sumado a la extensión del área de productividad, genera condiciones aptas para formación de primeros cardúmenes de anchoveta.

La **Figura 100** muestra la distribución espacial de la flota que opera sobre anchoveta en la zona norte de Chile desde una perspectiva interanual, en donde se observa que los principales centros de actividad costera coinciden con las áreas de máxima retención de estadios tempranos. Por otro lado, la actividad pesquera muestra una operación que se extiende hasta el límite norte del mar territorial chileno, extendiéndose al norte por la costa hacia mar peruano, lo que coincide con lo proyectado por la modelación biofísica respecto a la extensión meridional. Por otra parte, la distribución zonal muestra importantes niveles de variabilidad mostrando periodos de distribución preferentemente costera (e.g. 2015, 2016), lo cual puede estar relacionado con una restricción de las condiciones favorables para la distribución de la fracción adulta de anchoveta, más que por el proceso de dispersión de huevos y larvas. La conexión entre los procesos de desove, reclutamiento larval y la formación de agregaciones de cardúmenes tempranos es un proceso relevante que constituye un desafío hacia el entendimiento de los factores que desatan los cambios en la distribución espacial de la fracción adulta.

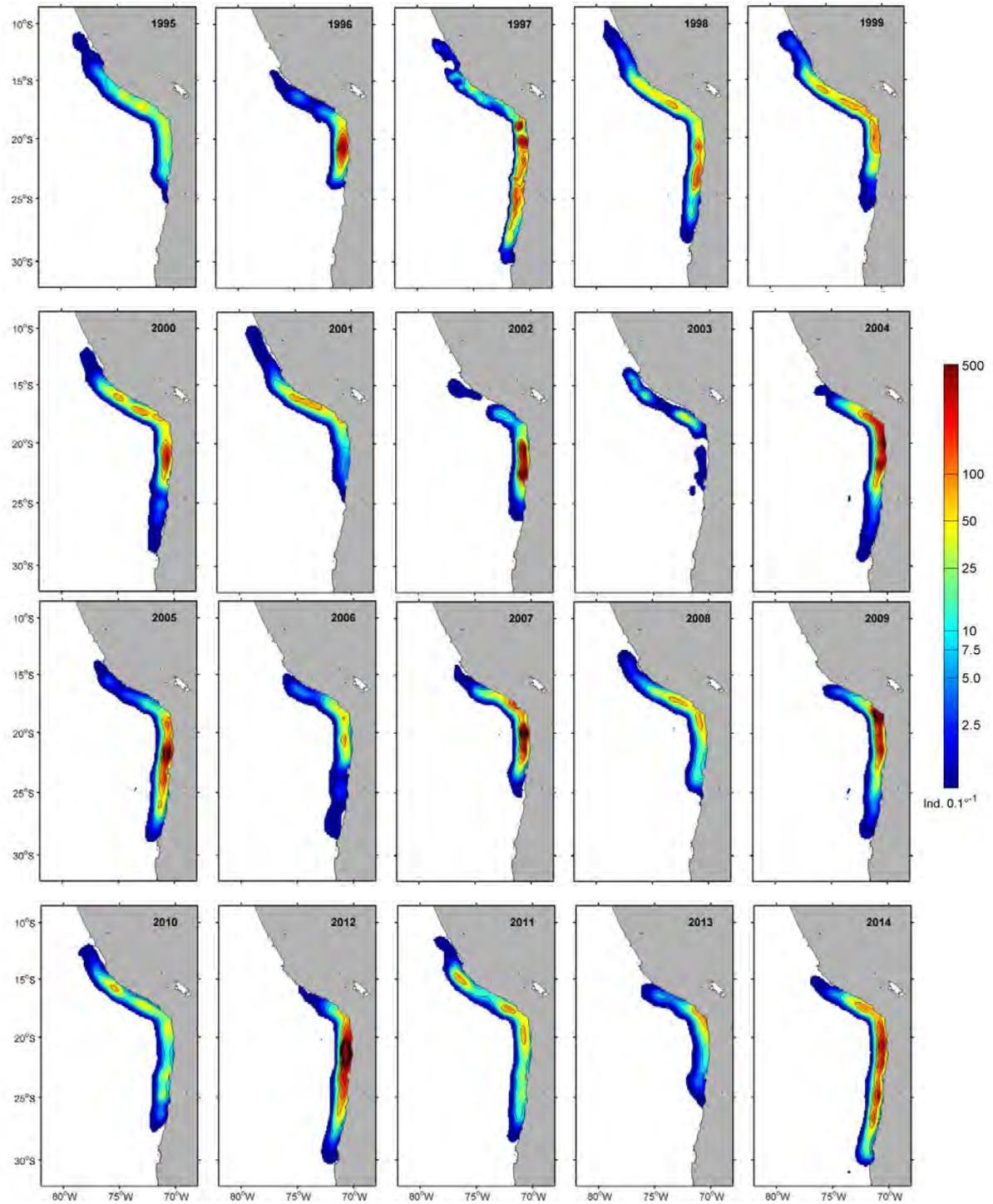


Figura 99. Distribución espacial de anchovetas de 60 días de edad simulada mediante modelación biofísica para el periodo 1995-2016.

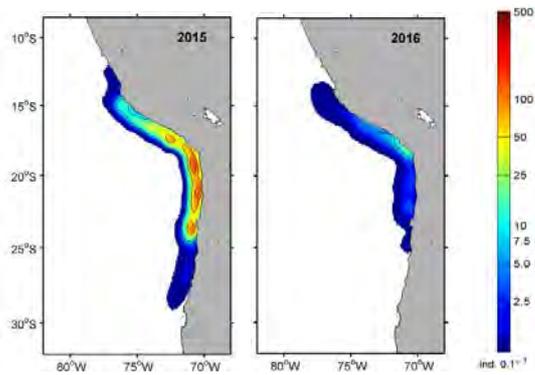


Figura 99 (continuación...). Distribución espacial de anchovetas de 60 días de edad simulada mediante modelación biofísica para el periodo 1995-2016.

Considerando la extensión latitudinal de la expresión del desove (ver **Figura 24**) y la expresión espacial del pre-reclutamiento (**Figura 99**), uno de los aspectos relevantes es conocer los patrones de conectividad entre las distintas localidades donde existe desove y las potenciales áreas de crianza de anchoveta. La **Figura 101** muestra el resultado de las matrices de dispersión (conectividad) que muestra la densidad de organismos reclutados por cuadrante (ver **Figura 7**) respecto al área global de liberación correspondiente al área de desove anual. Para un mejor entendimiento de estos resultados diagramas, es válido señalar que el análisis considera la cuantificación porcentual del número de individuos que se distribuyen al interior de cada cuadrante al alcanzar los 60 días de edad (edad de pre-reclutamiento). De esta manera, se establece la relación "fuente-sumidero" que en organismos pelágicos considera como fuente la zona de desove y como sumidero todas las posibles áreas de crianza. En este análisis se ha extendido el análisis a zonas que están fuera de las áreas de crianza para entender los patrones de dispersión de anchoveta y relacionarlo con los principales rasgos oceanográficos y biológicos que determinan los patrones de transporte de estadios tempranos de anchoveta.

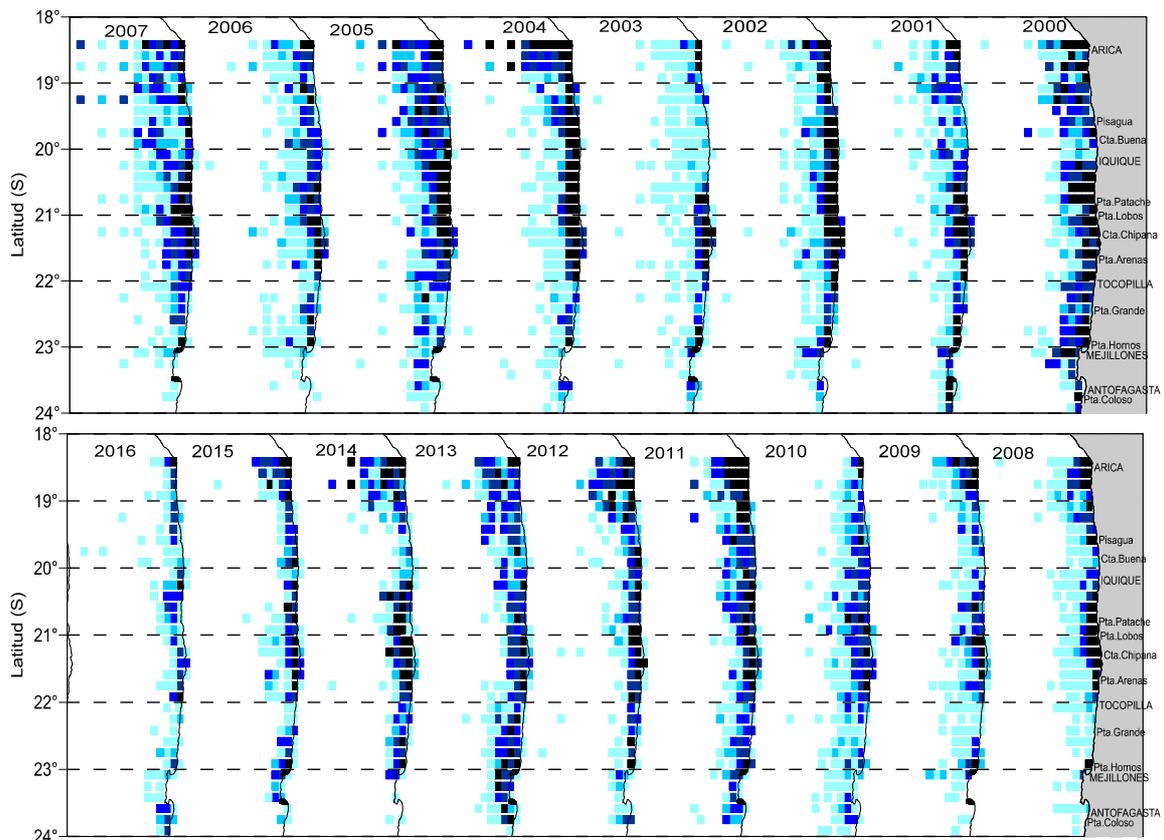
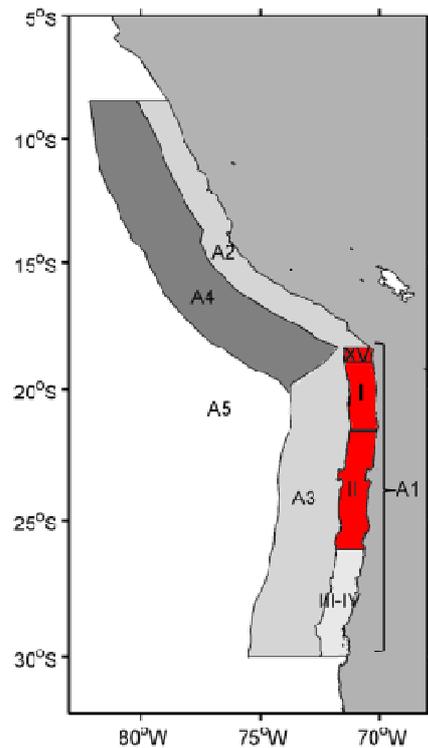


Figura 100. Distribución espacial de las capturas comerciales anuales de anchoveta en la zona norte de Chile, período 2000-2016 (fuente: Böhm *et al.*, 2017).

La Tabla VII resume las interacciones entre el área de desove de anchoveta y los distintos cuadrantes evaluados. En general, se observa una marcada variabilidad interanual en los procesos advectivos que promueven las vías de transporte de huevos y larvas de anchoveta. Primero, la conectividad con la celda A1 que indica el nivel de retención o auto-reclutamiento dentro de la fracción de la zona de crianza distribuida en la costa del norte de Chile, evidencia un nivel medio de conectividad de $26,9 \pm 17,3\%$ evidenciando una alta variabilidad en el nivel de retención con años extremos positivos en 2002, 2005 y 2012 (66,1, 50,1 y 59,2% respectivamente) y negativos en 2001, 2003 y 2016 (4,7, 1,4 y 9,7% respectivamente). De esta manera, el área del norte de Chile se constituye como una región con niveles altos, pero variables de retención costera lo que está directamente relacionado con la capacidad del sistema de sustentar niveles de reclutamientos que permita el establecimiento de unidades poblacionales auto-sustentadas.

Tabla VII. Matriz de conectividad para el área de desove de anchoveta para el periodo 1995-2016. En rojo destacan las interacciones que sobrepasan el 50% de conexión. El diagrama a la derecha muestra los cuadrantes considerados y destaca en rojo la región fuente (desove).

Año/Área	A1	A2	A3	A4	A5
1995	19.3	12.0	21.1	35.4	12.2
1996	36.7	1.5	52.2	5.3	4.3
1997	29.2	7.1	35.0	13.4	15.3
1998	14.7	8.8	28.5	19.5	28.5
1999	12.7	9.9	15.6	38.5	23.3
2000	24.1	12.9	24.9	28.0	10.1
2001	4.7	18.0	3.0	63.0	11.2
2002	66.1	5.3	9.5	13.6	5.5
2003	1.4	5.1	4.0	80.1	9.4
2004	38.1	10.3	26.0	8.0	17.6
2005	50.1	1.9	26.1	9.0	12.8
2006	21.8	3.7	66.6	2.5	5.5
2007	35.8	6.2	17.7	29.2	11.0
2008	10.4	10.2	6.3	25.1	48.0
2009	39.6	10.6	36.4	6.5	6.9
2010	12.5	9.6	19.4	32.4	26.2
2011	11.4	15.7	25.0	32.0	15.9
2012	59.2	2.2	25.8	4.3	8.5
2013	27.6	7.0	30.6	8.9	25.9
2014	38.0	6.5	36.9	12.7	5.9
2015	29.0	9.2	28.3	23.0	10.5
2016	9.7	5.5	2.5	55.9	26.5



Al mismo tiempo, la evaluación de la conectividad respecto del área oceánica adyacente al área de crianza costera (cuadrante A3) sugiere que la dinámica del sector tiene niveles importantes interacción zonal (este-oeste) donde la advección costa afuera resulta un modulador de los niveles de retención. De esta manera la conexión con el cuadrante A3 tuvo un nivel medio de $24,6 \pm 16,6\%$ con niveles extremos en los años 1996 y 2006 con 52,2 y 66,6% respectivamente. Estos niveles de conectividad con el cuadrante A3 incrementan la importancia del criterio para la consideración el límite occidental del área de crianza hacia el establecimiento de niveles de sobrevivencia y el indicador de reclutamiento biofísico. La sensibilización del efecto de la ubicación zonal del límite del área de crianza

hacia los indicadores biofísicos debiese ser explorada en sucesivas investigaciones de modelación.

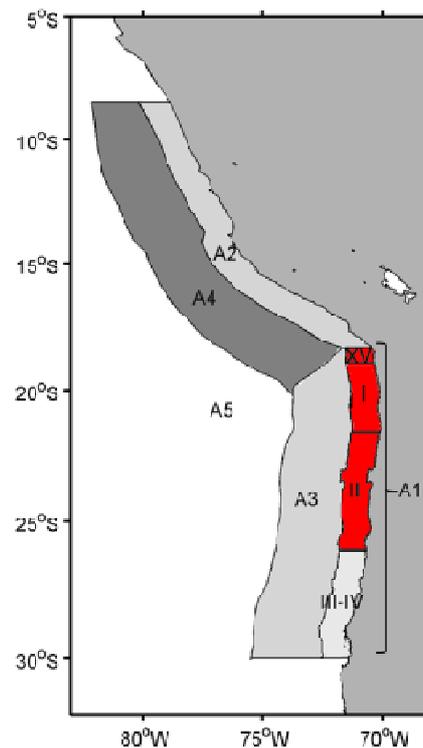
Por otra parte, considerando la naturaleza transzonal del área de distribución y del área de desove de anchoveta, las cuales se extienden entre el sur de Perú y el norte de Chile (donde se distribuye la mayor superficie de ambas áreas), un objetivo relevante es conocer la interacción de la fracción del área de desove de Chile con el sector costero y oceánico situado en el mar de Perú. De esta manera, el cuadrante A2 corresponde al área de crianza situada en Perú, donde los niveles de conectividad tuvieron un nivel medio de $8,2 \pm 4,3\%$ con un rango entre 1,5 y 18% sugiriendo que el área de desove del norte de Chile tiene niveles de interacción con el sector costero del sur de Perú estableciendo una dinámica que permite el aporte de individuos pre-reclutas originados en Chile hacia la zona de crianza de Perú. Al mismo tiempo la evaluación de la interacción con la región oceánica inmediata a la zona de crianza en Perú (cuadrante A4), confirma la importancia de la dinámica norte y noreste evidenciada por el análisis de circulación de corrientes costeras. Los niveles de conexión con el cuadrante A4 revelan un sistema permanentemente conectados través de los años, pero con altos niveles de variabilidad evidenciados por un nivel medio de $24,8\% \pm 20,4\%$ con años de muy altos niveles de importancia en estas rutas de transporte como lo son el 2001, 2003 y 2016 con niveles de conectividad de 63,0, 80,1 y 55,9% respectivamente. Finalmente, el cuadrante A5 lo constituyen pérdidas advectivas más allá de las 200 millas náuticas con niveles medios de $15,5 \pm 10,5\%$.

Considerando la naturaleza espacialmente explícita de los resultados de la modelación biofísica, es posible explorar distintas escalas de conectividad. De esta manera, se evaluó la distribución porcentual por región administrativa de los individuos conectados con el área de crianza del sector costero del centro-norte de Chile (regiones XV, I, II y en conjunto la III y IV). La Tabla VIII resume los resultados de esta aproximación denotando que en promedio la XV región das cuenta del $14,5 \pm 15,9\%$ (rango de 1,5 - 71,4%) de agregación de individuos con un extremo en el año 2016 que coincide con una distribución extremadamente norteña del desove. Lo anterior resulta relevante, considerando que, proporcionalmente, la región de Arica y Parinacota constituye la menor superficie costera

de todas las evaluadas. Por su parte, la región de Tarapacá (I región) contribuyó con una retención media de $51,0 \pm 19,6\%$ (rango de 2,9 - 86,4%) de los individuos reclutados en el área de crianza de Chile constituyéndose como una zona principal de distribución de pre-reclutas de anchoveta en el norte de Chile. Luego, la región de Antofagasta (II región) evidenció un nivel medio de $34,1 \pm 18,3\%$ (rango de 5,4 a 76,4%) siendo en promedio la segunda región en la distribución espacial de pre-reclutas modelados de anchoveta. Finalmente, se evaluó el nivel de conectividad de la zona de desove de la zona norte de Chile respecto a las regiones distribuidas inmediatamente al sur (regiones de Atacama y Coquimbo, III y IV) para evaluar si esta zona de desove podría funcionar como fuente de individuos reclutas hacia la unidad poblacional identificada en estas regiones. Los resultados son concluyentes en relación al nivel de conectividad de la zona de desove del norte de Chile hacia el sur. Como norma, la conectividad con esta región es extremadamente baja a nula y sólo se genera en niveles sobre el 1% en años excepcionales como 1997, 1998, 2005, 2010, 2011, 2012 y 2014 (11,2, 1,9, 1,1, 2,8, 2,7, 2,9 y 20,6%) respectivamente, pareciendo ser los años con anomalías El Niño extremas los que generan una mayor extensión hacia el sur. Sin embargo, los niveles de conectividad hacia estas regiones no serían relevantes para que la zona de desove entre la XV y II regiones (evaluada en este estudio) se constituya como subsidiario de pre-reclutas hacia las regiones III y IV.

Tabla VIII. Matriz de conectividad para el área de desove de anchoveta en cada año para el periodo 1995-2016 considerando la distribución regional en el centro norte de Chile. En rojo destacan las interacciones que sobrepasan el 50% de conexión. El diagrama a la derecha muestra los cuadrantes considerados y destaca en rojo la región fuente (desove).

Año/Región	XV	I	II	III-IV
1995	4.0	38.4	57.5	0.0
1996	2.9	77.5	19.6	0.0
1997	7.5	35.3	46.0	11.2
1998	3.5	43.7	50.8	1.9
1999	8.3	71.1	20.7	0.0
2000	3.6	65.1	30.2	1.1
2001	23.6	44.7	31.7	0.0
2002	6.5	51.7	41.8	0.0
2003	20.7	2.9	76.4	0.0
2004	11.4	63.1	25.1	0.4
2005	2.6	39.7	54.9	2.8
2006	6.5	86.4	6.6	0.5
2007	9.9	77.0	13.1	0.0
2008	15.0	48.4	36.6	0.0
2009	34.9	49.3	15.4	0.4
20010	18.1	28.0	52.4	1.5
2011	23.8	46.9	26.5	2.7
2012	1.5	48.2	47.4	2.9
2013	29.6	52.1	18.4	0.0
2014	3.3	33.0	43.1	20.6
2015	9.9	60.0	29.6	0.6
2016	71.4	23.2	5.4	0.0



6.5.2. Análisis de sensibilidad para la identificación de forzantes biofísicos

El análisis de sensibilidad realizado mediante GLM fue utilizado para evaluar los efectos de factores independientes en el éxito del pre-reclutamiento de anchoveta. Considerando los resultados de las matrices de conectividad y de los forzantes oceanográficos que indicaron que el extremo norte de en el modelo biofísico está mayormente conectado con mar peruano, el análisis estadístico para la identificación de identificación de forzantes se realizó desde dos perspectivas que permitieron analizar en general todos los factores identificados y en particular el efecto zona: i) análisis de sensibilidad estadística donde se consideraron exitosamente reclutados los individuos conectados con el **área de crianza de**

Chile y Perú, y las zonas de origen discretizadas por región administrativa (XV, I y II regiones); y ii) análisis de sensibilidad estadística donde se consideraron exitosamente reclutados los individuos conectados solamente con el **área de crianza de Chile**, y las zonas de origen discretizadas por región administrativa (XV, I y II regiones). De esta manera se testeó la hipótesis de efecto zona en los patrones de pre-reclutamiento biofísico.

El primer caso de análisis resultó estadísticamente significativo ($p\text{-value} < 0,001$) para todos los factores analizados, y evidenció que las condiciones iniciales (año de liberación, zona de liberación, mes de liberación, distancia de la costa de liberación y profundidad de liberación) explicaron aproximadamente el 33% del éxito individual del reclutamiento (Tabla IX). El año, mes y zona de liberación tuvieron un efecto importante en el éxito individual del reclutamiento, seguido por la distancia de la costa y finalmente la profundidad en la que se genera el desove. El efecto año respaldó el patrón temporal ya descrito anteriormente, el cual muestra que el éxito del reclutamiento tiene una alta variabilidad interanual altamente dependiente del ambiente y poco predecible de acuerdo a las condiciones del desove.

La **Figura 101** muestra el efecto sobre el reclutamiento individual de todos los factores estadísticamente significativos. El efecto zona resultó significativo e informativo, revelando que bajo la hipótesis de zona de crianza conjunta los desoves que ocurren en la zona 1 (región XV) tuvieron un efecto mayor sobre el éxito de reclutamiento seguida por la zona 2 (I región) y luego la zona 3 (II región), evidenciando que las tres zonas contribuyen de manera relevante hacia los indicadores espacio temporales de pre-reclutamiento del stock conjunto Chile Perú. El factor mes evidenció importantes diferencias entre los estratos evaluados, con una tendencia que decae a medida que los desoves se realizaron hacia finales del año. De esta manera, desoves efectuados en época invernal (mayo-agosto) tienen una mayor probabilidad de aportar al reclutamiento individual respecto a los que se realizan hacia finales de año, lo que resulta interesante pues la sincronización el desove es un rasgo que muestra variabilidad interanual, pero una estrategia de desove centrado en invierno, como ha sido demostrado en este estudio (ver punto 6.2.2.) lo que podría responder a una estrategia evolutiva desarrollada por la especie para maximizar la retención costera y la

sobrevivencia de la progenie. La distancia de la costa en la que se realizaron los desoves mostró un patrón estrechamente relacionado con el patrón de corrientes analizado (ver **Figura 50**) donde los individuos que son desovados más cerca de la costa tienen mayor probabilidad de ser retenidos y aportar al pre-reclutamiento, mientras que los desoves realizados más allá de 90 km de distancia de la costa tienden a ser advectados en mayor medida por las corrientes que se mueven en dirección oeste.

Tabla IX. Estadísticas para el modelo lineal generalizado parsimonioso aplicado a los resultados de la modelación biofísica para la variable dependiente reclutamiento respecto a las condiciones iniciales de desove considerando área conjunta de crianza Perú Chile.

Model GLM: Reclutamiento ~ Año + Zona + Mes + Profundidad + Profundidad + Dist.Costa, family = binomial(link = "logit")							
Model deviance explained: 32.60%							
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Exp. Var.	
Año liberación	21	301128	14339	8.83E+04	<2e-16	20.59	***
Zona liberación	2	93544	6772	4.17E+04	<2e-16	6.40	***
Mes liberación	6	65643	5941	3.66E+04	<2e-16	4.49	***
Profundidad de liberación	10	24	2	1.47E+01	<2e-16	0.00	***
Distancia de la costa liberación	7	16417	2345	1.44E+04	<2e-16	1.12	***
Residuals		985738	0				

Sign. Codes: *** p<0.001

El segundo caso de análisis que considera sólo la fracción de área de crianza de Chile resultó estadísticamente significativo (p -value < 0,001) para todos los factores analizados, y evidenció que las condiciones iniciales explicaron un porcentaje similar de varianza (34%) del éxito individual del reclutamiento (Tabla X). Bajo esta hipótesis, el año, mes y distancia de la costa de liberación tuvieron un efecto importante en el éxito individual del reclutamiento que no varió en su forma respecto al caso anterior, mientras que el efecto año respaldó el patrón temporal ya descrito anteriormente. Sin embargo, al analizar el factor zona, se observa un efecto muy disímil respecto al caso anterior. Al considerar sólo la zona de crianza de Chile en el análisis, la zona 1 (región XV) disminuye marcadamente su influencia resultando una zona que no aporta hacia el éxito del pre-reclutamiento, constituyéndose las zonas 2 y 3 (regiones I y II) como las principales regiones que sustentan la retención y el pre-reclutamiento en el norte de Chile (**Figura 102**).

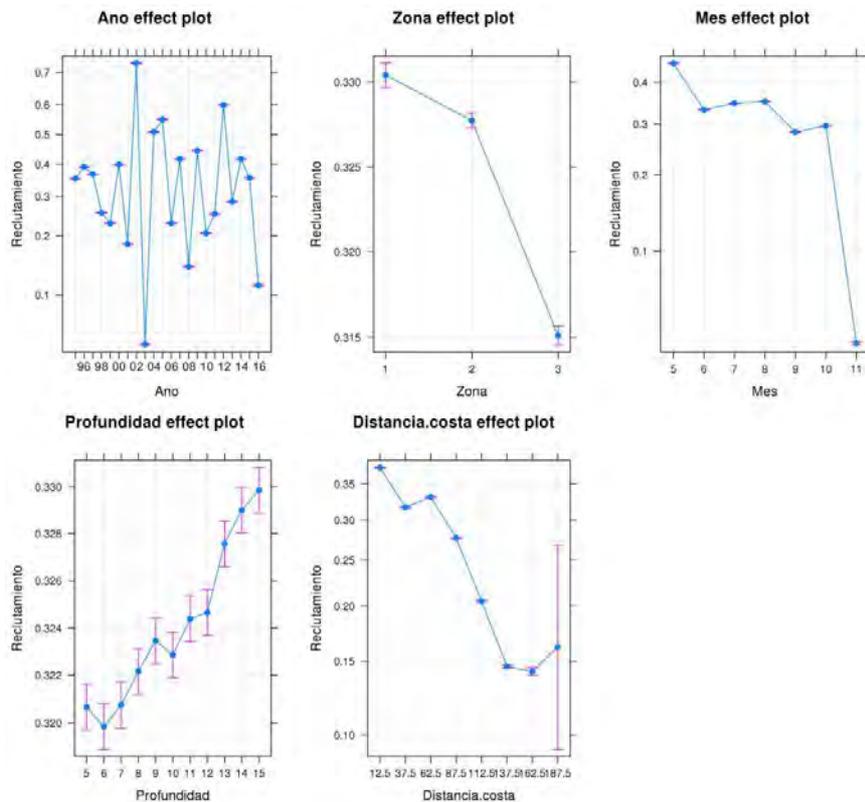


Figura 101. Efecto de los factores que constituyen condiciones iniciales sobre el éxito del reclutamiento individual. Se muestran los factores estadísticamente significativos.

De esta manera, los resultados presentados respecto a los patrones oceanográficos, las matrices de conectividad y los análisis estadísticos permiten establecer que los desoves que ocurren cercanos al límite norte de la zona de desove (región XV) tienen un mayor potencial de ser transportados hacia el norte y noroeste promoviendo el ingreso de individuos pre-reclutas al sur de Perú, y disminuyendo su aporte hacia el auto-reclutamiento en el sector costero del norte de Chile. Lo anterior está estrechamente relacionado con el patrón oceanográfico que muestra una circulación costera preferentemente norte, que se incrementa al norte de los 18°S producto de la curvatura del continente aumentando las velocidades de corrientes y deflectándolas costa afuera. Al mismo tiempo, los resultados evidencian que los desoves ocurridos entre la I y II regiones estarían sustentando de mayor forma el ingreso de pre-reclutas al sector costero del norte de Chile producto de importantes niveles de retención en esta zona.

Tabla X. Estadísticas para el modelo lineal generalizado parsimonioso aplicado a los resultados de la modelación biofísica para la variable dependiente reclutamiento respecto a las condiciones iniciales de desove considerando área crianza Chile.

Model GLM: Reclutamiento ~ Año + Zona + Mes + Profundidad + Profundidad + Dist.Costa, family = binomial(link = "logit")							
Model deviance explained: 33.06%							
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Exp. Var.	
Año liberación	21	301071	14337	8.83E+04	<2e-16	20.44	***
Zona liberación	2	103479	6739	4.15E+04	<2e-16	7.03	***
Mes liberación	6	65624	5937	3.66E+04	<2e-16	4.46	***
Profundidad de liberación	11	343	31	1.92E+02	<2e-16	0.02	***
Distancia de la costa liberación	7	16421	2346	1.45E+04	<2e-16	1.12	***
Residuals		985738					

Sign. Codes: *** p<0.001

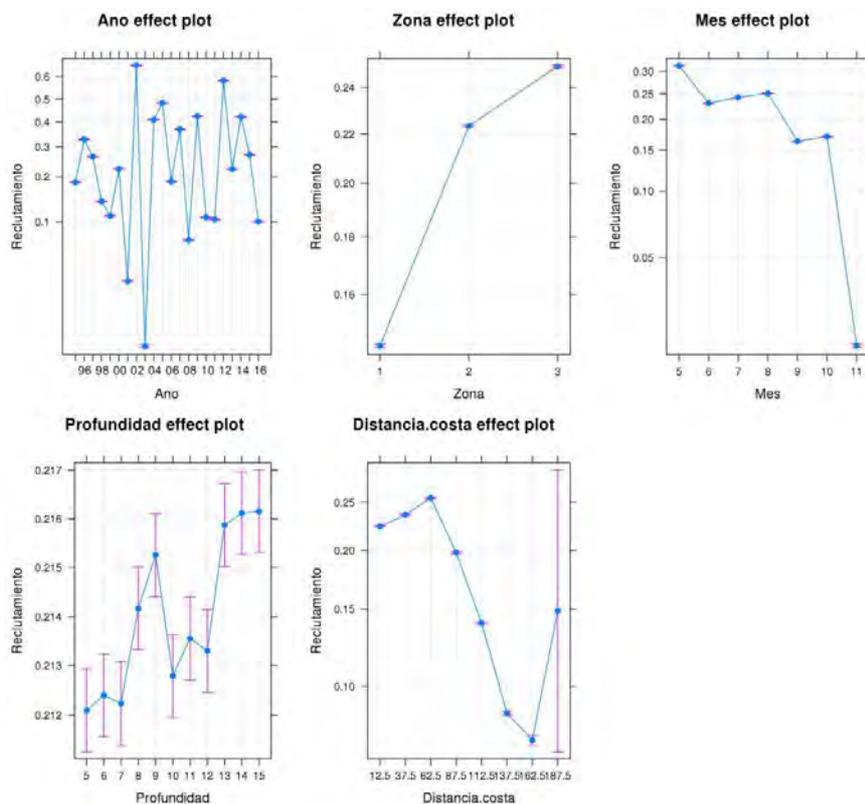


Figura 102. Efecto de los factores que constituyen condiciones iniciales sobre el éxito del reclutamiento individual. Se muestran los factores estadísticamente significativos.

6.6. Utilidad de la modelación biofísica hacia el manejo pesquero

Debido a que las poblaciones de peces deben perpetuarse en el tiempo, una de las primeras etapas para la modelación de la dinámica de un stock explotado es el entendimiento de los factores que influyen en el reclutamiento (Allain *et al.*, 2007). Como ha sido abordado en el presente estudio, un esquema de modelación biofísica permite explorar el efecto de factores bióticos y abióticos que pueden resultar claves para el crecimiento y la sobrevivencia de estadíos tempranos de desarrollo considerando la interacción de factores como la temperatura, la turbulencia, el transporte por corrientes, la luz y la dinámica de la oferta de ítems presa. Por lo tanto, los modelos biofísicos tienen un potencial valioso para la identificación de diversos mecanismos que afectan los recursos pesqueros y su productividad al considerar e incorporar explícitamente los procesos que actúan en varias escalas espacio-temporales.

Muchas especies usan diferentes áreas geográficas para el desove, el desarrollo larval, la crianza y la alimentación de adultos. Las conexiones entre estas diferentes áreas le permiten a las especies completar sus ciclos de vida. En el caso de la anchoveta en el norte de Chile, la componente espacial del ciclo de vida y las vías a través de las cuales se estructura la población transfronteriza, son aspectos que aún no están del todo comprendidos. Los patrones de conectividad, que son modulados por condiciones atmosféricas e hidrográficas variables, influyen en el éxito del reclutamiento de los stocks de peces marinos por medio de cambios en la retención o dispersión de huevos y larvas desde las áreas de desove hacia las áreas apropiadas (o inapropiadas) para la subsecuente sobrevivencia (Werner *et al.*, 1996; Hinrichsen *et al.*, 2002;). La definición de áreas apropiadas o inapropiadas para la sobrevivencia es un aspecto complejo de abordar, considerando que los requerimientos endógenos (fisiológicos) y exógenos (ambiente) requeridos para completar el desarrollo hasta el reclutamiento, requieren de estudios multidisciplinarios hacia el estudio de la ecología temprana de las especies de peces, los cuales no siempre son monitoreados en el mediano y largo plazo. Lo anterior es aplicable a la población de la anchoveta, donde algunos aspectos importantes como la identificación de áreas de desove, su recurrencia y variabilidad interanual han sido abordados y evaluados en este estudio, sin embargo los requerimientos fisiológicos para el crecimiento, el efecto materno sobre la sobrevivencia, la

ocurrencia de enfermedades, y las respuestas adaptativas a cambios bruscos en el ambiente, son aspectos que requieren de mayores estudios futuros. Por otra parte, la definición de áreas de crianza o áreas adecuadas para el crecimiento pueden resultar conceptos muy estáticos para el ambiente pelágico en un océano cambiante, donde estas el concepto de "área" podría ser reemplazado por "condiciones oceanográficas" las cuales serían seleccionadas por las poblaciones de acuerdo a respuestas adaptativas de largo plazo.

Los esfuerzos en investigar las causas de mortalidad en larvas y juveniles de peces hacia el reclutamiento, han sido enfocados en el efecto de los procesos advectivos y trofodinámicos (Hinrichsen *et al.*, 2002; Daewel *et al.*, 2008). Los subcomponentes de estos modelos han sido utilizados para simular el desarrollo de huevos y larvas con saco vitelino en relación a factores abióticos, como también el transporte, el forrajeo, la tasa de encuentro de presas, y la sobrevivencia a lo largo del desarrollo ontogenético. Las salidas de los modelos biofísicos pueden incluir: i) tasas de retención en ambientes de mayor producción biológica; ii) diferencias en las tasas de crecimiento asociadas a las condiciones abióticas; iii) patrones de conectividad hacia el entendimiento de la estructura espacial del ciclo de vida; iv) tasas mínimas de alimentación y crecimiento dependientes de la supervivencia; v) porcentaje de individuos sujetos a mortalidad por inanición (cuando los módulos bioenergéticos de los modelos han sido resueltos).

En general, los modelos biofísicos han contribuido a identificar algunos mecanismos clave detrás de la variabilidad del reclutamiento. Estos mecanismos se basan en las variables abióticas y bióticas explicativas observadas en relación con las deducciones retrospectivas de los modelos sobre la variación de reclutamiento como variable de respuesta. En otras palabras, los modelos pueden reconstruir la variabilidad oceanográfica y ambiental permitiendo identificar las variables claves por medio de procesos de simulación de la sobrevivencia en distintas etapas del ciclo de vida, lo que resulta clave para la administración de pesquerías pelágicas en un ambiente altamente dinámico y variable. La utilización de estos modelos para el desarrollo de planes de recuperación de pesquerías agotadas se es foco discusión actual en diferentes grupos de trabajo de evaluación de pesquerías alrededor del mundo (e.g. ICES, PISCES)

Los modelos biofísicos acoplados han demostrado tener un gran potencial para su uso en el manejo de pesquerías. Su utilidad incluye la estimación de la conectividad dentro de los stocks, el transporte de estadios larvales y juveniles tempranos, y las diferencias espacio-temporales en la supervivencia potencial. Aunque usualmente se asume que los procesos de transporte en los ecosistemas marinos son relevantes en escalas espaciales relativamente grandes (Reiss *et al.*, 2009), las poblaciones de peces marinos a menudo están estructuradas demográficamente en escalas espaciales más pequeñas (Sinclair, 1988; Jones *et al.*, 2005; Cowen *et al.*, 2006). Estos tipos de modelo podrían mejorar las simulaciones de la variabilidad dentro de la población y la dinámica del ecosistema (Miller, 2007) por medio del entendimiento de los procesos que actúan a nivel individual y que en conjunto definen la historia y estructura poblacional.

Los modelos acoplados han mejorado notablemente la comprensión de procesos biofísicos importantes que regulan la productividad de las poblaciones de peces, al revelar los efectos de la temperatura y distribución espacial de presas en el transporte de las etapas tempranas de desarrollo, la supervivencia y la probabilidad de asentamiento de los peces juveniles, permitiendo la cuantificación de escalas espacio-temporales de conectividad dentro de las poblaciones de peces (Palumbi, 2001; Cowen *et al.*, 2003; Kell *et al.*, 2009). Los modelos biofísicos, también podrían ayudar a validar algunos de los supuestos biológicos que subyacen a los modelos generales de evaluación de stocks o ser utilizados para evaluar la efectividad de las medidas de manejo, como las áreas cerradas. En algunos casos, los resultados pueden incorporarse en las relaciones stock-reclutamiento o proporcionar información relevante para la prueba de hipótesis y escenarios de modelación de la dinámica poblacional (Miller, 2007).

En general, los resultados de la modelación biofísica pueden vislumbrar si los marcos de manejo de los stocks deben ser reevaluados. A medida que se desarrollan las herramientas de evaluación y proyección de stock, debería ser más fácil incluir información ambiental y ecológica adicional en los modelos de dinámica poblacional (Aarts & Poos, 2009) utilizando métodos Bayesianos, modelos estadísticos de captura a la edad (Kell *et al.*, 2007), y otros enfoques. Actualmente se cuenta con herramientas existentes para la

evaluación de la estrategia de manejo, como ATLANTIS (Fulton *et al.*, 2007), que entregan la posibilidad de incorporar estimaciones espacialmente explícitas de las distribuciones de las etapas tempranas de vida, así como información sobre áreas que sustentan su crecimiento y supervivencia.

Una utilidad importante de los modelos biofísicos hacia el entendimiento de la variabilidad de pesquerías y su manejo, es que, al incorporar conjuntos de datos oceanográficos de alta resolución (temporales y espaciales), se pueden utilizar para predecir escenarios probables que no se han sido observado directamente en el pasado. Estos conjuntos de datos, la mayoría de los cuales están disponibles de forma libre, combinados con los conjuntos de datos empíricos existentes (típicamente desde reconstrucción de historia pesquera), permiten análisis detallados de las interacciones ecológicas y ambientales en distintas épocas de la historia de una pesquería y se pueden usar para describir hábitats adecuados y distribuciones probables de cohortes bajo escenarios climáticos alternantes por ejemplo en una escala multidecadal (Rockmann *et al.*, 2011).

En la actualidad, se encuentran en desarrollo herramientas cuantitativas complejas que buscan ampliar el horizonte de los modelos biofísicos hacia modelos que incorporen el ciclo de vida completo de las poblaciones marinas e incluyan la actividad pesquera y las interacciones tróficas dentro de un sistema dinámico tridimensional: los llamados modelos *end-to-end* en referencia a la capacidad de incluir todos los procesos en un esquema de modelación de alta complejidad (ver Rose *et al.*, 2015 como ejemplo). Este tipo de modelos corresponden a una aproximación tridimensional, con variabilidad interanual y multiespecie, y consiste de varios submodelos acoplados: modelo hidrodinámico, modelo Euleriano nutrientes-fitoplancton-zooplancton (NPZ, de su sigla en inglés), un modelo basado en el individuo de ciclo de vida completo y un modelo basado en agentes para simular a la flota pesquera que simula la mortalidad por pesca. Además, es posible incorporar un modulo de remoción por predación incluyendo la dinámica inter-específica predador-presa.

En perspectiva, los enfoques que combinen la observación, el conocimiento acumulado y la modelación numérica constituyen un camino prometedor para simular la dinámica de las poblaciones de peces marinos, aumentando el conocimiento sobre su respuesta frente a la pesca y el ambiente y proporcionando una herramienta fundamental para el manejo de pesquerías bajo una aproximación basada en el ecosistema. Desde el punto de vista operativo, esto puede lograrse mediante el acoplamiento de los patrones de transporte de las etapas iniciales de la vida obtenidos desde modelos hidrodinámicos en línea con los programas de muestreo de campo continuos (y quizás en tiempo real). Desde el punto de vista filosófico, el desafío principal será el trabajo retrospectivo desde estos complejos modelos de ecosistemas acoplados hasta la elaboración de consejos de administración relevantes y fáciles de entender como ha sido resumido por Elizabeth North de la Universidad de Maryland (Hinrichsen *et al.*, 2011) "*Convertir los gigabytes de información provenientes de un modelo biofísico acoplado en una tabla de opciones de hoja de cálculo simple para manejadores y sectorialistas pesqueros*". Como tales, los resultados del esquema de modelación biofísica deberán ser transparentes para los manejadores, científicos, grupos de interés y otros usuarios para garantizar que los resultados se interpreten correctamente y se apliquen de manera adecuada. El enfoque más sólido será una amalgama de información obtenida desde estudios de laboratorio, campo y modelos (Gallego *et al.*, 2007).

En la evaluación de stock de pequeños pelágicos, el tipo de modelos en actual uso para el manejo, corresponde a modelos con estructura de edad ajustados a información directa (i.e. cruceros) e indirecta (i.e. CPUE, estructura de tamaños, desembarques). Estos modelos, responden a un modelo conceptual donde se incorporan procesos poblacionales como el crecimiento, la mortalidad y la madurez, entre otros. De esta forma, se consolida una representación de la población con el objeto de conocer parámetros poblacionales de interés como son el reclutamiento (abundancia inicial), mortalidades por pesca y natural, desde el modelo es posible obtener estimaciones de las observaciones a través del proceso de ajuste del modelo o calibración. Finalmente, se obtienen variables de estado de interés como son las abundancias y biomásas, y variables de flujo como la mortalidad por pesca, y en síntesis poder establecer la condición de la población o estatus.

Las estimaciones, incorporan error de observación y de procesos, a mayor conocimiento de los procesos que controlan o determinan los cambios den abundancia, y en disposición de datos informativos y representativos de la población, la incertidumbre tanto en los parámetros como en las variables estimadas, disminuye. Para ello, es posible analizar la bondad de ajuste a través de test de verosimilitud, análisis de residuales o DIC (*deviance information criterion*). En particular, en las evaluaciones de stock, el reclutamiento es uno de los parámetros más difíciles de estimar, y que presentan mayor incertidumbre, siendo modelados generalmente como un parámetros con desviaciones (i.e. proceso estocástico). En este punto, un índice informativo e independiente validado con un proceso como el reclutamiento, producto de una modelación biofísica puede ser utilizado en los modelos de evaluación de stock con el objeto de reducir incertidumbre y por lo tanto, disminuir el sesgo en las estimaciones poblacionales. Un modelo, que incorpore de manera eficiente un indicador biofísico contendría mayor información que un modelo tradicional. La incorporación del índice debe ser evaluada, siendo posible que se incorpore directamente como: i) un calibrador al proceso de reclutamiento, o ii) como una covariable en la expresión de reclutamiento, siendo esto adicionado en el proceso estocástico a la forma de una covariable.

La aplicación en el manejo de los índices biofísicos, viene dada por la posibilidad de condicionar las proyecciones a través de reclutamiento, dadas las características del índice biofísico que se asocia con el reclutamiento futuro, acercando de esta forma la proyección a una condición de mayor realismo. En general, las proyecciones de corto o mediano plazo, proyectan condiciones promedio de toda la serie analizada, o bien de un promedio de los últimos años. Luego, un índice biofísico informativo, facilita la decisión del analista al condicionar el reclutamiento futuro, resultando en estimaciones proyectadas con menor incertidumbre al incluir el índice. Un condicionamiento, de mayor realismo evita por ejemplo que las proyecciones de capturas futuras y condición del stock estén, distantes de la condición más probable, con los beneficios que tiene para el manejo de recursos bajo explotación pesquera.

6.7. Perspectivas de investigación aplicada en modelación biofísica anchoveta norte

Como ha sido descrito anteriormente, la modelación biofísica es una línea de investigación reciente, la cual se está utilizando con mayor frecuencia debido al aumento en el acceso a máquinas de computo avanzado por parte de la comunidad científica internacional. Los resultados del actual proyecto constituyen un avance en el conocimiento de la interacción biofísica y de la historia temprana de la anchoveta en el norte de Chile, los cuales son producto de un esfuerzo mayor orientado a comprender las fuentes de variabilidad de las pesquerías y la conformación espacial de la estructura de esta población transfronteriza, aspectos relevantes para el manejo basado en el ecosistema. No obstante, este proyecto ha abordado de forma compleja la historia de vida temprana de la anchoveta hacia la dinámica del reclutamiento, existen algunos aspectos no abordados y preguntas que surgen de los resultados presentados que constituyen desafíos y perspectivas de investigación hacia futuros proyectos orientados en esta línea los cuales se identifican a continuación:

- Modelación hidrodinámica: un paso adelante en la investigación oceanográfica es el establecimiento de un modelo hidrodinámico (MH) de alta resolución para el sector costero del norte de Chile y sur de Perú. En el presente proyecto se ha avanzado en obtener un MH con forzantes atmosféricos mejorados, lo que ha permitido tener un mejor desempeño en reproducir el sistema de corrientes que caracterizan a este sistema representando además, las variaciones interanuales incluyendo los eventos tipo El Niño-La Niña. No obstante, esta es una disciplina en desarrollo y se debe seguir avanzando en la generación de un MH de mayor resolución y precisión para el estudio de el efecto de estructuras de submesoescala en la distribución de organismos planctónicos. Una alternativa para ello es implementar un MH con asimilación de datos, que corresponde a la inclusión de datos observados (i.e. estacione meteorológicas, boyas oceanográficas, cartas de batimetría) en el proceso de modelación numérica lo que aumenta el realismo de la modelación, principalmente en sectores costeros como golfos y bahías.

-Validación de modelos hidrodinámicos: uno de los constantes desafíos en este tipo de estudios es la validación de los resultados emanados desde la modelación hidrodinámica. En el presente proyecto se ha establecido un esquema de validación por medio de análisis

estadísticos que contrastan información observada desde satélites que permiten abordar una escala espacio-temporal amplia, además del uso de información de campo desde perfiladores oceanográficos que permitió analizar el comportamiento del modelo en la componente vertical. No obstante, existen desafíos en esta línea principalmente los asociados a estructuras extremadamente costeras, las cuales son difíciles de analizar a través de sensores remotos. El modelo hidrodinámico generado reprodujo la mayoría de las corrientes predominantes en el sector, destacando una corriente superficial costera que presenta una interacción importante con los estadios tempranos de desarrollo de anchoveta. Un desafío importante es realizar o tener acceso a mediciones directas de la corriente costera, para contrastar y validar los resultados del MH. Realizar anclajes oceanográficos para la medición de corriente (e.g. ADCP) resulta un desafío de mediano plazo en el sector costero del norte de Chile para contrastar evidenciar estas estructuras costeras y contrastarlas con lo obtenido mediante modelación numérica.

-Modelación biogeoquímica acoplada: como ha sido destacado anteriormente, una de las líneas de investigación de frontera en modelación biofísica acoplada es aquella que incorpora aspectos relacionados con la bioenergética temprana de peces que determinan el crecimiento y afectan la sobrevivencia hacia el reclutamiento. Para el desarrollo de estas aproximaciones, múltiples son los desafíos a ser abordados. Primero, el establecimiento de un modelo biogeoquímico validado para el área de estudio, el cual genere campos de fito y zooplancton que constituyan un *proxy* de la disponibilidad de alimento para larvas y juveniles de peces. Luego, el establecimiento de estudios empíricos de laboratorio que definan las estrategias de alimentación y los requerimientos energéticos para el crecimiento, que permitan definir las ecuaciones y reglas de decisión para ser incorporadas en un modelo de acoplamiento biofísico de alta complejidad. En el presente proyecto se ha incorporado la advección como fuente mayor de control de la sobrevivencia, y la incorporación de aspectos relacionados con la alimentación permitiría explorar una alta gama de hipótesis asociadas con el control ambiental de la sobrevivencia hacia el reclutamiento.

- Asociación del desove y la retención en estructuras de mesoescala: uno de los aspectos interesantes develados en esta investigación, es la ocurrencia de estructuras de meso y sub-

mesoescala semi-estacionarias al interior del área de desove de anchoveta, lo que genera una asociación biofísica relevante. La naturaleza permanente de dichas estructuras genera una instancia física hacia la retención y hacia el enriquecimiento local que puede resultar beneficioso hacia la sobrevivencia de estadíos tempranos. Lo anterior se establece al analizar las trayectorias de transporte de los individuos modelados. Es preciso el desarrollo de algoritmos que permitan cuantificar la asociación de los individuos respecto a estructuras de meso y submesoescala. Al mismo tiempo, un desafío hacia la validación de este acoplamiento biofísico es el seguimiento in situ de cohortes, realizando transectas de muestreo directo de ictioplancton en estructuras de mesoescala previamente identificados vía sensoramiento remoto.

- Uno de los principales moduladores atmosférico y oceanográfico del sector costero del norte de Chile es el sistema El Niño Oscilación del Sur, el cual vía teleconexiones impacta en la dinámica de las condiciones hidrográficas y dinámicas del área de desove y crianza de la anchoveta. Uno de los aspectos a seguir investigando es como estos eventos afectan el acoplamiento biofísico desove-transporte-sobrevivencia-reclutamiento y como los diferentes tipos de El Niño (e.g. canónico, Modoki, costero) modulan el hábitat de anchoveta impactando en el comportamiento reproductivo de la especie (ocurrencia y desplazamiento de frentes, abundancia y dinámica de estructuras de meso y submesoescala, etc.). Además, es un desafío identificar el acoplamiento temporal entre estos sucesos y el ciclo de vida de la anchoveta, considerando que los eventos El Niño se comienzan a desarrollar más frecuentemente durante la primavera y verano austral, que no coincide temporalmente con la época de máxima actividad reproductiva, pero si con la época de crianza y reclutamiento. Esclarecer estas relaciones y las adaptaciones de la especie a estos cambios abruptos del hábitat, constituye un desafío hacia futuras investigaciones y proyectos.

- Identificación de factores que determinan la variabilidad del desove: en el presente estudio se ha determinado las variabilidad espacio-temporal de las áreas de desove de anchoveta en la zona norte de Chile, identificando zonas recurrentes de desove de aquellas ocasionales. Al mismo tiempo, se ha identificado una tendencia de mediano plazo al

desplazamiento de los centros de gravedad del desove hacia el norte lo que impacta en el acoplamiento biofísico y en los patrones de conectividad poblacional mediados por las vías de transporte de huevos y larvas. Un desafío hacia el mejor entendimiento de la dinámica poblacional de la anchoveta es el entendimiento de cómo se configuran los sitios recurrentes de desove y cuáles son los mecanismos que determinan la variabilidad interanual en las zonas no recurrentes.

- Validación de los patrones espaciales obtenidos por modelación biofísica: uno de los aspectos complejos de investigar en poblaciones pelágicas es la distribución y abundancia de individuos pre-reclutas. La aproximación presentada en este proyecto, permite simular la historia de vida de esta etapa previa a la formación de cardúmenes, que es difícil de observar directamente en el campo. Un desafío en esta línea de investigación es generar validadores de la distribución simulada por modelación biofísica. Una de las piezas de información que más se acercan a este punto es la obtenida por los cruceros de evaluación acústica. Será preciso contar con bases de datos estandarizadas de distribución de reclutas detectadas por los cruceros realizados en la zona norte para ser contrastados con los campos de distribución de pre-reclutas obtenidos mediante modelación para evidenciar si la dinámica espacial del reclutamiento está modulada por los patrones de conectividad mediados por el transporte de estadíos tempranos de desarrollo.

- En el apartado 6.8. se presenta el modelo conceptual planteado por este proyecto hacia la dinámica espacial de la población de anchoveta en la zona norte de Chile y sur de Perú. Uno de los aspectos considerados, más allá de los resultados obtenidos en el presente estudio, es la existencia de un comportamiento tipo *natal homing* el cual ha sido propuesto previamente para otras especies pelágicas (Cury, 1994; Thorrold *et al.*, 2001). Este tipo de comportamiento considera que posterior y/o durante al proceso de transporte, la etapa de formación de cardúmenes, el reclutamiento y la madurez sexual, los individuos navegan largas distancias para volver a desovar en los mismos sitios donde nacieron. De esta forma, en el caso de la anchoveta, la fracción del desove que fue transportada hacia el norte, más allá del mar territorial chileno, que sobrevivió y reclutó hacia el stock adulto, retornaría a desovar en las áreas identificadas en el norte de Chile constituyéndose en el stock

desovante y reclutando a la pesquería. La comprobación de este tipo de comportamiento poblacional es un desafío mayor que, sin duda, ayudará al entendimiento de cómo se estructura la población de anchoveta en el norte de Chile y sur de Perú y generará un avance significativo hacia la toma de decisiones de manejo del stock compartido.

- Cambio climático: uno de los temas más relevantes de la actualidad es el relacionado con el cambio climático y sus efectos sobre los ambientes naturales. Uno de los aspectos más destacados y discutidos es la modificación del hábitat y los efectos sobre el comportamiento y la distribución de las especies. Un efecto previsto es el cambio en los patrones de circulación oceánica (Berwyn, 2018) lo que tendría una directa implicancia en las historia de vida temprana de peces pelágicos como la anchoveta. Además, bajo la consideración de existencia de condiciones ambientales preferidas para la reproducción y crianza, existirían alteraciones relevantes que podrían desencadenar desplazamientos espaciales de las poblaciones como la anchoveta. Hasta ahora en Chile, se ha avanzado en el establecimiento de planes de adaptación al cambio climático, sin embargo aún es necesario evaluar los mecanismos y los impactos que tendrán dichos cambios. Una opción es la generación de modelos biofísicos acoplados con consideración de cambio climático, lo que permitirá evaluar la modificación de los hábitats y algunas de las respuestas de las poblaciones. Sin duda, este aspecto es un desafío mayor en esta línea de investigación.

- Uso de indicadores biofísicos en la evaluación de stock de pequeños pelágicos: como se ha detallado en el apartado anterior, una de las principales fuentes de incertidumbre en la evaluación de stock y la determinación de status de pequeños pelágicos, es la relacionada con el reclutamiento, el cual es altamente variable y dependiente de las condiciones del hábitat. De esta manera, la generación de indicadores ecosistémicos que puedan dar señales tempranas de la fuerza del reclutamiento, es de suma importancia hacia la evaluación y el manejo pesquero. Como se ha consignado, el uso e incorporación de indicadores biofísicos en el proceso de evaluación de stock y en el ciclo de manejo es un desafío que deberá ser abordado en conjunto con los equipos de evaluadores, el comité científico técnico respectivo y los profesionales involucrado en el manejo de pesquerías.

6.8. Modelo conceptual para la dinámica espacial de la anchoveta en el norte de Chile

El modelo conceptual propuesto tiene su origen en diferentes estudios previos, al cual se adicionan elementos provenientes de la modelación biofísica del actual proyecto, consolidando elementos para la validación de un modelo conceptual espacialmente explícito para la población de anchoveta que habita en el norte de Chile y sur de Perú. En primer término, el modelo conceptual se focaliza en el primer año de vida de la anchoveta donde completan todas las fases de su desarrollo ontogenético (huevos hasta la madurez sexual) y donde el ambiente ejerce mayor control sobre la sobrevivencia. El modelo conceptual de los procesos y factores de comportamiento que influyen en la sobrevivencia de la anchoveta hasta alcanzar la madurez, se esquematiza en la **Figura 103**, donde se destacan los aspectos actualmente incluidos en el proceso de modelación biofísica y se identifican aquellos no abordados en este esquema metodológico y que constituyen brechas de conocimiento y desafíos de estudios futuros hacia el stock de anchoveta del norte de Chile y sur de Perú.

La

Figura 104 resume el modelo conceptual de la dinámica espacio-temporal del stock del norte de Chile y sur de (16° - 24° S). Dentro de las fuentes de información empleada se encuentran aquellas recopiladas de los cruceros acústicos que evalúan el proceso de reclutamiento realizados en primavera-verano de cada año, los cuales aportan información de carácter espacio temporal de indicadores como la abundancia y biomasa, la estructura poblacional y la proporción de reclutas. Por otra parte, los cruceros asociados al método de producción diaria de huevos aportan información relacionada al stock desovante y la distribución espacial de estadíos tempranos de anchoveta. Finalmente, el presente proyecto describe los patrones espacio-temporales del transporte de huevos y larvas, entregando evidencia hasta ahora desconocida respecto a las vías de dispersión de estadíos tempranos, su influencia en la conectividad poblacional y entregando indicadores espacialmente explícitos asociados al pre-reclutamiento.

Sobre la base de estos antecedentes se ha planteado el siguiente modelo conceptual espacio-temporal:

a) La anchoveta es una especie desovante parcial asincrónico con potencial de desove continuo durante todo el año, pero con una marcada estacionalidad en su máximo reproductivo que se alcanza entre julio y septiembre (Castillo et al., 2010) con claros signos de variabilidad interanual en ocurrencia y extensión (este estudio) la que puede estar gatillada por cambios ambientales. Durante la transición invierno-primavera, la fracción adulta ingresaría a la región más costera para reproducirse con mayor abundancia en la zona entre los 26°S y el límite norte del mar territorial chileno, con señales de continuidad del área desove hacia el norte (Reyes *et al.*, 2013). De acuerdo con el régimen oceanográfico, durante la época invernal ocurre una relajación de los vientos promoviendo una disminución en el transporte de Ekman y que en conjunto con la ocurrencia de remolinos y frentes, favorecerían la concentración y retención de estadíos tempranos en la costa (este estudio).

b) Huevos y larvas de anchoveta son transportadas por la corriente de forma pasiva hasta alcanzar los 10 mm de longitud desde cuando comienzan a migrar verticalmente (lo que en esta zona permitiría evitar zonas de mínima de oxígeno). El transporte por corrientes genera pérdidas advectivas (costa afuera) en toda el área de distribución, siendo máximas desde la curvatura del continente al norte de 18°S donde existe un fortalecimiento de la dinámica costa-océano producto de un mayor esfuerzo del viento. Entre los 18° y 24°S existe un área de menor dinámica costa-océano propiciando un sistema altamente retentivo para estadíos tempranos de anchoveta donde la temperatura invernal se ve localmente incrementada (en comparación a las regiones adyacentes al sur y norte) con un rango térmico de 17 - 18°C.

c) El sistema costero del norte de Chile, en particular la franja entre la costa y las 30 mn, constituyen zonas de crianza donde larvas post-larvas y pre-reclutas menores a 5 meses de edad crecen, se desarrollan y comienzan la actividad natatoria gregaria. En esta zona, el patrón de intensificación y relajación la surgencia favorece al crecimiento y la concentración de microfitoplancton en altas biomásas en la región costera (Morales *et al.*, 2001). Las diatomeas formadoras de cadena constituyen la componente dominante que sostiene altos niveles de biomasa (>5,0 µg Cl-a/L; Herrera & Escribano, 2006) que constituirían, en términos de la disponibilidad de alimento, condiciones favorables para el

desarrollo de larvas y pre-reclutas de anchoveta. El patrón de distribución de la clorofila superficial sugiere una extensión del sistema productivo durante el invierno generando una franja con niveles por sobre los $0,5 \text{ mg m}^{-3}$ que alcanza las 50 mn (este estudio).

d) Entre noviembre y febrero, los ejemplares han reclutado con una talla promedio de entre 6,5 y 7,5 cm, evidenciando un patrón de estratificación temporal y geográfica en el sentido latitudinal, iniciándose en Arica durante noviembre, para finalizar hacia fines de febrero en Mejillones (Castillo *et al.*, 2014). Este patrón de reclutamiento podría estar relacionado con un patrón de crecimiento diferenciado latitudinalmente producto del régimen térmico que favorecería un crecimiento más rápido de los individuos que nacen más al norte.

e) Los patrones de conectividad desove-crianza evidencian que los desoves ocurridos al norte de $\sim 19^\circ\text{S}$ tienen una mayor probabilidad de transporte hacia el norte generando pre-reclutas en el área costera del sur de Perú y en menor medida auto-reclutando en la costa de Chile. Los desoves generados entre los 19° y 24°S ocurren en un ambiente de mayor retención costera, con predominancia de corrientes de menor velocidad que fluyen hacia el norte favoreciendo el auto-reclutamiento y conectando con el sector costero del extremo norte de Chile (región de Arica). Los patrones de transporte sugieren una baja probabilidad (ocurrencia excepcional) de conectividad desove-crianza entre el área de desove norte (18° - 26°S) y las regiones costeras ubicadas inmediatamente al sur de los 26°S . Los patrones oceanográficos sugieren además la existencia de una discontinuidad y un área de transición entre los 24° y 26°S generando gradientes en las condiciones físicas del hábitat costero.

e) Entre marzo y mayo, los juveniles originados durante el desove del año anterior comienzan a ser pre-adultos y los adultos se congregan en agregaciones pre-reproductivas. Asumiendo una hipótesis *natal-homing* (Papi, 2006, Brochier *et al.*, 2009), los individuos transportados y pre-reclutados en el extremo norte de la distribución global del stock retornarían a las zonas de desove incorporándose al stock adulto y reclutando a la pesquería. Esta hipótesis constituye un desafío de investigación.

f) Bajo este esquema conceptual, el desarrollo de los individuos pre-reclutas que han sido capaces de sobrevivir en las zonas costeras, al crecer y alcanzar la madurez participarían en la reproducción en la época invernal, cuando se incorporarían al primer desove de forma más tardía y breve que los peces más viejos (Cubillos & Claramunt, 2009), y dada su mayor abundancia, contribuirían al desove en las zonas costeras donde nacieron, constituyendo una zona de desove que tiene una potencial extensión entre 16° y 26°S.

g) Una vez que los individuos han reclutado (6,5 - 7,5 cm) son foco de capturas realizadas por las flotas cerqueras artesanal e industrial, que operan principalmente en las cercanías de la costa, llegando ocasionalmente hasta las 80 mn, lo cual se observa en invierno en las zonas de pesca ubicadas en el norte. Esta actividad se focaliza en dos periodos del año, el primero entre febrero y junio; y el segundo entre septiembre y diciembre (Böhm *et al.*, 2018). La operación pesquera se ve interrumpida por vedas de reclutamiento y reproducción centradas en enero y julio-agosto respectivamente. En la fracción del stock que se distribuye en mar peruano no se establecen vedas de captura (PRODUCE N°306-2017).

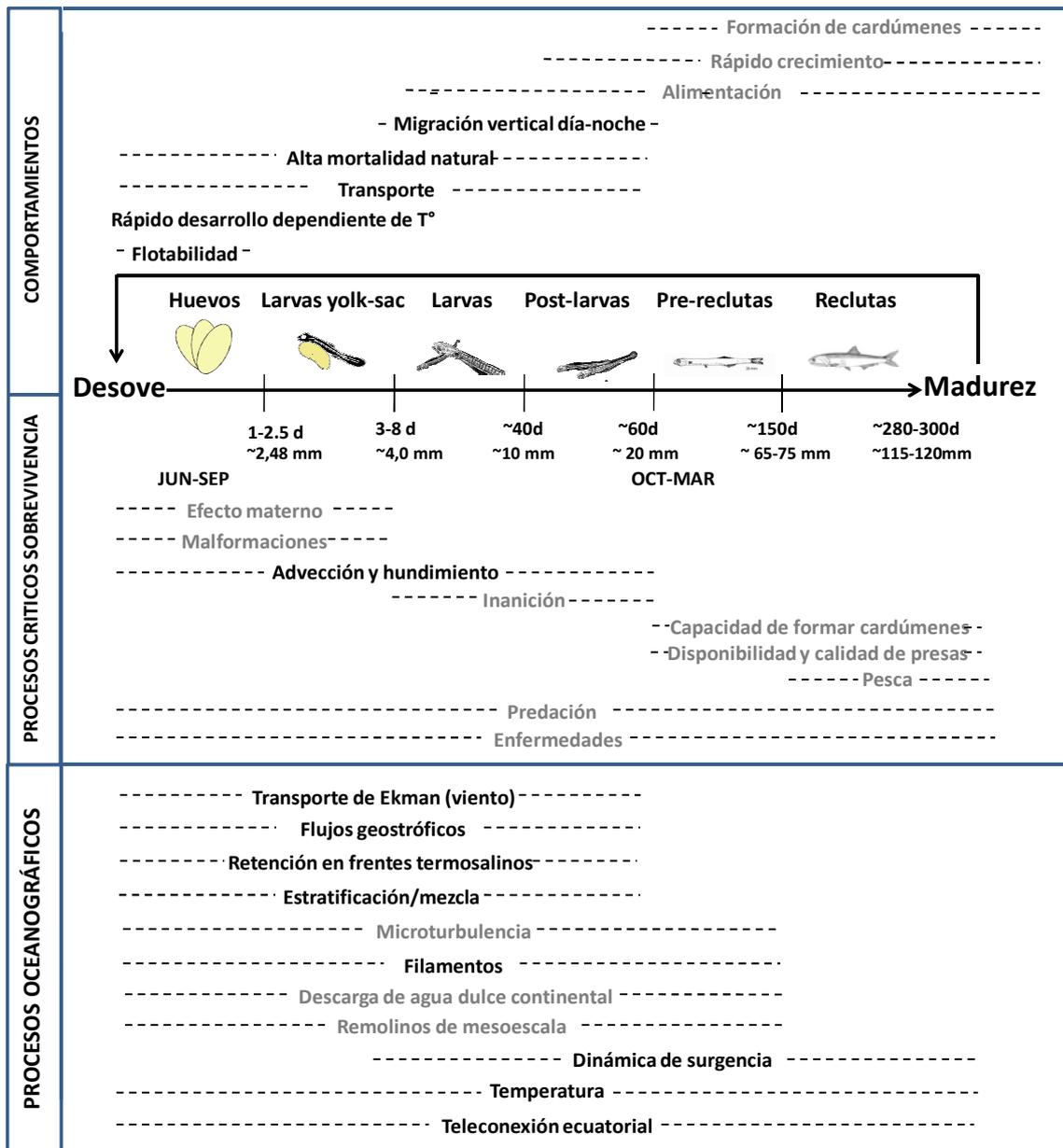


Figura 103. Modelo conceptual de la historia de vida temprana del stock de anchoveta del norte de Chile y sur del Perú con énfasis en procesos biofísicos relevantes para el control de la sobrevivencia. En negro se muestran los procesos abordado en el presente estudio, en gris procesos no abordados y que constituyen focos de estudio hacia el futuro.

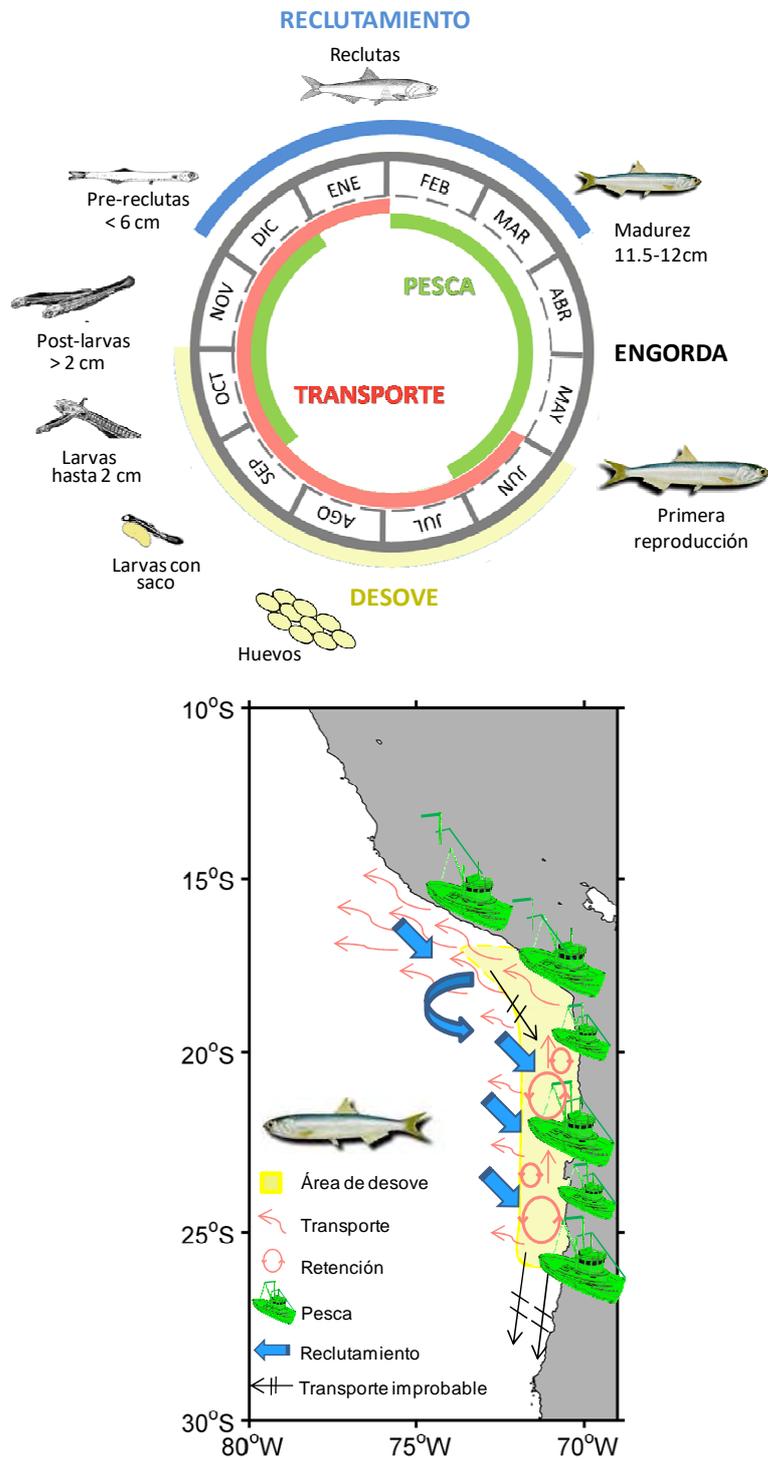


Figura 104. Modelo conceptual de la dinámica espacio-temporal de unidad poblacional de anchoveta distribuida en el sur de Perú y norte de Chile (17° - 26°S) con énfasis en la historia de vida temprana de la especie.

7. CONCLUSIONES

7.1. Modelación Hidrodinámica

- La zona norte de Chile y sur de Perú es una zona compleja de modelar hidrodinámicamente, debido a limitaciones en la detección de variables atmosféricas por efectos principalmente orográficos. En este proyecto, la implementación de mejoras en los forzantes atmosféricos (vientos y flujos de calor) permitió subsanar dichas complejidades y obtener un modelo regional (ROMS) con mayor nivel de precisión.
- No obstante a las evidentes mejoras presentadas por la versión final del ROMS, el modelo muestra niveles de subestimación de la temperatura superficial en torno a $-1,5^{\circ}\text{C}$ durante primavera y verano en la franja costera, minimizándose en invierno. Lo anterior sugiere aún ciertas inconsistencias asociadas a la dinámica de la surgencia costera.
- El ROMS de resolución espacial ~ 3 km y temporal diaria para el sector costero del norte de Chile y sur de Perú mostró un buen desempeño reproduciendo los rasgos oceanográficos más importantes del sistema, no obstante es una línea de investigación en plena vigencia por lo que continuamente se presentan mejoras metodológicas que pueden ser implementadas en futuras versiones.
- La utilización de datos oceanográficos provenientes de cruceros de evaluación directa, para la validación del modelo ROMS resultó de alta utilidad y constituye un nuevo uso de esta información de campo.
- El modelo ROMS mostró un buen nivel de reproducción de la variabilidad interanual del sistema en términos de variables conservativas y dinámicas, incluyendo cambios durante eventos críticos (e.g. el Niño, la Niña).

7.2. Aspectos Oceanográficos

- Las variables y forzantes físicos identificados en la modulación de la variabilidad del transporte y sobrevivencia de estados tempranos de anchoveta en el norte de Chile fueron: viento (esfuerzo del viento, velocidad de Ekman), velocidad geostrofica, temperatura superficial del mar, estructuras de mesoescala (remolinos, EKE), frentes térmicos y clorofila-a.

- La mayoría de las variables analizadas están asociadas al ciclo estacional, en tanto que en la escala interanual eventos El Niño y La Niña se verifican claramente en la región de estudio, tanto en la información satelital como en datos de estaciones costeras.
- En la zona costera del área prospectada (XV-II Regiones) se verificó una menor ventilación (menor esfuerzo del viento y deriva de Ekman), no obstante el viento presentó un claro dominio hacia el norte. La velocidad de Ekman evidenció un flujo meridional costero ($<73^{\circ}\text{W}$) y somero ($<20\text{-}30\text{ m}$) hacia el norte, en tanto se observan velocidades de Ekman zonales muy bajas en la región más costera, las que se intensifican hacia el océano interior a partir de los 75°W .
- Se observó una clara banda meridional entre los $17\text{-}24^{\circ}\text{S}$, que distingue a la región de estudio de las regiones inmediatamente adyacentes, en el sur del Perú y al sur de los $24\text{-}26^{\circ}\text{S}$. Esta banda meridional se caracterizó por presentar aguas superficiales más cálidas, baja ventilación costera, menores concentraciones de clorofila, y menor dinámica (velocidades de Ekman, velocidades geostróficas, y EKE).
- Además de la baja ventilación y de la dinámica asociada al viento, la región muestra una circulación geostrófica dominada por meandros y giros durante todo el año, así como la presencia de frentes térmicos costeros. Esta menor dinámica costera verifica a esta región como una zona menos advectiva, especialmente al término del invierno (desove). El incremento del viento favorece las corrientes hacia el norte después del período de desove, reforzadas por la presencia de los frentes a lo largo de la costa.
- La distribución meridional de la energía cinética asociada a remolinos mostró valores bajos en gran parte del área estudiada, no obstante se verifica que los máximos de EKE estuvieron asociados a eventos cálidos (El Niño).

7.3. Modelación biofísica

- La zona de desove de la anchoveta muestra mayor actividad y recurrencia en tres focos espaciales: i) al sur de Arica en torno a $18^{\circ}20'\text{S}$, ii) al sur de Iquique entre 20° y 22°S siendo el de mayor abundancia y extensión, y; iii) el área costera adyacente a Antofagasta entre 23° y 24°S torno a los 21°S . En general el área de desove se caracteriza por ser un sistema de menor dinámica producto de un menor estrés de viento, lo que se ve acentuado durante la época de desove (invierno-primavera temprana).

- Los centros de gravedad del desove de anchoveta muestran variabilidad interanual, con una tendencia de largo plazo a desplazarse hacia el norte. Posterior a 2006 en un 60% de los años se registró el centro de gravedad al norte de los 21°S, mientras que previo a 2006 sólo un 10% de los años evidenció este rasgo.
- La temporada reproductiva de anchoveta muestra máxima actividad en los meses de agosto y septiembre. Sin embargo, existe variabilidad interanual en la sincronización del desove (inicio, máximo y término). Este aspecto demográfico puede causar (des)acoplamiento con las condiciones propicias para la retención y el éxito reproductivo. Es necesario estudiar los desencadenantes del proceso de desove.
- El modelo predictivo del desove de anchoveta explicó, en general, sobre 40% de la varianza del proceso espacial, convirtiéndose en una herramienta útil para analizar la variabilidad espacio-temporal del desove (aspectos demográficos). Esta implementación metodológica es la base para identificar condiciones del hábitat que pueden determinar la localización del desove de anchoveta.
- El área de crianza de pre-reclutas de anchoveta está restringido a las primeras 50 mn desde la costa, donde durante invierno, la productividad costera parece extenderse costa-afuera aumentando el hábitat apropiado para el crecimiento. El 95% de huevos y larvas de anchoveta históricamente se han ubicado en ambientes con niveles de clorofila superficial por sobre los 0,5 mg m⁻³ pareciendo ser un buen indicador del límite costa-afuera del área de crianza.
- La escala de dispersión obtenida para anchoveta, está dentro de los márgenes previamente establecidos para peces de estas características (~350 km), sin embargo el sistema muestra rasgos dinámicos mayormente retentivos.
- Las matrices de conectividad que evalúan la relación fuente-sumidero identificaron los siguientes aspectos: i) el extremo norte del área de desove (norte de 19°S) está mayormente conectado con el sector costero y la zona oceánica adyacente de Perú, producto de un mayor transporte norte y noreste; ii) la región de desove ubicada entre 19° y 24°S funciona como una zona de retención y conecta con el extremo norte del área de desove, convirtiéndose en la región que sustenta el reclutamiento larval en el área de estudio; iii) la zona de desove del norte de Chile (Arica-Antofagasta) no presenta conectividad, vía transporte de huevos y larvas, con las regiones ubicadas inmediatamente al sur de los 18°S y al aporte de individuos pre-

reclutas a esta región sería excepcional.

- Las condiciones iniciales para la modelación biofísica explicaron un 33% del éxito del reclutamiento individual, sugiriendo que un mayor porcentaje de la retención costera (sobrevivencia) está vinculado a procesos de transporte asociados con los procesos oceanográficos que modulan los niveles de advección de estadíos tempranos de anchoveta (además de procesos estocásticos de la modelación).
- Se obtuvieron diferencias significativas al comparar experimentos de transporte pasivo (lagrangiano) y experimentos con inclusión de comportamiento biológico (modelo con flotabilidad de huevos y migración vertical para larvas y juveniles). El comportamiento biológico de la anchoveta tiene un efecto directo en los patrones espaciales de transporte, agregación y advección.
- La manifestación espacial del índice de sobrevivencia muestra un área de pre-reclutamiento continua entre la zona centro-sur de Perú y el norte de Chile; y una dinámica meridional altamente variable y asociada a procesos oceanográficos regionales.
- Se propone un nuevo índice relacionado con el pre-reclutamiento que asocia la magnitud del desove con la sobrevivencia de estadíos tempranos hasta los 60 días de edad. Este índice es independiente de las estimaciones de reclutamiento obtenidas desde cruceros acústicos y de aquellas obtenidas por el modelo estadístico de evaluación de stock.
- El índice de (pre) reclutamiento biofísico mostró correspondencia respecto a índices de reclutamiento provenientes de modelos estadísticos edad-estructurados (MEE), principalmente para el periodo 2003-2017 ($R^2=0,601$). Asumiendo a los MEE como referencia del reclutamiento conocido, el esquema que integra el desove más la sobrevivencia de estadíos tempranos (hasta 60 días de edad) explica un importante porcentaje de la variabilidad del reclutamiento.
- Las fuentes de mortalidad incluidas en el esquema de modelación biofísicas son limitadas y resumidas a la advección fuera de la costa y a la mortalidad por temperaturas letales. Los resultados sugieren que estas fuentes de mortalidad podrían ser moduladores de la sobrevivencia temprana. No obstante, la incorporación de nuevas fuentes de mortalidad pudiesen resultar en un índice más robusto hacia el reclutamiento. Es preciso avanzar hacia esquemas de modelación que incorporen aspectos como la alimentación y la predación, además de avanzar

hacia la modelación de procesos de natación y formación de cardúmenes hasta el reclutamiento.

- La correspondencia entre indicadores sugieren al indicador biofísico como una nueva pieza de información basada en el ecosistema para sintonizar la estimación del reclutamiento.
- El nivel descriptivo del modelo biofísico respecto al reclutamiento del año siguiente al evaluado lo transforman en una nueva herramienta para el manejo pesquero, permitiendo proyectar los niveles de captura futuro bajo un escenario de reclutamiento conocido.
- La incorporación de un índice de reclutamiento basado en modelos ecológicos y ecosistémicos hacia el proceso de toma de decisiones está en sintonía con las recomendaciones internacionales.
- La obtención de un índice de pre-reclutamiento independiente de la pesquería puede resultar de alta utilidad para el proceso de evaluación de stock, toma de decisiones de manejo y prueba de hipótesis respecto a la estructura del stock en la zona norte de Chile y sur de Perú.

8. TALLERES Y REUNIONES

En el marco del desarrollo de este proyecto hasta la fecha se han realizado una serie de reuniones y talleres de trabajo, entre los que destacan:

Reunión de coordinación con Subsecretaría de Pesca. El día 13 de diciembre de 2016 se llevó a cabo la reunión de coordinación con la Subsecretaría de Pesca y Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura donde se presentó formalmente el proyecto y se coordinaron las principales actividades asociadas. En dicha reunión participaron el Sr. Luis Carroza, Director ejecutivo del FIPA; el Sr. Mario Acevedo, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura; Srta. Malú Zavando, SIPA, el Sr. Sergio Núñez, Jefe de Departamento de Pesquerías INPESCA y el Sr. Sebastián Vásquez, Jefe de proyecto. El Acta de dicha reunión se entrega en el Anexo I.

Taller de diseño e implementación del modelo hidrodinámico. Los días 16, 17 y 18 de diciembre de 2016 se contó con la visita del Dr. Vincent Echevin del Laboratoire d'Océanographie et du Climat (LOCEAN), Francia en INPESCA, quien fue parte de una jornada de trabajo para analizar la configuración, implementación, mejoras y alcances del modelo hidrodinámico ROMS de elaboración propia. De esta reunión emanaron las bases para el inicio de la implementación del ROMS para anchoveta en el norte de Chile. Se contó con la participación del Dr. Luis Soto Universidad del Bío Bío, Dr. Cristian Salas, INPESCA y Sebastián Vásquez, INPESCA. Para finalizar esta visita el Dr. Echevin brindó la charla "*Biophysical modelling to study larval dynamics under climate change*" el día 18 de diciembre de 2016 en el auditorio de INPESCA, la cual contó con la presencia de académicos, profesionales de la industria pesquera local, estudiantes e investigadores del área de la oceanografía y pesquería.

Sesión de organización y discusión inter-institucional del equipo ejecutor. Los días 8 y 9 de mayo de 2017 se realizó en dependencias del CIAM en la ciudad de Iquique una jornada de organización del proyecto. En esta reunión participaron los investigadores Gabriel Claramunt y Liliana Herrera de la Universidad Arturo Prat, los investigadores

Mauricio Braun, Jorge Oliva de CIAM junto a su director Carlos Merino además de los investigadores Sergio Núñez y Sebastián Vásquez (Jefe de proyecto) de INPESCA junto a su Director Aquiles Sepúlveda. En la oportunidad se abordaron temas relativos a la organización del trabajo, al modelo conceptual de la historia de vida de la anchoveta en el norte de Chile, las fuentes de información necesarias para soportar la modelación biofísica, etc. El Acta resumen de esta reunión se entrega en el Anexo II.

Taller interno de coordinación grupo de Oceanografía Con el propósito de compartir, discutir y consensuar diferentes aspectos asociados al desarrollo de la caracterización oceanográfica de las zonas de desove y reclutamiento de anchoveta en el norte de Chile y sur del Perú, se realizó un Taller interno de trabajo del grupo de Oceanografía del proyecto, en dependencias del Instituto de Investigación Pesquera el día Viernes 12 de Mayo de 2017, entre las 09:30 y las 14:30 horas. En esta reunión participaron los investigadores Sebastián Vásquez (Jefe de proyecto), Sergio Núñez, Cristián Salas y Rubén Luna de INPESCA, además de Luis Soto Mardones de la Universidad del Bío-bío.

Taller de revisión y validación de modelo hidrodinámico. Durante los meses de marzo a septiembre de 2017 se realizaron mensualmente talleres de revisión y validación del modelo hidrodinámico donde el Dr. Vincent Echevin del Laboratoire d'Océanographie et du Climat (LOCEAN) en conjunto con el Dr. Cristian Salas y Sebastián Vásquez de INPESCA discutieron e implementaron las mejoras pertinentes al modelo hidrodinámico descritas en el presente Informe.

Taller interno de análisis de resultados grupo de Oceanografía. Realizado los días 12 y 13 de mayo de 2018 con el propósito de analizar y discutir resultados relacionados con la caracterización oceanográfica del área de estudio, en dependencias de INPESCA. En dicho taller participaron los profesionales: Sergio Núñez Elías, Cristian Salas y Sebastián Vásquez del Instituto de Investigación Pesquera en conjunto con Luis Soto Mardones, Universidad del Bío-bío.

Taller de discusión de resultados inter-institucional del equipo ejecutor. Los días 11 y 12 de junio de 2018 se realizó en dependencias del CIAM en la ciudad de Iquique una jornada de discusión de resultados del proyecto. En esta reunión participaron los investigadores Gabriel Claramunt, Liliana Herrera, Edgardo Santander, Cristian Azocar y Paola Moreno de la Universidad Arturo Prat, los investigadores Mauricio Braun, Jorge Oliva de CIAM junto a su director Carlos Merino además de los investigadores Sergio Núñez y Sebastián Vásquez (Jefe de proyecto) de INPESCA junto a su Director Aquiles Sepúlveda. En la oportunidad se abordaron temas relativos a la discusión de los resultados del proyecto orientadas hacia el establecimiento de un modelo conceptual del stock de anchoveta en el norte de Chile y sur de Perú. El programa de trabajo de esta reunión y el material fotográfico se entrega en el Anexo III.

Taller de presentación y difusión de resultados. El día miércoles 03 de julio de 2018 se realizó con éxito el taller de presentación y discusión de resultados en dependencias del Hotel Diego de Almagro en la ciudad de Iquique. En dicha oportunidad participaron invitados de Subsecretaría de Pesca, institutos de investigación, Universidades, empresas pesqueras, Servicio nacional de Pesca, entre otros. Además se contó con la presencia del experto internacional Dr. Andrés Ospina-Álvarez, quien además brindó una charla relativa al tema. Detalles del taller se entregan en el Anexo IV. Además, en esta visita el experto internacional elaboró un informe de los resultados alcances y perspectivas del proyecto, el cual se entrega en el anexo V.

Reunión informativa de resultados. El día martes 17 de julio de 2018, en la ciudad de Valparaíso, se realizó una reunión informativa de los principales hallazgos del proyecto con representantes de la contraparte técnica de la Subsecretaría de Pesca y del mandante Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura. En dicha oportunidad participaron las profesionales del área de pesquerías pelágicas de Subpesca Joyce Méndez y Silvia Hernández, el director ejecutivo del FIPA Luis Carroza y los profesionales de INPESCA Sergio Núñez y Sebastián Vásquez (Jefe de proyecto).

9. REFERENCIAS

- Aarts, G., and Poos, J. J. 2009. Comprehensive discard reconstruction and abundance estimation using flexible selectivity functions. *ICES Journal of Marine Science*, 66: 763–771.
- Aguirre, C., Pizarro, O., Strub, T., Garreaud, R., Barth, J., 2012. Seasonal dynamics of the alongshore flow off Central Chile. *J. Geophys. Res. Ocean* 117, C01006. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JC007379>.
- Arcos, D., Cubillos, L., Núñez, S. 2001. The jack mackerel fishery and El Niño 1997-1998 effects of Chile. *Progress in Oceanography*, Vol 49:597-617.
- Arcos, D., Cubillos, L., Núñez, S. 2004. Efectos de El Niño 1997-1998 sobre las principales pesquerías pelágicas de la zona centro-sur de Chile. In: EL Niño-La Niña 1997-2000, sus efectos en Chile. S. Avaria, J. Carrasco, J. Rutllant y E. Yañez (eds.). Comité Oceanográfico Nacional (CONA), Valparaíso, Chile.
- Allain, G., Petitgas, P., Lazure, P., and Grellier, P. 2007. Biophysical modelling of larval drift, growth and survival for the prediction of anchovy (*Engraulis encrasicolus*) recruitment in the Bay of Biscay (NE Atlantic). *Fisheries Oceanography*, 16: 489–505.
- Atlas, R., R. N. Hoffman, J. Ardizzone, S. M. Leidner, J. C. Jusem, D. K. Smith, D. Gombos, 2011: A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92, 157-174. doi: 10.1175/2010BAMS2946.1
- Bakun, A. 2006. Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive advantage. *Scientia Marina*. 70 (S2): 105-122.
- Bakun, A., & C. S. Nelson (1991). The seasonal cycle of wind stress curl in subtropical eastern boundary current regions. *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 21, pp. 1815-1834
- Barnett, T.P. & Patzert, W.C. 1980. Scales of thermal variability in the tropical Pacific. *J. Geophys. Res.*, 10: 529–540
- Bartsch J, Coombs SH. 2004. An individual-based model of the early life history of mackerel (*Scomber scombrus*) in the eastern North Atlantic, simulating transport, growth and mortality. *Fish Oceanogr* 13:365-379.
- Bartsch, J., Reid, D., Coombs, S.H., 2004. Simulation of mackerel (*Scomber scombrus*) recruitment with an individual-based model and comparison with field data. *Fish. Oceanogr.* 13, 380–391.
- Bernal, M., Stratoudakis, Y., Coombs, S., Angélico, M. M., Lago de Lanzós, A., Porteiro, C., Sagarminaga Y., et al. 2007. Sardine spawning off the European Atlantic coast: characterization of and spatio-temporal variability in spawning habitat. *Progress in Oceanography*; 74:210-227.

- Blanco, J.L., A. Thomas, M. Carr & P. Strub. 2001. Seasonal climatology of hydrographic conditions in the upwelling region off northern Chile. *Journal of Geophysical Research*. 106 (C6): 11451-11467.
- Blanco J. L., M. Carr, A. Thomas and P. Strub, 2002. Hydrographic conditions off northern Chile during the 1996-1998 La Niña and El Niño events. *J. Geophys. Res.*, 107, C3.
- Böhm M.G., C. Hernández, E. Díaz, L. Ossa, G. Pérez, H. Reyes, R. Aravena, Z. Young, F. Cerna, V. Bocic, C. Machuca, L. Muñoz, A. López y M. Troncoso. 2012. “Programa de Seguimiento del Estado de Situación de las Principales Pesquerías Nacionales: Asesoría Integral para la Toma de Decisiones en Pesca y Acuicultura, 2011”, actividad 1: Recursos pelágicos Zona Norte, Informe Final. Convenio SUBPESCA – IFOP, 265 p + Anexos.
- Böhm M.G., C. Hernández, E. Díaz, L. Ossa, H. Reyes, F. Espíndola, R. Aravena, Z. Young, F. Cerna, V. Bocic, C. Machuca, L. Muñoz y M. Troncoso. 2011. “Programa de Seguimiento del Estado de Situación de las Principales Pesquerías Nacionales: Asesoría Integral para la Toma de Decisiones en Pesca y Acuicultura, 2010”, actividad 1: Recursos pelágicos Zona Norte, Informe Final. Convenio SUBPESCA – IFOP, 257 p + Anexos.
- Böhm M.G., Díaz, E., Pérez, G., Ojeda, R., Cerna, F., Valero, C., Gómez, M., Machuca, C., Muñoz, L., Varas, A., Reyes, H., Pizarro, M., Cifuentes, U., Aravena, R., Troncoso, M. & Gaspar, C. 2017. Programa de Seguimiento de las Principales Pesquerías Pelágicas de la Zona Norte de Chile, XV - IV Regiones, año 2016. Convenio de desempeño, Subsecretaría de Economía y Empresas de Menor Tamaño. Informe Final, 369 p.
- Braun, M., J. Castillo, J. L. Blanco, S. Lillo & H. Reyes. 1994. Monitoreo hidroacústico y oceanográfico mensual de los recursos pelágicos de la I y II regiones. Informe Final. Instituto de Fomento Pesquero (Valparaíso, Chile). 172 pp + Tablas, figuras y anexos.
- Brink, K. H. (1982). A comparison of long coastal trapped wave theory with observations off Peru. *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 12, pp. 897-913.
- Burrus, C. S., Gopinath, R. A., & Guo, H. (1998). Introduction to wavelets and wavelet transforms: A primer. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall.
- Cambon, G., Goubanova, K., Marchesiello, P., Dewitte, B., Illig, S. & V. Echevin. 2013. Assessing the impact of downscaled winds on a regional ocean model simulation of the Humboldt system. *Ocean Modelling*, 65: 11–24.
- Canales, C., & M.J. Zúñiga 2013. Estatus y posibilidades de explotación biológicamente sustentables de los principales recursos pesqueros nacionales, año 2013. Segundo Informe. Instituto de Fomento Pesquero. 151 pp.
- Castillo, J., M. Braun & J.L Blanco. 1993. Cuantificación estacional de la biomasa de los recursos pelágicos y vigilancia bio-oceanográfica. Zona Norte. Programa Investigaciones Pesqueras de Recursos Pelágicos – Zona Norte. Inst. Fom. Pesq. Santiago, Chile. 54p. + anexos.

- Castillo, J., M. Barbieri, J. Córdova, S. Lillo, U. Parker, J. L. Blanco, M. Braun & J. Osses. 1996. Evaluación hidroacústica de los recursos anchoveta, jurel y sardina española, de las Regiones I a IV. IFOP. Informe final de proyecto al FIP. 165p + Anexos.
- Castillo, J., M. Espejo, S. Lillo y J. Córdova. 1997. Evaluación y distribución espacial de reclutamiento anchoveta. En: Evaluación y distribución espacial de reclutamiento anchoveta, regiones I y II. Informe final proyecto FIP 96-02. IFOP. 126p+anexos.
- Castillo, J. M.A. Barbieri, M. Espejo, V. Catasti, S. Rosales, J. Osses, P. Barría, G. Daneri, H. González. 1998. Estimación del Reclutamiento de Anchoveta en las regiones I y II. Informe Final 97-51. Instituto de Fomento Pesquero (Valparaíso, Chile). 181 pp + Tablas y Figuras.
- Castillo, J., J. Córdova & M. Espejo. 2000. Evaluación y distribución espacial del reclutamiento de anchoveta. En: Evaluación del reclutamiento de anchoveta en la I y II Regiones, 1999. Informe Final de Proyecto FIP 99-11. Inst. Fom. Pesq., Chile, 136 p + anexos Figuras y tablas.
- Castillo, J., Barbieri, M.A., Espejo, M., Catasti, V. 2001. Evaluación acústica del reclutamiento de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur, año 2000. Informe Final FIP 2000-09. Informes Técnicos FIP – IT/2000-09, 151 p.
- Castillo, J. A. Saavedra, R. Vargas, J. Angulo, H. Reyes, M. Pizarro, V. Catasti, E. Molina, M. Rojas, R. Lorca, J. Bosso, A. Ruiz, I. Toro, A. López y L. Herrera. 2012. Evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta entre la XV, I y II Regiones, año 2012. Informe Avance. SUBPESCA.
- Castillo-Jordán, C, Cubillos, LA, Navarro, E. 2010. Inter-cohort growth rate changes of common sardine (*Strangomera bentincki*) and their relationship with environmental conditions off central southern Chile. Fisheries Research, 105:228-236.
- Chaigneau, A. & O. Pizarro. 2005. Surface circulation and fronts of the South Pacific Ocean, east of 120°W. Geophysical Research Letters, 32, L08605 10.1029/2004GL022070.
- Chaigneau, A., A. Gizolme & C. Grados 2008. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns Progress in Oceanography. 79: 106-119.
- Chelton, D., M.G., Schlax, R.M. Samelson & R.A. deSzoeki. 2007. Global observations of large oceanic eddies. Geophysical Research Letters. 34 (L15606): doi:10.1029/2007GL030812.
- Correa-Ramírez, M., S. Hormazábal & G. Yuras. 2007. Mesoscale eddies and high chlorophyll concentrations off central Chile (29°-39°S). Geophys. Res. Lett. 34, L12604, doi: 10.1029/2007gl029541.
- Cowen R.K., Gawarkiewicz G, Pineda J, Thorrold SR, Werner FE. 2007. Population connectivity in marine systems. Oceanography 20:14–21
- Cubillos, L.A., Castro, L., Claramunt, G., Navarro, E., Alarcón, C., Zúñiga, M., Castillo-Jordán, C., Pedraza, M., Rebolledo, H. 2010. Evaluación del stock desovante de

- anchoveta y sardina común en la zona centro-sur, año 2009. Informe Final Proyecto FIP 2009-08. Agosto de 2010.
- Cubillos, L., L. Castro, G. Claramunt & E. Navarro. 2013. Evaluación del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, año 2012. Fip N° 2012-09. Instituto de Fomento Pesquero, Valparaíso, pp. 345.
- Chirichigno, N & Vélez, J. 1998. Clave para identificar los peces marinos del Perú. Publicación Especial del Instituto del Mar da del Perú. 2 Ed. Callao. 314 p
- Claramunt, G. & Herrera, G. 1994. A new method to estimate the fraction of daily spawning females and the numbers of spawnings in *Sardinops sagax* in northern Chile. Sci. Mar. (España) 58 (3), 169–177.
- Claramunt, G. & Roa, R., 2001. An indirect approach of estimating spawning fraction applied to *Sardinops sagax* from northern Chile. Sci. Mar. 65, 87–94.
- Claramunt, G., Roa, R., Cubillos, L.A., 2002. Estimating daily spawning fraction using the gonadosomatic index: application to three stocks of small pelagic fish from Chile. In: Kjesbu, O., Hunter, J., Withames, P. (Eds.), Modern Approaches to Assess Maturity and Fecundity of Warm- and Cold-Water Fish and Squids, Bergen, Norway, 2001, vol. 12. Fisker og Havet, pp. 43–49.
- Claramunt, G., Cubillos, L., Braun, M., Serra, R., Canales, M., Sanchez, J., Flores, A., Moreno, P., Riquelme, K., Castillo, C. & Valero, C. 2007. Mejoramiento del método de producción diaria de huevos aplicado en pequeños pelágicos. Informe Final FIP. 2033 pag.
- Claramunt, G., L Castro, L Cubillos, HJ Hirche & G Perez. 2012. Inter-annual reproductive trait variation and spawning habitat preferences of *Engraulis ringens* off northern Chile. Revista de biología marina y oceanografía.
- Claramunt, G., L.A. Cubillos, L. Castro, C. Hernández, M. Arteaga. 2014. Variation in the spawning periods of *Engraulis ringens* and *Strangomera bentincki* off the coasts of Chile: A quantitative analysis. Fisheries Research 160: 96–102.
- Clarke, A. J. (1983). The reflection of equatorial waves from oceanic boundaries. J. Phys. Oceanogr., vol. 13, pp. 1193-1207.
- Colas, F., Capet, X., McWilliams, J.C., Shchepetkin, A., 2008. 1997–98 El Niño off Peru: a numerical study. Prog. Oceanogr. 79, 138–155.
- Colas, F., McWilliams, J.C., Capet, X., Kurian, J., 2011. Heat balance and eddies in the Peru–Chile current system. Clim. Dyn.. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-011-1170-6>.
- Conejero, C. (2013). Variabilidad de baja frecuencia de las corrientes oceánicas en Chile central (30_S-38_S) mediante el uso del modelo numérico ROMS. (tesis de pregrado). Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Córdova, J., J. Castillo, A. Paillamán & S. Lillo, 1995. Evaluación del reclutamiento de anchoveta de la zona norte (I y II Regiones). En: Evaluación hidroacústica y distribución de recurso. FIP-IFOP. 100 pp.

- Cowen, R. K., Paris, C. B., Olson, D. B., and Fortuna, J. L. 2003. The role of long distance dispersal versus local retention in replenishing marine populations. *Gulf and Caribbean Research*, 14: 129–137.
- Cowen, R. K., Paris, C. B., and Srinivasan, A. 2006. Scaling of connectivity in marine populations. *Science*, 311: 522–527.
- Cubillos, L., H. Arancibia. 1993. On the seasonal growth of common sardine (*Strangomera bentincki*) and anchova (*Engraulis ringens*) off Talcahuano, Chile. *Rev. Biol. Mar. (Valparaíso)* 28(1), 43-49.
- Cubillos, L., M. Canales, D. Bucarey, A. Rojas y R. Alarcón. 1999. Época reproductiva y talla media de primera madurez sexual de *Strangomera bentincki* y *Engraulis ringens* en el período 1993-1997, zona centro-sur de Chile (1993-97). *Investigaciones Marinas, Valparaíso* 28:73-85.
- Cubillos, L.A., Arcos, D.F., Bucarey, D.A., Canales, M. 2001. Seasonal growth of small pelagic fish off Talcahuano (37°S-73°W), Chile: a consequence of their reproductive strategy to seasonal upwelling?. *Aquatic Living Resources* 14(2): 115-124.
- Cubillos, LA & Arcos, D. 2002. Recruitment of common sardine (*Strangomera bentincki*) and anchovy (*Engraulis ringens*) off central-south Chile in the 1990s and the impact of the 1997–1998 El Niño. *Aquat. Living Resour.* 15 (2002): 87–94.
- Cubillos LA, Ruiz P, Claramunt G, Gacitúa S, Núñez S, Castro LR, Riquelme K, Alarcón C, Oyarzún C, Sepúlveda A. 2007. Spawning, daily egg production, and spawning stock biomass estimation for common sardine (*Strangomera bentincki*) and anchovy (*Engraulis ringens*) off central southern Chile in 2002. *Fish. Res.* 86: 228–240.
- Cubillos, L., L. Castro, G. Claramunt & E. Navarro. 2013. Evaluación del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, año 2012. Fip N° 2012-09. Instituto de Fomento Pesquero, Valparaíso, pp. 345.
- Cury, P. 1994. Obstinate nature: an ecology of individuals. Thoughts on reproductive behavior and biodiversity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51: 1664–1673.
- Daewel, U., Peck, M. A., and Schrum, C. 2011. Life history strategy and impacts of environmental variability on early life stages of two marine fishes in the North Sea: an individual-based modelling approach. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 68: 426–443.
- Dalgaard, P. 2008. *Introductory Statistics with R*. Introductory Statistics with R. Series: Statistics and Computing. 2nd ed., 2008, XVI, 364 p. SpringerLink. ISBN 978-0-387-79053-4.
- Daubechies, I.: Ten lectures on wavelets, *J. Acoust. Soc. Am.*, 93, 1671, <https://doi.org/10.1121/1.406784>, 1992.

- DeAngelis, D. & V. Grimm. 2014. Individual-based models in ecology after four decades. *Prime Reports* 6:39.
- Del Pino, M. 2009. Aplicación de métodos estadísticos para explicar la conservación de las variables oceanográficas en el área de Chile y Perú. Tesis Ingeniería Estadística. Universidad del BíoBío, Chile.
- Deriso, R., Maunder, M., W. Pearson. 2008. Incorporating covariates into Fisheries Stock assessment models with application to Pacific Herring. *Ecological Applications*, 18(5), 1270-1286.
- Einarsson, H. & B. Rojas de Mendiola. 1963. Descripción de Huevos y larvas de anchoveta peruana (*Engraulis ringens*) *J. Bol.Inst.Rec.Mar.*, Callao, 1(1):1-23.
- Estienne, P & A Godard 1970. *Climatologie*. Armand Colin, París. 368 p.
- Espíndola, F. 2016. "Estatus y posibilidades de explotación biológicamente sustentables de los principales recursos pesqueros nacionales año 2016": Anchoveta XV - II Regiones. 169 pp.
- Fisher, J. B. & M. J. S. Tevesz. 1958. Distribution and population density of *Elliptio complanata* (Mollusca) in Lake Pocotopang. Connecticut. *The Veliger* 18: 332- 338.
- Fournier et al., 2012. AD Model Builder: using automatic differentiation for statistical inference of highly parameterized complex nonlinear models. *Optimization Methods and Software*. Volume 27, Issue 2, 2012
- Fuenzalida, R. W. Schneider, J. Garcés-Vargas & L. Bravo. 2008. Satellite altimetry data reveal jet-like dynamics of the Humboldt Current. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, c07043, doi:10.1029/2007jc004684.
- Fulton, E. A., Smith, A. D. M., and Smith, D. C. 2007. Alternative management strategies for southeast Australian commonwealth fisheries: stage 2: quantitative management strategy evaluation. Australian Fisheries Management Report.
- Gallego, A., North, E. W., and Petitgas, P. 2007. Introduction: status and future of modelling physical-biological interactions during the early life of fishes. *Marine Ecology Progress Series*, 347: 121-126.
- García, M. 1993. Fluctuaciones ambientales y su relación con pesquerías pelágicas del Pacífico suroriental. Tesis para optar al título de Ingeniero Pesquero, Esc. Cs. del Mar, UCV. Valparaíso. 104 pp.
- Gómez, F. 2008. Variabilidad ambiental y pequeños pelágicos de la zona norte y centro-sur de Chile. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias con mención en Pesquerías. Universidad de Concepción, 113 páginas.
- Gómez, F., A. Montecinos, S. Hormazábal, L.A. Cubillos, M. Correa-Ramírez & F.P. Chávez. 2012. Impact of spring upwelling variability off southerncentral Chile on common sardine (*Strangomera bentincki*) recruitment. *Fish. Oceanogr.*, 21(6): 405-414.
- Goubanova, K., Echevin, V., Dewitte, B., Codron, F., Takahashi, K., Terray, P., Vrac, M., 2011. Statistical downscaling of sea-surface wind over the Peru-Chile upwelling

- region: diagnosing the impact of climate change from the IPSLCM4 model. *Clim. Dyn.* <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-010-0824-0>.
- Grimm, V., E. Revilla, U. Berger, F. Jeltsch, W.M. Mooij, S.F. Railsback, H.H. Thulke, J. Weiner, T. Wiegand, D.L. DeAngelis. 2005. Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: lessons from ecology *Science*, 310, pp. 987–991.
- Hare, J. A., & R. K. Cowen. 1991. Expatriation of *Xyrichtys novacula* (Pisces: Labridae) larvae: Evidence of rapid crossslope exchange. *J. Mar. Res.* 49: 801–823.
- Hastie, T.J. & R.J. Tibshirani. 1986. Generalized Additive Models. *Stat. Sci.*, 1: 297–318.
- Hill, A. E., B. M. Hickey, F. A. Shillington, P. T. Strub, K. H. Brink, E. D. Barton, & A. C. Thomas (1998). Eastern Ocean Boundaries. *The Sea*, vol. 11, A. R. Robinson and K. H. Brink (Eds.), pp. 29–67, John Wiley, Hoboken, N. J.
- Hinrichsen, H-H., Mollmann, C., Voss, R., Koster, F. W., and Kornilovs, G. 2002. Biophysical modelling of larval Baltic cod (*Gadus morhua*) growth and survival. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59: 1858–1873.
- Hormazábal, S, G Shaffer, J Letelier & O Ulloa 2001. Local and remote forcing of the sea temperature in the coastal upwelling system off Chile. *Journal of Geophysical Research*. 106 (C8): 16657–16671.
- Hormazábal, S., G. Shaffer & O. Leth 2004. The coastal transition zone off Chile. *Journal of Geophysical Research*. 109 (C01021): doi:10.1029/2003JC001956.
- Hunter, J. R. 1977. Behavior and survival of northern anchovy *Engraulis mordax* larvae. Technical report, La Jolla, USA.
- Huyer, A., M. Knoll, T. Paluzkiewicz, & R. L. Smith. 1991. The Peru Undercurrent: A study in variability. *Deep-Sea Res.*, vol. 39, pp. 247–279.
- Isern-Fontanet, J., E. Garcia-Ladona, and J. Font. 2003. Identification of marine eddies from altimetric maps, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 20, 772 – 778.
- Isern-Fontanet, J., E. Garcia-Ladona, and J. Font. 2006. Vortices of the Mediterranean Sea: An altimetric perspective, *J. Phys. Oceanogr.*, 36, 87 – 103.
- Jobling, M. 1994. *Fish Bioenergetics*. Chapman & Hall, London. 309 pp.
- Jones, G. P., Planes, S., and Thorrold, S. R. 2005. Coral reef fish larvae settle close to home. *Current Biology*, 15: 1314–1318.
- Keister, J. E., E. Di Lorenzo, C. A. Morgan, V. Combes, and W. T. Peterson .2011. Zooplankton species composition is linked to ocean transport in the northern California Current, *Global Change Biol.*, doi:10.1111/
- Kaiser, G. A. 1994. *friendly guide to wavelets*. Boston: Birkhauser, 1994. 325 p.
- Kell, L. T., Mosqueira, I., Grosjean, P., Fromentin, J-M., Garcia, D., Hillary, R., Jardim, E., et al. 2007. FLR: an open-source framework for the evaluation and development of management strategies. *ICES Journal of Marine Science*, 64: 640–646.

- Kell, L. T., Dickey-Collas, M., Hintzen, N. T., Nash, R. D. M., Pilling, G. M., and Roel, B. A. 2009. Lumpers or splitters? Evaluating recovery and management plans for metapopulations of herring. *ICES Journal of Marine Science*, 66: 1776–1783.
- Kelly, K.A. 1985. The influence of winds and topography on the surface temperature patterns over the northern California slope. *J. Geophys. Res.*, 90: 11,783–11,798
- Krautz, MC., Vásquez, S., Castro, L., González, M., Llanos-Rivera, A. & S. Pantoja. 2010. Changes in metabolic substrates during early development in anchoveta *Engraulis ringens* (Jenyns 1842) in the Humboldt Current. *Mar. Biol.* 157: 1137-1149.
- Landaeta, M. & L. Castro. 2013. Vertical distribution and gas bladder inflation/deflation in postlarval anchoveta *Engraulis ringens* during upwelling events. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, doi:10.1017/S0025315411001767
- Large, W. G., & S. Pond. 1981. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J. Phys. Ocean.*, 11, 324-481.
- Letelier, J., O. Pizarro & S. Núñez. 2009. Seasonal variability of coastal upwelling and the upwelling front off central Chile. *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/2008JC005171.
- Letelier, J. 2010. Surgencia y estructuras de mesoescala frente a Chile (18°-42°S). Tesis para optar al grado de doctor. Universidad de Concepción. Escuela de post-grado. 99 p.
- Leth, O., & G. Shaffer. 2001. A numerical study of the seasonal variability in the circulation off central Chile. *J. Geophys. Res.*, vol. 106, pp. 22229-22248, doi:10.1029/2000JC000627
- Leth, O., & J. F. Middleton. 2004. A mechanism for enhanced upwelling off central Chile: eddy advection. *J. Geophys. Res.*, vol. 109, C12020, doi:10.1029/2003JC002129
- Lett, C., Verley, P., Mullon, C., Parada, C., Brochier, T., Penven, P., Blanke, B. 2008. A Lagrangian tool for modelling Ichthyoplankton dynamics. *Environment Modelling & Software*. 23(9):1210-1214.
- Llanos-Rivera, A. 2005. Variabilidad de las características de los estadios tempranos de *Engraulis ringens* entre zonas de desove a lo largo de Chile. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Biológicas, Área Zoología. Universidad de Concepción, 154 páginas.
- Lloyd, M. 1967. Mean crowding. 1. *Anim. Ecol.* 36:1-30.
- Lo, N.C.H., 1985. A model for temperature – dependent Northern anchovy egg development and an automated procedure for the assignment of age to staged eggs. In: Lasker, R. (Ed.), *A Egg Production Method for Estimating Spawning Biomass of Pelagic Fish: Application to the Northern Anchovy, Engraulis mordax*. NOAA Technical Report NMFS 36, pp. 43–50.
- Martínez, C, L. Caballero, U. Parker, M.G. Böhm, J. Oliva, V. Fernández, S. Peña, R. Gili, H. Hidalgo, P. Barría, R. Serra y M. Nilo. 1995. Diagnóstico de las principales

- pesquerías pelágicas zona norte en 1994. Estado de situación y perspectivas del recurso. Convenio CORFO-IFOP. Chile. 135 p.
- Martínez, C., M.G. Böhm., E. Díaz., F. Cerna., M. Ayala., R. Aravena., H. Reyes., M. Troncoso., V. Bocic., C. Machuca y L. Muñoz. 2007. Programa: Seguimiento del Estado de Situación de las Principales Pesquerías Nacionales. Proyecto: Investigación de la Situación de la Pesquería Pelágica de la Zona Norte, 2006 – Informe Final. Convenio SUBPESCA - IFOP. Instituto Fomento Pesquero Valparaíso, Chile.
- Marchesiello, P., J. McWilliams, & A. Shchepetkin. 2003. Equilibrium structure and dynamics of the California Current System. *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 33, pp. 753-783.
- Marchesiello, P., S. Herbet, L. Nykjaer, & C. Roy. 2004. Eddy-driven dispersion processes in the Canary Current upwelling system: Comparison with the California system. *Globec Int. Newsl.*, vol. 10, pp. 5-7.
- Matsuura, Y. & Kitahara, E. 1995. Horizontal and vertical distribution of anchovy *Engraulis anchoita* eggs and larvae off Cape Santa Marta Grande in southern Brazil. *Archive of Fishery and Marine Research*, 42(3):239-250.
- Megrey, B. & Hinckley, S. 2001. Effect of turbulence on feeding of larval fishes: a sensitivity analysis using an individual-based model. *ICES Journal of Marine Science*, 58: 1015–1029. doi:10.1006/jmsc.2001.1104.
- Miller, T. J. 2007. Contribution of individual-based coupled physical–biological models to understanding recruitment in marine fish populations. *Marine Ecology Progress Series*, 347: 127–138.
- Moler, 1984. MATLAB Version 1.0. Meeting of the IEEE Conference on Decision and Control, the CDC, Las Vegas, United States.
- Montecinos, A., Leth, O., Pizarro, O., 2007. Wind-driven interdecadal variability in the eastern tropical and South Pacific. *Journal of Geophysical Research* 112. doi:10.1029/2006JC003571.
- Morales, C.E., H. González, S. Hormazábal, G. Yuras, J. Letelier & L.R. Castro 2007. The distribution of chlorophyll-a and dominant planktonic components in the coastal transition zone off Concepción, central Chile, during different oceanographic conditions *Progress in Oceanography*. 75 (3): 452-469.
- Moreno, P., Claramunt, G. & L. Castro. 2011. Transition period from larva to juvenile in anchoveta *Engraulis ringens*. Length or age related?. *Journal of Fish Biology* 78, 825–837.
- Nakata, H., S. Kimura, Y. Okazaki & A. Kasai. 2000. Implications of meso-scale eddies caused by frontal disturbances of the Kuroshio Current for anchovy recruitment. *ICES J. Mar. Sci.*, 57: 143-152.
- Naveas, 2010. Geología Marina de Chile, capítulo 4 “El margen continental chileno”. Comité Oceanográfico Nacional. 20 pp.

- Okubo, A., (1970). Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences. *Deep-Sea Res.*, 17, 445–454.
- Ospina-Álvarez, A., Parada, C., Palomera, I. 2012. Vertical migration effects on the dispersion and recruitment of European anchovy larvae: from spawning to nursery areas. *Ecol. Mod.* 231:65–79. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2012.02.001
- Ospina-Alvarez, A., Bernal, M., Catalán, I.A., Roos, D., Bigot J.L., et al. . 2013. Modeling Fish Egg Production and Spatial Distribution from Acoustic Data: A Step Forward into the Analysis of Recruitment. *PLoS ONE* 8(9): e73687. doi:10.1371/journal.pone.0073687.
- Ospina-Alvarez, Catalán, I., Bernal, M., Roos, D. & I. Palomera. 2015. From egg production to recruits: Connectivity and inter-annual variability in the recruitment patterns of European anchovy in the northwestern Mediterranean. *Progress in Oceanography* 138 (2015) 431–447.
- Palma, W., R. Escribano, & S.A. Rosales. 2006. Modeling study of seasonal and inter-annual variability of circulation in the coastal upwelling site of the El Loa River off northern Chile. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 67, 93–107.
- Palumbi, S. R. 2001. The ecology of marine protected areas. In *Marine Community Ecology*, pp. 509–530. Ed. by M. D. Bertness, S. D. Gaines, and M. E. Hay. Sinauer Press, Sunderland, MA.
- Parada, C., Mullon, C., Roy, C., Fréon, P., Hutchings, L., Van der Lingen, C. 2008. Does vertical migratory behaviour retain fish larvae onshore in upwelling ecosystems? A modeling study of anchovy in the southern Benguela. *African Journal of Marine Science* 30 (3), 437-452.
- Parada, C., Colas, F., Soto-Mendoza, S., Castro, L. 2012. Effects of across- and alongshore transport seasonal variability of anchoveta (*Engraulis ringens*) larvae on modeled-based pre-recruitment indices off central Chile. *Progress in Oceanography* (92-95). doi:10.1016/j.pocean.2011.07.015.
- Parada, C, B Yannicelli, S Hormazábal, S Vásquez, J Porobić, B Ernst, C Gatica, M Arteaga, A Montecinos, S Núñez & A Gretchina 2013. Variabilidad ambiental y recursos pesqueros en el Pacífico suroriental: estado de la investigación y desafíos para el manejo pesquero. *Latin American Journal of Aquatic Research*. 41 (1): 1-28.
- Penven, P., Debreu, L., Marchesiello, P., McWilliams, J. C. 2006. Evaluation and application of the ROMS 1-way embedding. procedure to the central California upwelling system. *Ocean Modelling*.12(1-2): 157–187.
- Penven, P., P. Marchesiello, L. Debreu & J. Lefevre. 2007. Software tools for pre- and post processing of oceanic regional simulations. *Environ. Model. Softw.*, 23: 2007-2009.
- Pineda J, Hare JA, Sponaugle S. 2007. Larval transport and dispersal in the coastal ocean and consequences for population connectivity. *Oceanography* 20:22–39
- Pizarro, O., S. Hormazábal, A. González & E. Yáñez. 1994. Variabilidad del viento, nivel del mar y temperatura en la costa norte de Chile. *Invest. Mar.* 22: 83-101.

- Pizarro, O., A. J. Clarke, & S. Van Gorder. 2001. El Niño sea level and currents along the South American coast: Comparison of observations with theory. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 1891{1903, 2001.
- Pizarro, O., G. Shaffer, B. Dewitte, & M. Ramos. 2002. Dynamics of seasonal and interannual variability of the Peru-Chile Undercurrent. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 10.1029/2002GL014, 790, 2002.
- Pizarro, O. & A. Montecinos. 2004: Interdecadal variability of the thermocline along the west coast of South America. *Geophysical Research Letters*. 31, L20307, doi: 101029/2004GL020998.
- Quinn, T., R. Deriso. 1999. *Quantitative Fish Dynamics*, Oxford University Press, 542 p.
- R Core Team. 2012. *R: A Language and environment for statistical computing*. Reference index v.2.15.1. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 84
- Reiss, H., Hoarau, G., Dickey-Collas, M., and Wolff, W. J. 2009. Genetic population structure of marine fish: mismatch between biological and fisheries management units. *Fish and Fisheries*, 10: 361–395.
- Reyes, H., Valenzuela, V., Moreno, P., Azocar, C., Pizarro, M., Claramunt, G., Herrera, G., Diaz, E., Böhm, M., Espindola, F., Saavedra, J.C., & V. Catasti. 2014. Evaluación del stock desovante de anchoveta en la XV, I y II Regiones, año 2013. Informe Fina., 529 pp.
- Reynolds, R. W., 1988: A real-time global sea surface temperature analysis. *J. Climate*, 1, 75–86.
- Rockmann, C., Dickey-Collas, M., Payne, M. R., and van Hal, R. 2011. Realized habitats of early-stage North Sea herring: looking for signals of environmental change. *ICES Journal of Marine Science*, 68: 537–546.
- Rose, K. A. , Fiechter, J., Curchitser, E. N., Hedstrom, K., Bernal, M., Creekmore, S., Haynie, A., Ito, S., Lluch-Cota, S., Megrey, B. A., Edwards, C. A., Checkley, D., Koslow, T., McClatchie, S., Werner, F., MacCall, A., Agostini, V., (2015). Demonstration of a fully-coupled end-to-end model for small pelagic fish using sardine and anchovy in the California Current, *Progress in Oceanography*, 138, 348-380.
- Shaffer, G., S. Hormazabal, O. Pizarro, & S. Salinas. 1999. Seasonal and interannual variability of currents and temperature off central Chile. *J. Geophys. Res.*, vol. 104, pp. 29951–29961
- Scheffer, M., Baveco, M.J., DeAngelis L.D., Rose, A.K., van Nes H. 1995. Super-individuals: a simple solution for modelling large populations on an individual basis. *Ecol Model* 80:161–170.
- Shchepetkin, A.F. & J.C. McWilliams. 2003. A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate, *J. Geophys. Res.*, 108 (C3), 3090, doi:10.1029/2001JC001047.

- Shchepetkin, A. F., McWilliams, J. C. 2005. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4): 347-404. doi:10.1016/j.ocemod.2004.08.002.
- Serra, J.R. 1978. La pesquería de sardina común (*Clupea (Strangomera) bentincki*) y anchoveta (*Engraulis ringens*) de Talcahuano: análisis de su desarrollo y situación actual. *Invest. Pesq. (Chile)*, 29: 1-21.
- Serra, R., M. Aguayo, O. Rojas, J. Cañón y F. Inostroza. 1979. Anchoveta *Engraulis ringens* (Jenyns) Teleostomi Clupeiformes Engraulidae. In: «Estado actual de las principales pesquerías nacionales. Bases para un desarrollo pesquero: I Peces». CORFO-IFOP (AP-79/18), 52 pp.
- Serra, J.R. 1983. Changes in the abundance of pelagic resources along the Chilean coast. In: G. Sharp & J. Csirke (eds.). *Proceedings of the expert consultation to examine changes in abundance and species composition of neritic fish resources*. FAO Fish. Rep., 291: 255-284.
- Silva, N., & S. Neshyba. 1979. On the southernmost extension of the Peru-Chile Undercurrent. *Deep-Sea Res.*, vol. 26, pp. 1387-1393
- Sinclair, M. 1988. *Marine Populations. An Essay on Population Regulation and Speciation*. Washington Sea Grant Program, University of Washington Press, Seattle. 252 pp.
- Soto-Mardones, L, A Pares-Sierra & R Durazo 2004. Ekman modulation of the sea-surface temperature on the eastern south Pacific. *Deep Sea Research II*. 51: 551-561.
- Soto-Mendoza, S., C. Parada, L. Castro, F. Colas & W. Schneider. 2012. Modeling transport and survival of anchoveta eggs and yolk-sac larvae in the coastal zone off central-southern Chile: Assessing spatial and temporal spawning parameters. *Prog. Oceanogr.*, 92(1): 178-191.
- Staaterman, E. R., Paris, C. B., and Helgers, J. 2012. Orientation behavior in fish larvae: a missing piece to Hjort's critical period hypothesis. *Journal of Theoretical Biology*, 304: 188-196.
- Stevens, D.P. & P.D. Willworth. 1992. The distribution of kinetic in the Southern Ocean: a comparison between observations and an Eddy resolving general circulation model. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B(1992)*, 338: 251-257.
- Strub, P. T., J. M. Mesias, & C. James. 1995. Altimeter observations of the Peru-Chile countercurrent. *Gephys. Res. Lett.*, vol. 22, pp. 211-214.
- Strub, P. T., V. Montecino, J. Rutllant, & S. Salinas. 1998. Coastal ocean circulation off western south America. *The Sea*, vol. 11, A. R. Robinson and K. H. Brink (Eds.), pp. 273-314, John Wiley, Hoboken, N. J.
- SUBPESCA, 2016. Informe Sectorial de Pesca y Acuicultura. www.subpesca.cl. 18 pp.
- Swartzman G, Stuetzle W, Kulman K, Wen N. 1994. Modeling the distribution of fish schools in the Bering Sea: morphological school identification. *Nat Res Model* 8:177-194.

- Thomas, A., J.L. Blanco, M. Carr, P. Strub & J. Osses. 2001a. Satellite-measured chlorophyll and temperature variability off northern Chile during the 1996-1998 La Niña y El Niño. *J. Geophys. Res.* 106 (N° C1): 899-915.
- Thomas, A. C., M. E. Carr & P. T. Strub. 2001b. Chlorophyll variability in eastern boundary currents, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3421–3424.
- Thorrold, S. R., Latcozy, C., Swart, P. K., and Jones, C. M. 2001. Natal homing in a marine fish metapopulation. *Science*, 291: 297–299.
- Vásquez, S. 2012. Modelación de la historia de vida temprana del jurel (*Trachurus murphyi*) en el Pacífico suroriental: influencia de factores biofísicos en la conectividad de zonas de desove-crianza. Tesis de Magister en Pesquerías. Universidad de Concepción, Concepción, 144 pp.
- Vásquez, S., Sepúlveda, A., Salas, C., Núñez, S., Gretchina, A., Ospina-Álvarez, A. 2016. Biophysical modelling to assess population connectivity and inter-annual variability in the recruitment patterns of jack mackerel in the southeastern Pacific. 4th Meeting of the Scientific Committee. 28 September - 3 October 2015, La Haya, Netherlands.
- Vásquez, S., Salas, C., Núñez, S., Soto-Mardones, L., Letelier, J., Arteaga, M., Gatica, C., Sepúlveda, A., Cisterna, L., Gretchina, A., Alegría, N., Contreras, P. & Ospina-Álvarez, A. Estimación de índices de reclutamiento basado en variables y modelos biofísicos de pelágicos pequeños de la zona centro-sur de Chile, Fase II. Informe Final proyecto FIP 2014-33. 314 pp.
- Vikebø, F., Sundby, S., A° dlandsvik, B., and Ottera°, O. 2007. Impacts of a reduced THC on transport and growth of larvae and pelagic juveniles of Arcto-Norwegian cod. *Fisheries Oceanography*, 16: 216–228.
- von Storch, H., Zwiers, F. W., 1999. *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press.
- Weiss J (1991) The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics. *Phys D* 48: 273–294.
- Werner, F. E., Perry, R. I., Lough, R. G., and Naimie, C. E. 1996. Trophodynamics and advective influences on Georges Bank larval cod and haddock. *Deep Sea Research II*, 43: 1793–1822.
- Wood, S.N. & N.H. Augustin. 2002. GAMs with integrated model selection using penalized regression splines and applications to environmental modelling. *Ecological Modelling*, 157 (2-3), pp. 157-177.
- Wood, S. 2008. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. February 27, 2006 by Chapman and Hall/CRC Textbook - 410 Pages - 103 B/W Illustrations.
- Yáñez, E., Barbieri, M.A., Montecinos, A. 1990. Relaciones entre las variaciones del medio ambiente y las fluctuaciones de los principales recursos pelágicos explotados en la zona de Talcahuano, Chile. En: *Perspectivas de la actividad pesquera en Chile*. M.A. Barbieri (Ed.) Escuela de Ciencias del Mar, Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso: 49-62.

- Yáñez, E., Barbieri, M.A., Santillán, L. 1992. Long-term environmental variability and pelagic fisheries in Talcahuano, Chile. In: Payne, A.I., Brink, L., Mann, K.H., Hilborn, R. (Eds.), Benguela Trophic Functioning. *S. Afr. J. Mar. Sci.* 12, 175-188.
- Yáñez, E., A. González & M.A Barbieri. 1995. Estructura térmica superficial del mar asociada a la distribución espacio-temporal de sardina y anchoveta en la zona norte de Chile entre 1987 y 1992. *Invest. Mar.*, Valparaíso, 23: 123-147.
- Yáñez, E., M.A. Barbieri, C. Silva, K. Nieto & F. Espíndola. 2001. Climate variability and pelagic fisheries in northern Chile. *Prog. Oceanogr.*, 49: 581-596.
- Yáñez, E., C. Silva, A. Órdenes, F. Gómez, A. Valdenegro, N. Silva, S. Hormazábal, A. Montecinos, L. Cubillos, F. Espíndola y O. Pizarro. 2005. Análisis integrado histórico ambiente – recursos, I y II Regiones. Informe Final FIP N° 2003–33. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Yáñez, E., S. Hormazábal, C. Silva, A. Montecinos, M.A. Barbieri, A. Valdenegro, A. Órdenes & F. Gómez. 2008. Coupling between the environment and the pelagic resources exploited off northern Chile: ecosystem indicators and a conceptual model. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 36(2): 159-181.

Anexo I. Acta de reunión de coordinación con Subsecretaría de Pesca

RESÚMEN DE REUNIÓN DE COORDINACIÓN PROYECTO FIPA 2016-55

Según las bases técnicas del Proyecto FIPA 2016-55 "Dinámica poblacional de la anchoveta XV-II Regiones a través de modelación bio-física, año 2016" (punto 5.8 (i)) se realizó la reunión de coordinación del proyecto en dependencias del Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura en la ciudad de Valparaíso, con fecha 13 de diciembre de 2016.

La finalidad de esta reunión fue exponer el plan de trabajo, alcances, metodologías y procedimientos relevantes para el logro de cada uno de los objetivos específicos del proyecto. Según lo establecido en el numeral 5.8 (i) de las Bases Técnicas del proyecto, el consultor debe elaborar un acta de la reunión de coordinación, en la cual se registren los principales temas tratados y los participantes de la misma, y ser enviada al director ejecutivo del FIPA en un plazo no superior a 5 días de realizada la reunión de coordinación.

Asistentes a la reunión de coordinación

Sr. Luis Carroza (FIPA)

Sra. Malú Zavando (FIPA)

Sr. Mario Acevedo (SUBPESCA)

Sr. Sebastián Vásquez (INPESCA)

Sr. Sergio Núñez (INPESCA)

La reunión se desarrolló entre las 15:05-17:00 horas. El relato de las actividades y tareas comprometidas para cada uno de los objetivos específicos, fue realizado principalmente por S. Vásquez (jefe de proyecto).

Los principales temas tratados fueron los siguientes:

1.- Objetivo específico 1. Desarrollar e implementar un sistema de modelación biofísica para la anchoveta del stock compartido Chile-Perú, que acople y conecte modelos biológicos con un modelo hidrodinámico de alta resolución costera para la zona de estudio, validado para la región norte de Chile, que integre los forzantes físicos de alta frecuencia (mareas, vientos, entrada de agua dulce, etc), en escalas adecuadas que reproduzcan las condiciones oceanográficas de anchoveta en la región para el período 1994-2016.

1.1. Se explicó detalladamente el objetivo específico 1, enfatizando la importancia del mejoramiento de los forzantes para el modelo hidrodinámico (especialmente el forzante viento), que resultan críticos para la región norte de Chile.

1.2. Se detalla la metodología de validación del modelo hidrodinámico, tanto en el dominio padre (dominio mayor) como en el sub-dominio anidado (dominio hijo) que tendrá una resolución de 3 Km para la región costera. Se hace hincapié que proceso de validación necesitará datos observados de variables oceanográficas (cruceiros acústicos, MOBIO y de MPDH entre otros), cuyas bases de datos se solicitarán formalmente a la SubPesca y FIPA. A este respecto, se indica que el mandante se comprometió a gestionar de la mejor manera la entrega de información asociada a esta solicitud.

1.3. El dominio hijo (mayor resolución) contendrá forzantes asociados a la marea y el ingreso de agua dulce continental.

1.4. El consultor indica que realizará un experimento piloto (no contenido en las bases) para la implementación de un modelo bio-geoquímico para el área de estudio. Cabe consignar que este modelo tendrá una resolución espacial y temporal limitada, por lo que no debe ser considerado como un resultado principal del estudio. No obstante, esto constituye un avance en la línea de investigación asociada al proyecto.

1.5. Ante la consulta acerca de las capacidades computacionales necesarias y suficientes para desarrollar el estudio en los plazos convenidos, se indica que el consultor cuenta con una arquitectura computacional importante para el proyecto, la que será mejorada mediante

la ejecución de esta investigación (adquisición y mejoras de componentes computacionales).

2.- Objetivo específico 2. Modelar el proceso de transporte, crecimiento y sobrevivencia de estadíos tempranos de anchoveta, y su efecto sobre la variabilidad del reclutamiento, identificando regiones fuente y sumidero de juveniles y reclutas de anchoveta.

2.1. Se indicó en forma detallada el esquema de trabajo en la modelación, considerando a Ichthyop como la principal herramienta de acoplamiento entre el modelo hidrodinámico y modelos biológicos.

2.2. Se indica la importancia de contar con información realista para inicializar cada uno de los módulos del modelo biofísico. Se hace hincapié en la necesidad de contar con las bases de datos asociadas a: 1) distribución espacial de huevos y larvas de anchoveta asociadas a los cruceros MPDH, 2) información asociada al seguimiento reproductivo de anchoveta en el período 1994-2016 para la zona norte. El consultor indica que esta información pudiese ser complementada con datos provenientes del seguimiento que realiza CIAM y la experiencia de investigadores UNAP, asociados al proyecto. No obstante, es importante contar con la información oficial (IFOP-Subpesca). A este respecto, se indica que el mandante se comprometió a gestionar de la mejor manera la entrega de información asociada a esta solicitud.

2.3. Se señaló que en este objetivo se realizará el experimento de acoplamiento con el modelo bio-geoquímico, para indagar sobre el proceso de alimentación/predación.

3.- Objetivo específico 3. Obtener índices asociados al reclutamiento de la anchoveta, independientes de la estimación acústica, entre la XV y II Regiones, y comparar con índices de reclutamiento provenientes de otras fuentes de información (e g., modelos estadísticos para la evaluación de stock, indicadores asociados a la pesquería).

- 3.1. Se indicó que la generación de indicadores de reclutamiento biofísico es altamente dependiente de la información de entrada indicada en el punto anterior. Por esta razón se recalca la importancia del punto 2.2, donde el consultor identificó detalladamente las fuentes de información.
- 3.2. Se establece la necesidad de contar con los resultados de la evaluación de stock oficial (IFOP) más reciente de anchoveta en la zona norte de Chile, para ser contrastada con los resultados del modelo biofísico. Cabe hacer notar que el consultor no realiza una evaluación de stock independiente sobre este recurso. A este respecto, se indica que el mandante se comprometió a gestionar de la mejor manera la entrega de información asociada a esta solicitud.
- 3.3. Se establece la necesidad de contar con los resultados de las evaluaciones acústicas realizadas sobre el reclutamiento de anchoveta en la región norte de Chile (IFOP). El consultor señala que las bases de datos del FIP no siempre se encuentran disponibles en el estado más avanzado de procesamiento, por lo que se solicita al mandante gestionar la obtención de dicha información al IFOP. A este respecto, se indica que el mandante se comprometió a gestionar de la mejor manera la entrega de información asociada a esta solicitud.
- 3.4. Ante la consulta del mandante respecto de la continuidad de la zona de desove de la anchoveta hacia el Perú, y la factibilidad de modelación, se discute que las bases no contemplan esta zona como objeto de investigación, y que la modelación se restringirá a los desoves de anchoveta observados en el mar chileno. Experiencias anteriores respaldan la dificultad de obtención de información desde el Perú, aun cuando recientemente se han establecido Talleres conjuntos de colaboración (especialmente en temas reproductivos).
- 3.5. Se indica que el equipo de trabajo del proyecto incluye también la experiencia de profesionales vinculados al estudio de la dinámica de la anchoveta del norte de Chile por varias décadas, incrementando la experiencia del grupo de trabajo sobre el recurso

en estudio, e incluye información complementaria asociada a programas de seguimiento independientes y proyectos de investigación sobre anchoveta.

4.- Objetivo específico 4. Identificar los principales forzantes biofísicos y oceanográficos-atmosféricos que modulan el proceso de crecimiento, sobrevivencia, transporte de huevos y larvas de anchoveta, y finalmente la variabilidad del reclutamiento.

4.1. Se detallan las fuentes de información y metodologías asociadas a este objetivo específico. Se hace hincapié en la necesidad de obtener información oceanográfica desde cruceros de investigación (RECLAN, MOBIO, MPDH, otros), por lo que se hará la solicitud oficial respectiva a la Subpesca. A este respecto, se indica que el mandante se comprometió a gestionar de la mejor manera la entrega de información asociada a esta solicitud.

4.2. El consultor indica que se desarrollará un módulo teórico asociado al cambio climático y la modificación del hábitat de anchoveta, y su efecto en la historia de vida temprana de anchoveta en el norte de Chile. Este punto no está incluido en las bases', y se incorpora como un avance en la línea de investigación. No obstante, no constituye un foco central de investigación y sus resultados se entregarán en un anexo.

5.- Objetivo específico 5. Identificar patrones de conectividad desde la(s) zona(s) de desove hacia todas las posibles áreas de crianza/reclutamiento, incluyendo en área costera de Chile y Perú.

5.1. Ante la consulta respecto a la relación entre la zona de desove de Chile y todas las potenciales áreas de crianza, se discute que el modelo hidrodinámico incluirá tanto el mar chileno como peruano, para analizar los posibles patrones de conectividad transzonales.

5.2. Ante la consulta acerca la existencia de un desove secundario en el mes de Febrero, se señala que la metodología para identificar la temporada de desove que se utilizará en este estudio es la señalada en el seno del Comité científico de pequeños pelágicos, la cual debiese responder a este respecto.

6.- Objetivo específico 6. Proponer un modelo conceptual de la historia de vida de la anchoveta entre la XV y II Regiones, dando énfasis a procesos biofísicos relevantes en la historia temprana de la especie.

6.1. Se detalla y discute que el grupo de trabajo del proyecto cuenta con equipo multidisciplinario (oceanografía física/biológica, seguimiento pesquero, procesos reproductivos, ictioplancton, evaluación de stock, modelación hidrodinámica y biofísica), con experiencia sobre el estudio de anchoveta. Esta experiencia se pondrá a disposición de este objetivo específico, por medio de un taller de discusión destinado al establecimiento de un modelo conceptual adecuado a la especie en el norte de Chile, rescatando los principales resultados del proyecto.

6.2. Se señala y detalla que al interior del grupo de trabajo se cuenta con la participación de científicos expertos internacionales y nacionales, especialmente asociados a las áreas de: modelación hidrodinámica y bio-geoquímica, modelación biofísica, módulo experimental de cambio climático y dinámica del reclutamiento.

Anexo II. Acta resumen reunión de organización inter-institucional, Iquique, mayo de 2017.

PROYECTO FIPA #2016-55

“Dinámica poblacional de la anchoveta XV-II Regiones a través de modelación biofísica”

ACTA

RESUMEN DE REUNIÓN DE TRABAJO Y COORDINACIÓN

1.- Presentación

El presente documento entrega una síntesis de la Reunión de Trabajo y Coordinación del Grupo de Trabajo asociado al proyecto FIPA #2016-55 "Dinámica poblacional de la anchoveta XV-II Regiones a través de modelación biofísica, realizada en Iquique los días 8 y 9 de Mayo de 2017, en la que participaron representantes de la Universidad Arturo Prat, el Centro de Investigación Aplicada del Mar y el Instituto de Investigación Pesquera.

Se resume los aspectos más relevantes de la revisión de los principales tópicos analizados en la reunión, la modalidad de coordinación científica como Grupo de Trabajo multidisciplinario e inter-institucional, los principales acuerdos científicos y operativos, y la revisión y análisis de los principales insumos hacia la modelación biofísica, desde los datos y análisis hasta la experiencia de las instituciones en los ámbitos de los procesos de desove y reclutamiento de anchoveta en el sector norte de Chile, la dinámica del proceso reproductivo, la información ictioplanctónica y biológica-pesquera, la información oceanográfica y operacional de pesca, así como la discusión científica para abordar temáticas consideradas como brechas de conocimiento y análisis de anchoveta en Chile, y determinar las bases para un modelo conceptual de la historia de vida de anchoveta en la región norte del país.

Lugar: Sala de reuniones de Centro de Investigación Aplicada del Mar (CIAM), Iquique.

Fecha: 8-9 de mayo de 2017.

Asistencia a la reunión:

a) Universidad Arturo Prat (UNAP): Sra. Liliana Herrera, Sr. Gabriel Claramunt.

g

b) Centro de Investigación Aplicada del Mar (CIAM): Sr. Carlos Merino, Sr. Jorge Oliva, Sr. Mauricio Braun.

c) Instituto de Investigación Pesquera (Inpesca): Sr. Aquiles Sepúlveda, Sr. Sergio Núñez, Sr. Sebastián Vásquez.

2.- Agenda de la Reunión

Con el propósito de dar a conocer detalles del proyecto, y estandarizar sus objetivos, metas y alcances al Grupo de Trabajo, la agenda de la reunión contempló el siguiente temario general:

- 1.- Presentación del proyecto. Metas, objetivos, alcances.
- 2.- Enfoque de modelación biofísica y modelo conceptual de anchoveta en región norte.
- 3.- Identificación de problemáticas específicas
- 4.- Identificación de insumos hacia el modelo biofísico.
- 5.- Coordinación y disponibilidad de datos.
- 6.- Carta Gantt con actividades principales e hitos del proyecto.
- 7.- Plan de trabajo.
- 8.- Agenda de acuerdos y compromisos.

En virtud del temario precitado, la reunión de trabajo incluyó las siguientes presentaciones con el propósito de dar a conocer distintos aspectos necesarios para la organización y desarrollo del proyecto, a saber:

Lunes 8 de mayo (tarde)		
Hora	Tema	Expositor
09:30-09:45	Palabras de bienvenida. Modalidad de trabajo en reunión.	A. Sepúlveda
09:55-10:15	Presentación del proyecto: Enfoques, objetivos, alcances	S. Vásquez
10:15-11:00	El enfoque de modelación biofísica y la dinámica poblacional de anchoveta en el norte de Chile.	S. Vásquez
11:00-11:45	Insumos necesarios para la modelación biofísica.	S. Vásquez
11:45-12:15	Posibilidades de abordar brechas de conocimiento en relación al desove y reclutamiento de anchoveta en el norte de Chile.	S. Núñez

12:15-12:30	Requerimientos del proyecto a instituciones participantes.	S. Núñez
12:30-13:30	Síntesis de información de aspectos reproductivos e ictioplantónicos de anchoveta en la zona norte de Chile.	G. Claramunt (UNAP)
13:30-14:30	Almuerzo en sala	
14:30-15:30	Síntesis de información operacional, biológico-pesquera e ictioplantónica de anchoveta en la zona norte de Chile.	C. Merino, J. Oliva, M. Braun (CIAM)
15:30-16:30	Establecimiento de protocolo de trabajo: datos y análisis hacia el proyecto.	S. Vásquez
16:30-18:00	Discusión y acuerdos	Todos
Martes 9 de mayo (mañana)		
09:00-12:00	Opiniones y discusión para un modelo conceptual de la historia de vida de anchoveta en la zona norte de Chile.	A. Sepúlveda (moderador)

DÍA 1: 8 DE MAYO DE 2017

3.- Bienvenida e Introducción

Carlos Merino, Director del Centro de Investigación Aplicada del Mar (CIAM), da la bienvenida a los participantes, esperando que esta reunión de trabajo sea fructífera para el desarrollo del proyecto.

Aquiles Sepúlveda, Director del Instituto de Investigación Pesquera, da también la bienvenida a la Reunión de Trabajo del proyecto FIPA #2016-55, agradeciendo la participación de los representantes de la Universidad Arturo Prat y del Centro de Investigación Aplicada del Mar (CIAM), y especialmente a Carlos Merino por otorgar las facilidades de uso de las instalaciones de CIAM en Iquique para realizar la reunión.

Asimismo, establece que el objetivo de la reunión de trabajo se enmarca principalmente en el ámbito de la organización y coordinación del Grupo de Trabajo inter-institucional, sus

experiencias, conocimiento y capacidades en las diferentes temáticas que involucra el enfoque de modelación biofísica bajo condiciones realistas, hacia el entendimiento de la dinámica poblacional de anchoveta en el norte de Chile.

Expone que la modalidad de la reunión de trabajo incluye, en primer lugar, una exposición de los objetivos, alcances y enfoques de la modelación biofísica, enfatizando la importancia de los insumos ambientales, biológicos y pesqueros hacia la modelación, para posteriormente otorgar el espacio de presentación, análisis y discusión de las diferentes entidades participantes del proyecto sobre aspectos clave, tales como la naturaleza, tipo y extensión espacial y temporal de los datos, el re-análisis de información existente bajo el marco de nuevas preguntas y enfoques, aspectos operacionales, y la discusión sobre procesos relevantes (desove, reclutamiento, otros), para finalizar con un análisis preliminar sobre las bases para generar un modelo conceptual de la historia de vida de anchoveta en el norte de Chile. Se enfatiza sobre el marco de eficiencia que esta modalidad de trabajo entrega para el logro de los objetivos de la reunión.

4.- Presentación del proyecto y aspectos principales de la modelación biofísica

Sebastián Vásquez, jefe de proyecto, realiza una presentación del proyecto FIPA #2016-55, donde detalla los diferentes objetivos específicos, y los alcances que este nuevo enfoque de modelación biofísica tiene hacia el manejo de recursos pesqueros, destacando:

- El desarrollo de un modelo hidrodinámico ROMS (versión Agrif) de alta resolución, que se ha levantado en el período 1994-2016, y que incluye la región norte de Chile y centro-sur del Perú. Se establece la relevancia de un buen modelo hidrodinámico para los resultados de transporte y conectividad posteriores.
- Los conceptos de fuente-sumidero en el proyecto, vinculados con desove-reclutamiento.
- La necesidad de identificar los principales forzantes biofísicos y climático-oceanográficos que modulan los procesos de crecimiento, sobrevivencia, transporte, y finalmente la variabilidad del reclutamiento de anchoveta.

- Que el proyecto establecerá índices de reclutamiento espacialmente explícitos, e independientes de la evaluación acústica realizada anualmente en la región, los cuales podrán ser contrastados.
- La identificación de patrones de conectividad desove/reclutamiento incluyendo la región costera del norte de Chile y centro-sur del Perú.

Asimismo, en su exposición comenta los principales resultados esperados del proyecto:

- Validación del modelo hidrodinámico.
- Síntesis de la información biológica que sustenta el modelo biofísico.
- Perú se considera en este caso como sumidero y no una región fuente, por lo que se podría modelar el sector centro-sur del Perú a través de un análisis climatológico, aunque formalmente la idea es modelar el norte de Chile.
- Identificar patrones de conectividad y trayectorias de desplazamiento principales.
- Establecer información de sobrevivencia en fase larval y de juveniles.

Asimismo, se analiza y destaca la importancia que tiene para el manejo, el contar con información de reclutamiento conocido.

SV da a conocer la labor de expertos internacionales hacia el proyecto, principalmente en las temáticas asociadas a modelo hidrodinámico, modelo biofísico, experimentos para sentar bases de modelación incluyendo NPZ, entre otros.

SN indica que además de la modelación biofísica, el objetivo específico vinculado con la oceanografía cuenta también con un grupo de trabajo reforzado con colegas de experiencia en la oceanografía costera de la región norte de Chile.

Se discute sobre algunos puntos clave especialmente en relación a las zonas de desove y reclutamiento, eventual recurrencia espacial, funcionamiento como centros de acción biológica, transporte y conectividad, etc.

Respecto de la exposición de la modelación biofísica:

- L. Herrera (LH) señala que por primera vez se enfrenta a un enfoque en que le parece que los resultados serán de real utilidad para abordar problemáticas relevantes hacia el manejo.

- LH consulta si se cree entonces que el reclutamiento y su variabilidad se verifica sólo asociada a la hidrodinámica?, argumentando la importancia de algunos forzantes biológico no muy estudiados en Chile como es la alimentación en las diferentes fases de desarrollo.

- En este punto S. Vásquez (SV) y S. Núñez (SN) explican que las condiciones realistas del modelo biofísico también involucra la biología, y que en el desarrollo del proyecto aspectos como la dinámica de la alimentación, se pondrá a prueba en el modelo como un experimento piloto (no comprometido en la propuesta) a través de las bases para la modelación NPZ (nutrientes-fitoplancton-zooplancton) con la ayuda de un experto internacional.

-G. Claramunt (GC) indica que ante la incerteza o el desconocimiento, también se pueden establecer escenarios y contrastarlo con lo finalmente observado.

- GC y M. Braun (MB) señalan que el río Loa no aparece como un factor relevante (en términos de su caudal y aporte de nutrientes) para ser considerado como una región recurrente de desove. SN indica que reunión reciente de expertos sobre anchoveta reveló que no hay claridad si las hembras tienen zonas recurrentes donde desovar... Si existen sitios permanentes de desove cabe la interrogante si el ambiente jugaría o no un rol relevante en la variabilidad espacial de desove.

- GC indica su preocupación por que los MPDH son modelados pero no se conoce el antes y el después, y está también el escenario de que el crecimiento influye en los nacidos, por ejemplo, en el verano.

- A este respecto, GC señala el paradigma del crecimiento en esta especie, que en base a información recientemente publicada, diferentes fases de desarrollo de esta especie

parecieran crecer a una tasa mucho mayor de lo considerado en la actualidad. Preguntas tales como si el desove corresponde a ejemplares de 1 año o 6 meses de edad quedan a la discusión.

- SN señala que varias temáticas discutidas hasta el momento, y por ende, que están en el dominio de la modelación biofísica, se han tratado hace unos meses atrás en el Taller de Brechas de Conocimiento de Anchoveta, que reunió a más de 25 científicos para identificar problemáticas no resueltas en la biología y ecología de la especie.

5.- Insumos necesarios para la modelación biofísica

S. Vásquez detalla los principales insumos (y su importancia) para desarrollar una modelación biofísica bajo condiciones realistas. Se destaca lo siguiente: a) la información necesaria para la validación regional del modelo hidrodinámico, b) la información histórica de la abundancia y distribución espacial y estacional (en algunos casos) de huevos y larvas de anchoveta en el norte de Chile, c) la determinación histórica de área de reclutamiento y desove, d) datos operacionales de lances de pesca (distribución y captura), entre otros.

SV informa al grupo que los datos necesarios serán solicitados oficialmente al FIPA y a otras instancias de la administración, desde todas las fuentes de datos disponibles. Se ha identificado como fuente principal de información a: a) cruceros MPDH de anchoveta en la zona norte, b) cruceros acústicos de anchoveta en la zona norte, c) cruceros acústicos de jurel en la zona norte, d) cruceros MOBIOs en la zona norte de Chile, e) información de campañas independientes (especialmente de CIAM), f) otras fuentes.

En relación a esto, CM indica que CIAM mantiene sus datos en una base de datos que se almacena en Amazon Redshift, utilizando SQL Client para hacer las consultas y solicitar análisis y graficación. Se llama TABLEAU (big data) y tiene una base de salida mediante consultas. Toda la data pesquera y ambiental está en este sistema. Los datos biológicos no están en esta base de datos. Existe un grillado del área en 3x3 mn, los datos existen desde el

año 2005. Se invita al Sr. Oscar Latorre a integrarse a la reunión para entregar detalles al grupo del funcionamiento de la base de datos y sus principales características.

GC y LH señalan que los cruceros MPDH se han efectuado en prácticamente toda la serie histórica basándose en un monitoreo previo, por lo que el inicio del crucero es consistente con el estado reproductivo del recurso. Sólo en el año 2016, se juntó el MPDH con el MOBIO y por eso se generaron algunos inconvenientes logísticos en el establecimiento de la fecha de inicio de la evaluación. El crucero de MPDH ha modificado la grilla.

SV indica que es posible delinear un procedimiento bajo el cual desde los datos operacionales se pueda generar un índice de reclutamiento operacional, utilizando los datos de operación sobre anchoveta en la región norte de Chile.

6.- Brechas de conocimiento de anchoveta

SN expone sobre la posibilidad de abordar en el presente proyecto, algunas brechas de conocimiento y análisis identificadas por un grupo de expertos en Taller de Brechas de Conocimiento de Anchoveta, realizado en septiembre de 2016 en Iquique.

Se señala que el enfoque de este tipo de proyectos, hacen posible el poder abordar las siguientes temáticas a la fecha identificadas como brechas de conocimiento y análisis en el recurso anchoveta:

- Privilegiar el trabajo integrado multi-disciplinario e inter-institucional.
- Recurrencia (o no) de zonas de desove de anchoveta en el norte de Chile.
- Variabilidad en el inicio-duración-término del período reproductivo.
- Modelación del período transición larval-juvenil.
- Patrones de variabilidad ambiental y proceso de desove.
- Indicadores de reclutamiento espacialmente explícitos independientes de capturas y no correlacionado a priori con evaluación stock, e integrador de características demográficas

de la población y variabilidad ambiental, como promisorios de reclutamientos conocidos en ciclo de manejo de anchoveta.

- Variabilidad del reclutamiento (escala espacio-temporal).
- Relaciones ambiente-recurso (diferentes escalas).

7.- Revisión de los requerimientos técnicos (data y análisis) de entidades participantes

SN expone detalladamente los diferentes requerimientos técnicos identificados para cada una de las entidades participantes en el proyecto, a saber: Universidad Arturo Prat y Centro de Investigación Asociada del Mar.

Una síntesis de lo anterior se establece a continuación:

CIAM

- a) Indicadores reproductivos de anchoveta en la región norte de Chile. (estados de madurez sexual, IGS, factor de condición) en diferentes escalas de variabilidad (mensual, semanal, diaria). Se discute el período real de información.
- b) Distribución y densidad de huevos y larvas de anchoveta en la región norte de Chile. Se discute el período real de información.
- c) Distribución y abundancia de juveniles y reclutas de anchoveta en la región norte de Chile. Se discute el período real de información.
- d) Indicadores asociados al reclutamiento (zonas recurrentes y "timing") de anchoveta en la región norte de Chile.
- e) Información operacional de pesca e indicadores biológico-pesqueros de anchoveta en la región norte de Chile.

UNAP

- a) Distribución espacial (horizontal y vertical) y densidad de huevos y larvas de anchoveta en la región norte de Chile. Se discute sobre el período real de información.
- b) Información de frecuencia de desove de anchoveta por temporada reproductiva en la

región norte de Chile Se discute sobre el período real de información.

c) Funciones de crecimiento y de desarrollo (temperatura-dependiente) de huevos/larvas de anchoveta en la región norte de Chile.

d) Identificación de factores críticos en la historia de vida temprana de la anchoveta de la región norte de Chile.

8.- Exposición de Gabriel Claramunt. Síntesis de información de aspectos reproductivos e ictioplantónicos de anchoveta en la zona norte de Chile.

En su exposición, GC destaca:

- En la serie de indicadores provenientes desde el laboratorio de G. Claramunt, se detecta una disminución permanente o secuencial en la talla media de la fracción desovante después del año 2000 (antes era más alta) hacia la actualidad. Sin embargo, este rasgo no es tan notorio en los pesos medios de la fracción desovante de los cruceros MPDH.

La duda es si las hembras "gordas, viejas y fecundas" no se encuentran o se han estado perdiendo. ¿Por qué está ocurriendo esto?.

- Establece el uso de metodologías diferentes en el análisis reproductivo desde el año 2007.

- Analiza y discute aspectos relevantes en el análisis reproductivo de anchoveta como: a) determinación del máximo reproductivo, frecuencia diaria de desovantes, folículos post-ovulatorios, indicadores macroscópicos.

- Se discute sobre el modelo de desarrollo a la temperatura (el mismo en todas las zonas N. CS., y distintos estudios). Al parecer la hora de desove bastante clara (un desove), no obstante GC señala su preocupación respecto de la zona centro-sur, donde cree existen dos desoves o grupos de desove al atardecer.

Asimismo, indica la existencia de protocolos de muestreo bi-etápicos, y que en el marco de los cruceros MPDH, parece ser que huevos y larvas de anchoveta son consistentes en el espacio.

Nuevamente se destaca la necesidad de visitar el paradigma del crecimiento de anchoveta, ya que se ha establecido recientemente que el crecimiento es mucho más rápido de lo esperado.

El grupo de trabajo discute ampliamente sobre estas temáticas.

9.- Exposición de CIAM (M. Braun, C. Merino, J. Oliva). Síntesis de información operacional, biológico-pesquera e ictioplantónica de anchoveta en la zona norte de Chile.

En su exposición, los colegas del CIAM destacan:

- En octubre de 2014 CIAM inició un muestreo mensual de huevos y larvas, en tres transectas perpendiculares a la línea de costa situadas en la costa norte de Chile, esto es: Arica, Iquique y Mejillones, con la estación más costera a las 2 mn. Las variables medidas aparte del muestreo planctónico, se establece en el registro vertical de la temperatura, salinidad, concentración de oxígeno disuelto y de clorofila-a.

- Asimismo, CM y JO detallan y analizan los datos operacionales asociados a la pesca de anchoveta en la región norte de Chile, y se discute la opción de estimar un índice de reclutamiento desde los datos de operación sobre anchoveta en la región norte de Chile.

- JO detalla la información de CIAM sobre indicadores reproductivos de anchoveta, y la experiencia del grupo en la determinación del máximo reproductivo hacia Julio, Agosto, Septiembre. Asimismo, MB presenta y analiza información acerca de la variabilidad espacial de huevos de anchoveta.

- Los colegas de CIAM señalan la importancia de revisar la fracción diaria de hembras desovantes como un indicador relevante que muestra una disminución en la fracción desovante a través del tiempo.

- JO analiza la historia de vida basado en consideraciones temporales y espaciales. A su juicio, existen sitios recurrentes (el Loa, Arica, Mejillones, zona hacia Taltal), lo que orienta hacia la posibilidad de cierta estructura poblacional. En este sentido, tal como lo ha planteado recientemente el colega Santander, es posible pensar en un modelo de fidelidad reproductiva en pequeños pelágicos.

- MB y LH indican que en estos sitios recurrentes puede existir una cierta capacidad de carga, que hace que los individuos migren a estos lugares.

- Se discute por el grupo de trabajo la limitada capacidad de tener observaciones continuas desde sensores remotos, destacando la necesidad de utilizar los datos generados *in situ* para la validación en especial de la distribución vertical de las variables oceanográficas. En especial, se plantean dificultades con los indicadores de productividad de la columna de agua.

10.- Otros temas

El grupo de trabajo discute otros temas relacionados con el proyecto, a saber:

- Alimentación. LH, CM, SN, MB discuten la importancia de la alimentación y la asignación energética en relación a las fases de desarrollo y la oferta ambiental. Vuelve a ser relevante el hecho de que las diatomeas son claves en la entrega de ácidos grasos Omega-3 a la anchoveta.

- Se señala y analiza la generación de índices semanales de proporción de reclutas y pre-reclutas con observaciones desde los ecosondas (porcentaje juveniles y adultos), y su utilidad como base de buenas prácticas en la operación pesquera.

- En relación a eventos cálidos El Niño se señala: a) que condiciones post-El Niño favorecen los desoves y su éxito reproductivo posterior (1 o 2 años), b) un evento El Niño restringe la distribución de huevos hacia la costa?, c) los períodos post-El Niño muestran una extensión mayor del desove (incremento en el área de puesta), d) condiciones de contracción hacia la costa pueden ser favorables al éxito en el reclutamiento.

- Se discute sobre la fase de post larvas y primeros juveniles, y el período de escamación para nadar activamente.

- CM y JO indican que indicadores de grasas desde las bases de datos operacionales pueden constituir un muy buen indicador del período reproductivo.

- AS señala, asimismo, la importancia de hacer conversar este tipo de estudios de carácter multidisciplinario e integrativo, con una base bio-económica que se oriente a las bases de enfoques de tipo ecosistémico.

Finalmente, se concluye que existe una buena percepción de parte de los miembros del grupo de trabajo en relación a las salidas que pueden emerger desde el proyecto. El proyecto tendrá un carácter de ordenador y permitirá un trabajo muy comprensivo e integrador hacia la multidisciplinaria y diferentes escalas de variabilidad. Resalta que el modelo de trabajo debe basarse en la generación de conocimiento.

La reunión en el primer día de trabajo finaliza a las 18:15 horas.

DÍA 1: 9 DE MAYO DE 2017

El Grupo de Trabajo se reúne desde las 09:00 horas en dependencias de CIAM, para revisar principalmente opiniones y discusión hacia un modelo conceptual de la historia de vida de anchoveta en la zona norte de Chile.

Se trabaja en modalidad de mesa redonda sobre el tema, recogiendo las opiniones de todos los participantes.

AS sostiene que es conveniente el aproximarse al modelo conceptual desde el comienzo del proyecto, y que este es un tema que relaciona a todo el Grupo de Trabajo.

Se indica la necesidad de solicitar a la brevedad a los colegas Carlos Montenegro y Mauricio Gálvez, la base de datos a Ifop que ya se encuentran identificados, sobre aspectos reproductivos de anchoveta en la región norte de Chile.

Finalmente, se establecen las estrategias de coordinación del grupo, se detalla opciones de periodicidad en las reuniones de trabajo, y se establece la necesidad de contar con un sitio virtual que sirva de repositorio del GT, para el almacenado de datos, informes, literatura, etc., entre otros.

Finaliza la reunión a las 12:00 horas.

11. Registro Fotográfico de la Reunión



**Anexo III. Taller de discusión de resultados inter-institucional INPESCA, CIAM,
UNAP.**



Taller de trabajo proyecto

"Dinámica poblacional de la anchoveta XV-II regiones a través de modelación biofísica, año 2016"

Financia: Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura

Ejecuta: INPESCA - UNAP - CIAM

Jefe de proyecto: Sebastián Vásquez Pastene

Iquique, lunes 11 y martes 12 de junio de 2018

Lugar: Centro de Investigación Aplicada del Mar (CIAM)

Programa Día 1

09:30 – 09:45:	Presentación de los objetivos y resultados esperados del Proyecto FIP 2016-55. <i>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</i>	13:00 - 15:00:	Almuerzo
09:50 – 10:30:	Modelación Biofísica I: Esquema de modelación biofísica, aproximación metodológica y productos generados. <i>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</i>	15:00 – 16:00:	Modelación Biofísica II: Proceso de transporte, patrones de conectividad y dinámica del reclutamiento de anchoveta en la zona norte de Chile. <i>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</i>
10:35 – 11:10:	Modelación hidrodinámica del sector costero del norte de Chile y sur de Perú, período 1994-2016. <i>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</i>	16:00 – 17:00:	Agenda abierta
11:15 – 12:15:	Discusión aspectos metodológicos		
12:20 – 13:00:	Identificación de forzantes oceanográficos del sector costero del norte de Chile y sur de Perú asociada al transporte de estadios tempranos de anchoveta. <i>Seraio Núñez E. (INPESCA)</i>		

Programa Día 2

09:30 – 10:00:	Síntesis de los principales resultados modelación biofísica y discusión día 1. <i>Sergio Núñez E. (INPESCA)</i>	13:00 - 15:00:	Almuerzo
10:05 – 10:30:	Alcances del proyecto FIPA 2016-55 hacia la reducción de brechas de conocimiento en anchoveta norte. <i>Sergio Núñez E. (INPESCA)</i>	15:00 – 18:00:	Trabajo conjunto hacia el establecimiento de índices de reclutamiento basados en modelación biofísica y delimitamiento de un modelo conceptual de la estructura del stock de anchoveta en la zona norte de Chile
10:35 – 11:00:	Breve análisis de la evaluación de stock y determinación de status de anchoveta entre XV y II regiones. <i>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</i>		
11:05 – 13:00:	Agenda abierta		

Registro fotográfico de la actividad



Anexo IV. Taller de presentación y discusión de resultados, Iquique, 03 de julio de 2018.



Taller de presentación y discusión de resultados proyecto FIPA 2016-55

"Dinámica poblacional de la anchoveta XV-II regiones a través de modelación biofísica, año 2016"

Financia: Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura

Ejecuta: INPESCA - UNAP - CIAM

Jefe de proyecto: Sebastián Vásquez Pastene

Iquique, martes 03 de julio de 2018, 09:00 hrs

Lugar: Salón Iquique, Hotel Diego de Almagro, Iquique, Chile

Programa

09:30 – 10:00:	¿Cómo prepararnos ante un escenario de cambio global desde un punto de vista de las pesquerías?: el uso de modelos de la historia de vida temprana de las especies marinas para entender respuestas poblacionales a cambios medioambientales. <i>Andrés Ospina-Álvarez (IMEDEA, España)</i>	11:15 – 11:45:	PAUSA
10:00 – 10:15:	Presentación del Proyecto FIP 2016-55 <i>Aquiles Sepúlveda (INPESCA)</i>	11:45 – 12:15:	Implementación de un modelo hidrodinámico validado para el Pacífico suroriental con foco en la zona norte de Chile y sur de Perú, periodo 1994-2016 <i>Cristian Salas (INPESCA)</i>
10:15 – 10:45:	Estado Actual de la Pesquería de Anchoveta (<i>Engraulis ringens</i>) en la Zona Norte de Chile <i>Jorge Oliva (CIAM)</i>	12:15 – 12:45:	Forzantes físicos asociados al transporte, crecimiento y sobrevivencia de estadios tempranos de anchoveta. <i>Sergio Núñez (INPESCA)</i>
10:45 – 11:15:	Biología reproductiva y productividad de anchoveta en el norte de Chile. <i>Gabriel Claramunt (UNAP)</i>	12:45 – 13:15:	Modelación Biofísica: proceso de transporte, patrones de conectividad y dinámica espacial del reclutamiento de la anchoveta. <i>Sebastián Vásquez (INPESCA)</i>
		13:15 – 14:00:	Discusión y Conclusiones.



Taller de presentación y discusión de resultados proyecto FIPA 2016-55

"Dinámica poblacional de la anchoveta XV-II regiones a través de modelación biofísica, año 2016"

Nombre	Institución	E-mail	Firma
JORGE OLIVA LÓPEZ	CIAM	joliva@ciam.uchile.cl	[Firma]
Gabriel Claracumt	UNAP	gclaracumt@unap.cl	[Firma]
Juan TORRES S	CIAM	Jtorres@ciam.uchile.cl	[Firma]
CRISTIAN SALAS	INPESEA	csalaso@inpesea.cl	[Firma]
Andrés Ospina	CSIC (España)	aospina@me.com	[Firma]
Sergio Núñez Eche	Inst. Inv. República	snunez@inpesea.cl	[Firma]
Miriamela Núñez	UNAP	miriamn@unap.cl	[Firma]
Jessica Peñalillo P.	UNAP	jpenalillo.pastene@unap.cl	[Firma]
Diego Lizama A.	CIAM	dlizama@ciam.uchile.cl	[Firma]
Roberto Añón	CIAM APOA	rañon@ciam.uchile.cl	[Firma]
Mauricio Pizarro	CIAM	mpizarro@ciam.uchile.cl	[Firma]
Jeanette Aguero	UNAP	jeanetteaguero@gmail.com	[Firma]
Jessica Pizarro	UNAP	jpizarro@unap.cl	[Firma]
RODRIGO LEANDRO ESTEBAN B.	SENAPESEA	lesteban@senapesea.cl	[Firma]
Patricko Rivas Deville	✓	privas@senapesea.cl	[Firma]
MARINA GUTIERREZ M.	✓	mgutierrez@senapesea.cl	[Firma]



Taller de presentación y discusión de resultados proyecto FIPA 2016-55

"Dinámica poblacional de la anchoveta XV-II regiones a través de modelación biofísica, año 2016"

Nombre	Institución	E-mail	Firma
Paola Doreno G.	UNAP	paolmoreno@gmail.com	<i>[Handwritten signature]</i>
Cristina Aguirre	UNAP	CAPOCASE@UNAP.CL	<i>[Handwritten signature]</i>
Pedro Pizano F.	UNAP	ppizano@unap.cl	<i>[Handwritten signature]</i>
Willy Oyarzabal B.	SUBPESCA	woyarzabal@subpesca.cl	<i>[Handwritten signature]</i>
Brunetto Serrano H. E.	SUBPESCA	bserrano@subpesca.cl	<i>[Handwritten signature]</i>
Juan Luis Villalón L.	SUBPESCA	svillalon@subpesca.cl	<i>[Handwritten signature]</i>
Edgardo Santuado	UNAP	esantuado@unap.cl	<i>[Handwritten signature]</i>
Marianne Lichtenberg	IFOP	mlichtenberg@ifop.cl	<i>[Handwritten signature]</i>
Graciela Pérez Mora	IFOP	gperez@ifop.cl	<i>[Handwritten signature]</i>
EDUARDO DÍAZ L.	IFOP	eduardo.diaz@ifop.cl	<i>[Handwritten signature]</i>
Alexis García	UNAP	agarcia@unap.cl	<i>[Handwritten signature]</i>
Liliana Herrera C.	UNAP	lherrera@unap.cl	<i>[Handwritten signature]</i>
Oscar Latorre	CIAM	olatorre@ciam.uchile.cl	<i>[Handwritten signature]</i>

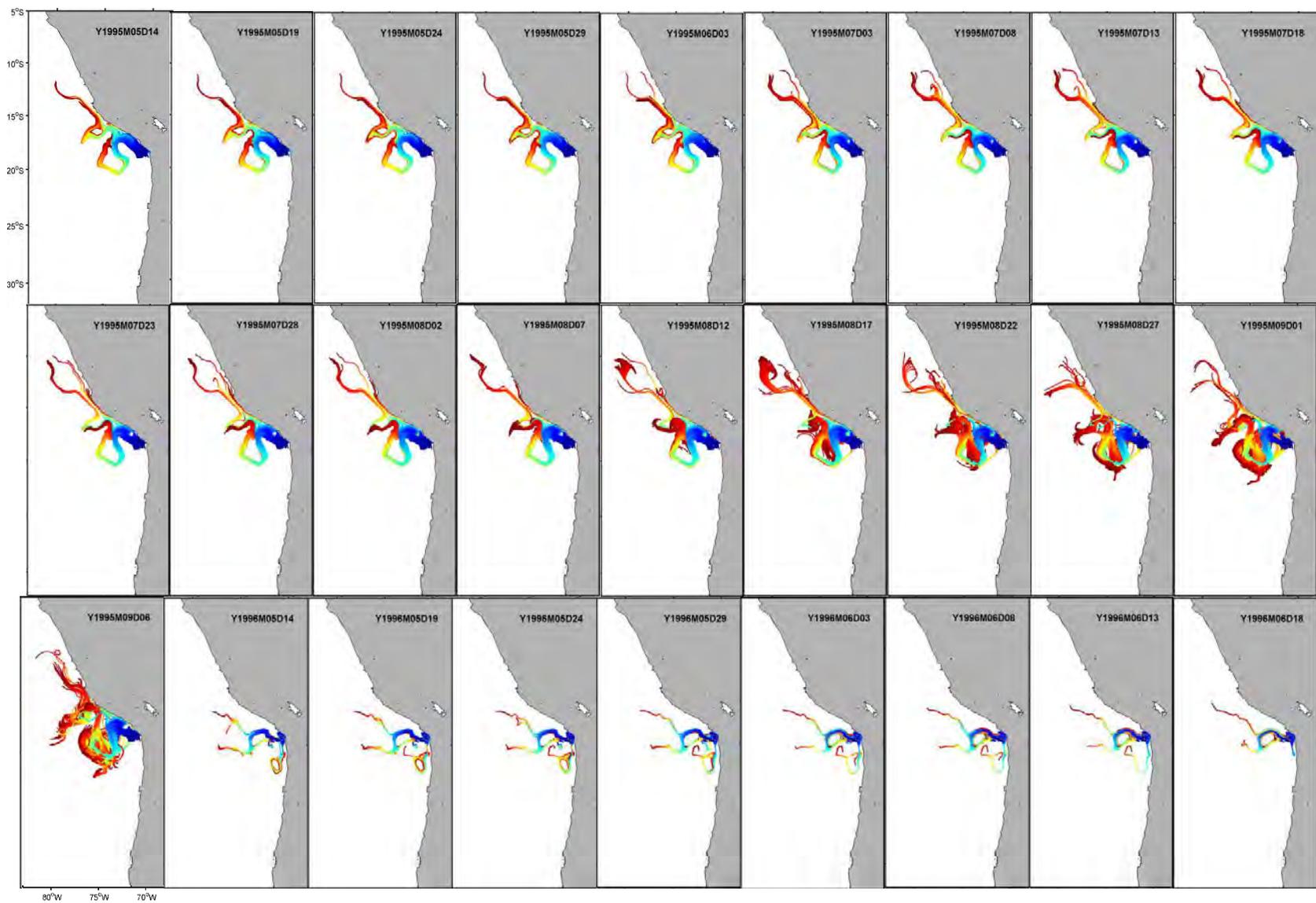
Registro fotográfico de la actividad

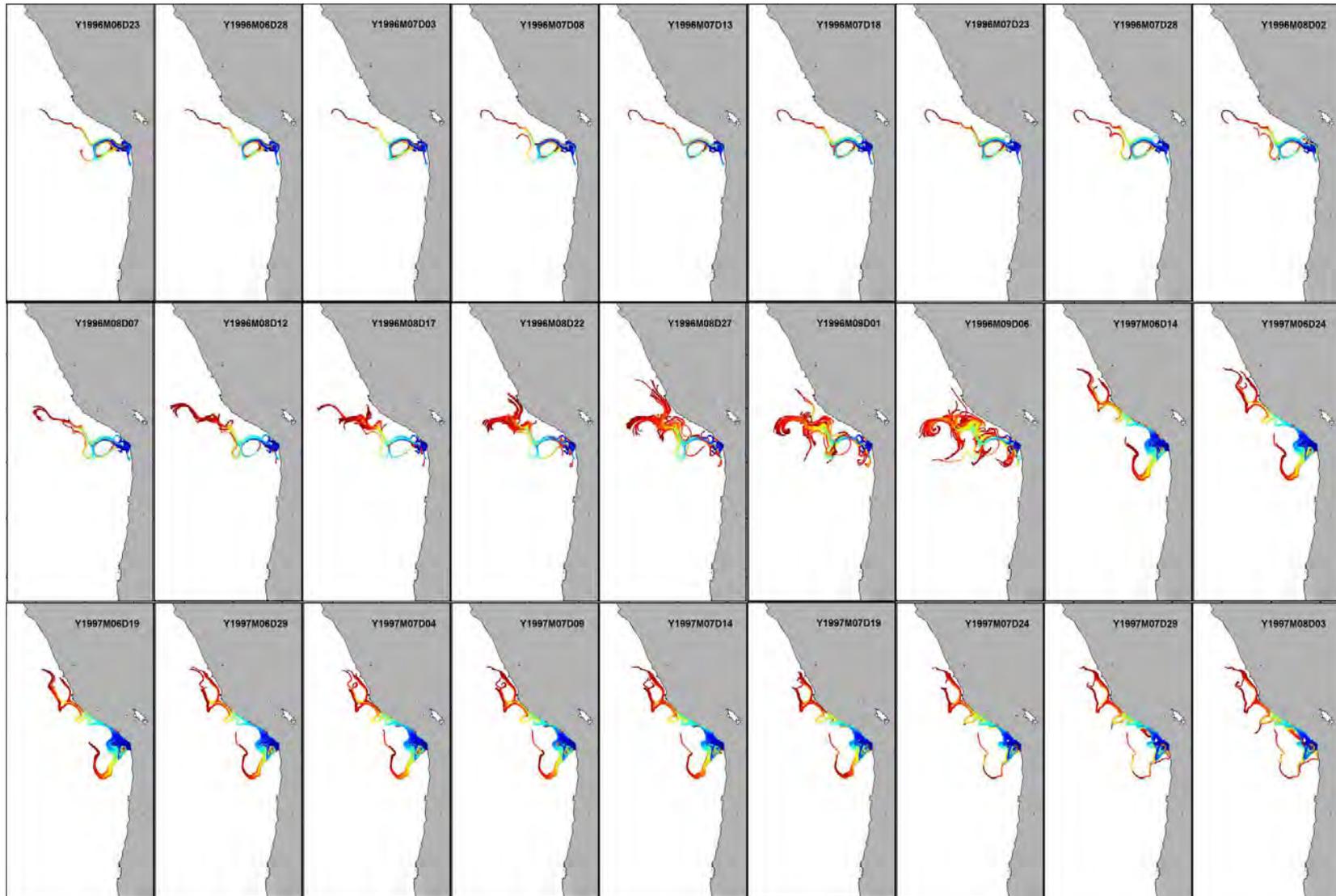


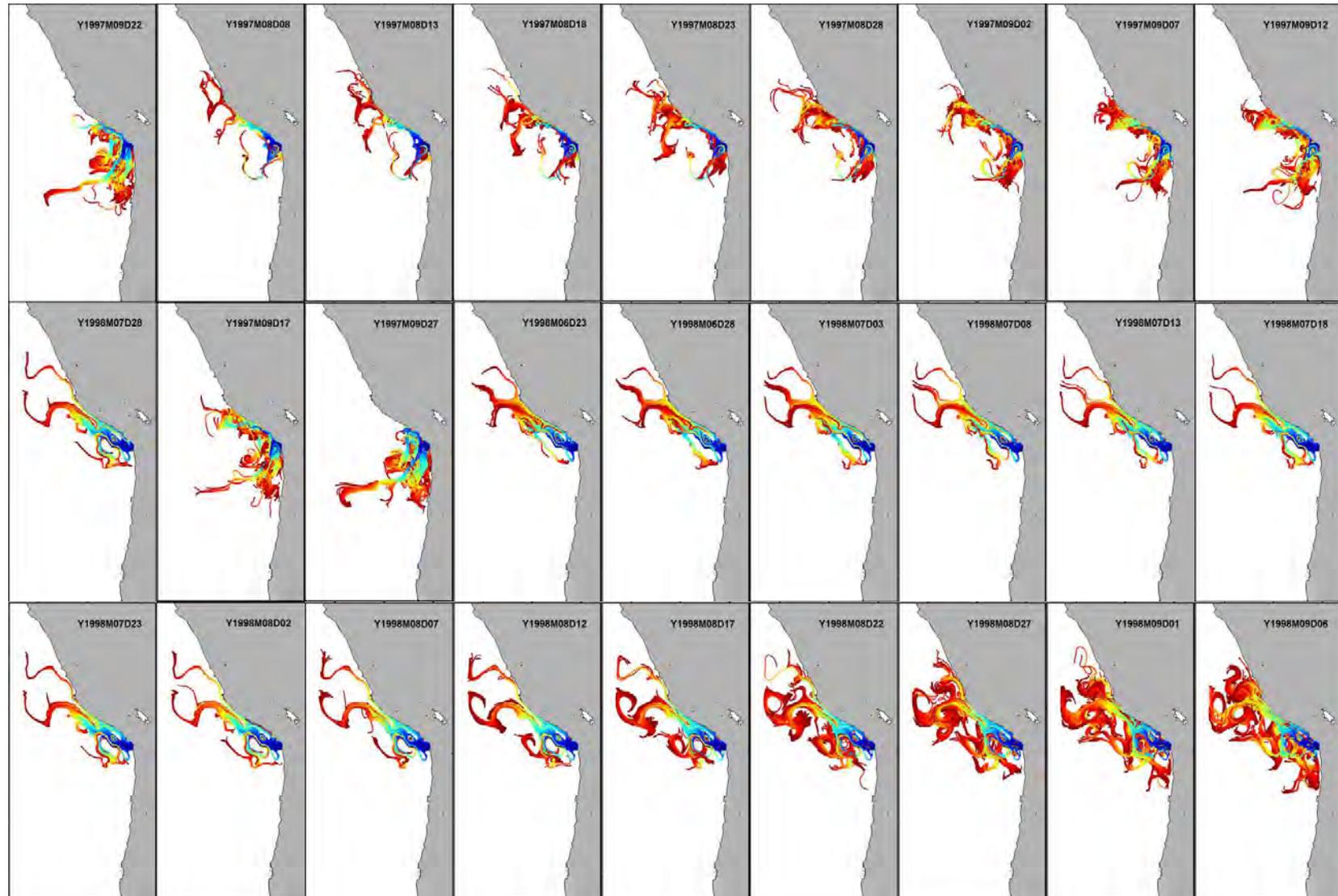


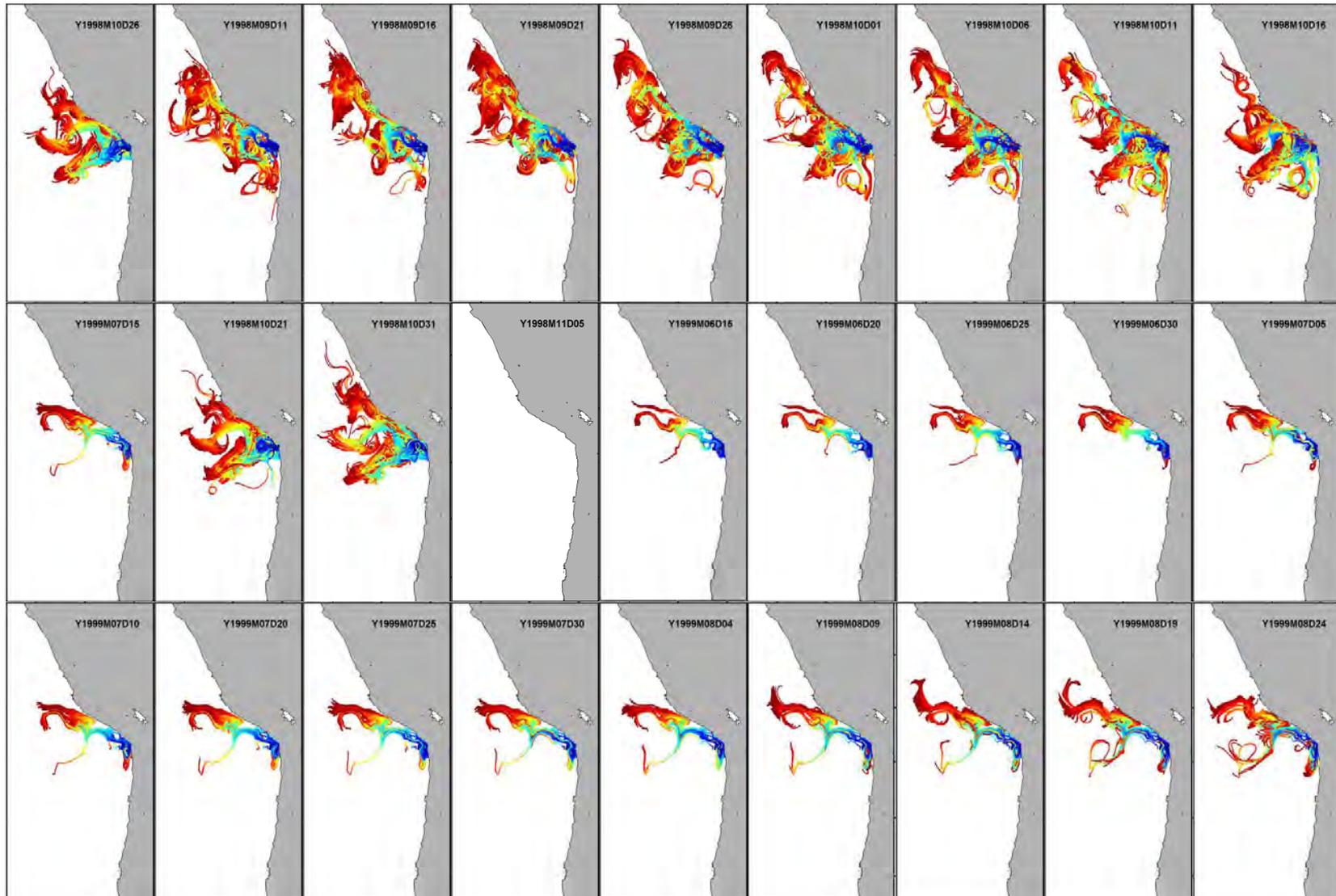
Anexo V. Evaluación experta del proyecto realizada por el Dr. Andrés Ospina Álvarez de Mediterranean Institute for Advanced Studies (IMEDEA) y Spanish National Research Council (CSIC)

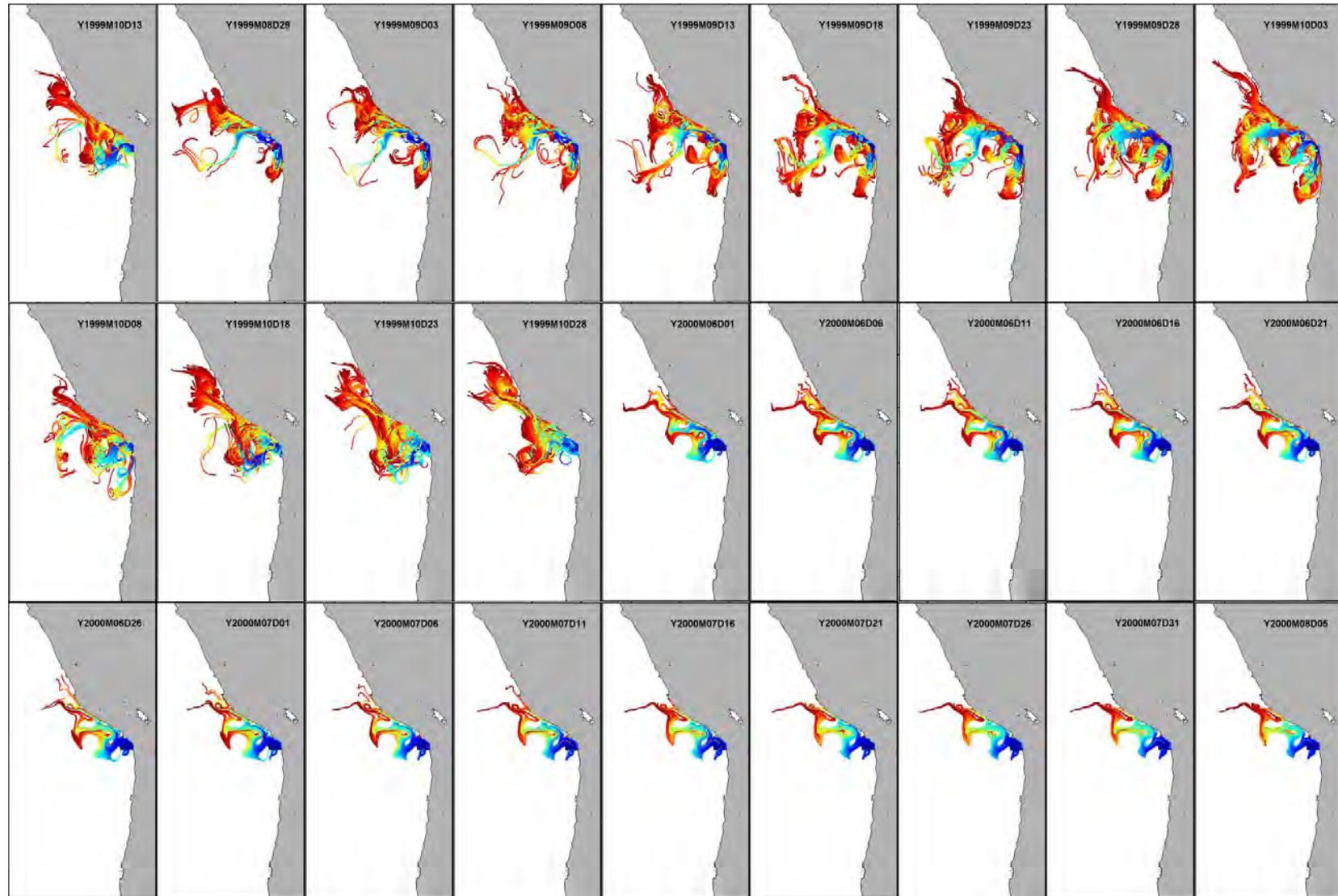
**Anexo VI Trayectorias de transporte de huevos y larvas de anchoveta simuladas
mediante modelación biofísica en el norte de Chile: desoves generados en la región de
Arica y Parinacota.**

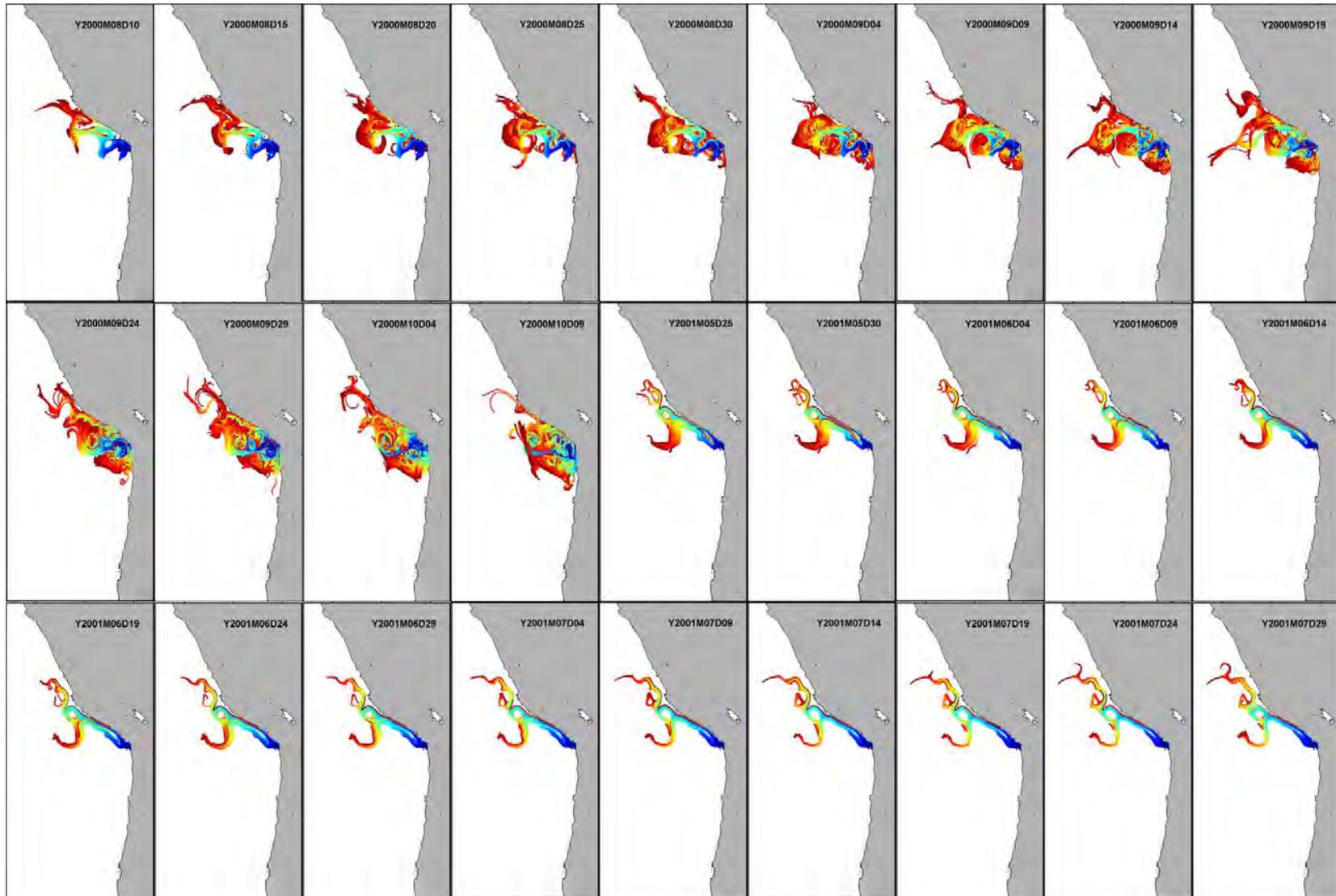


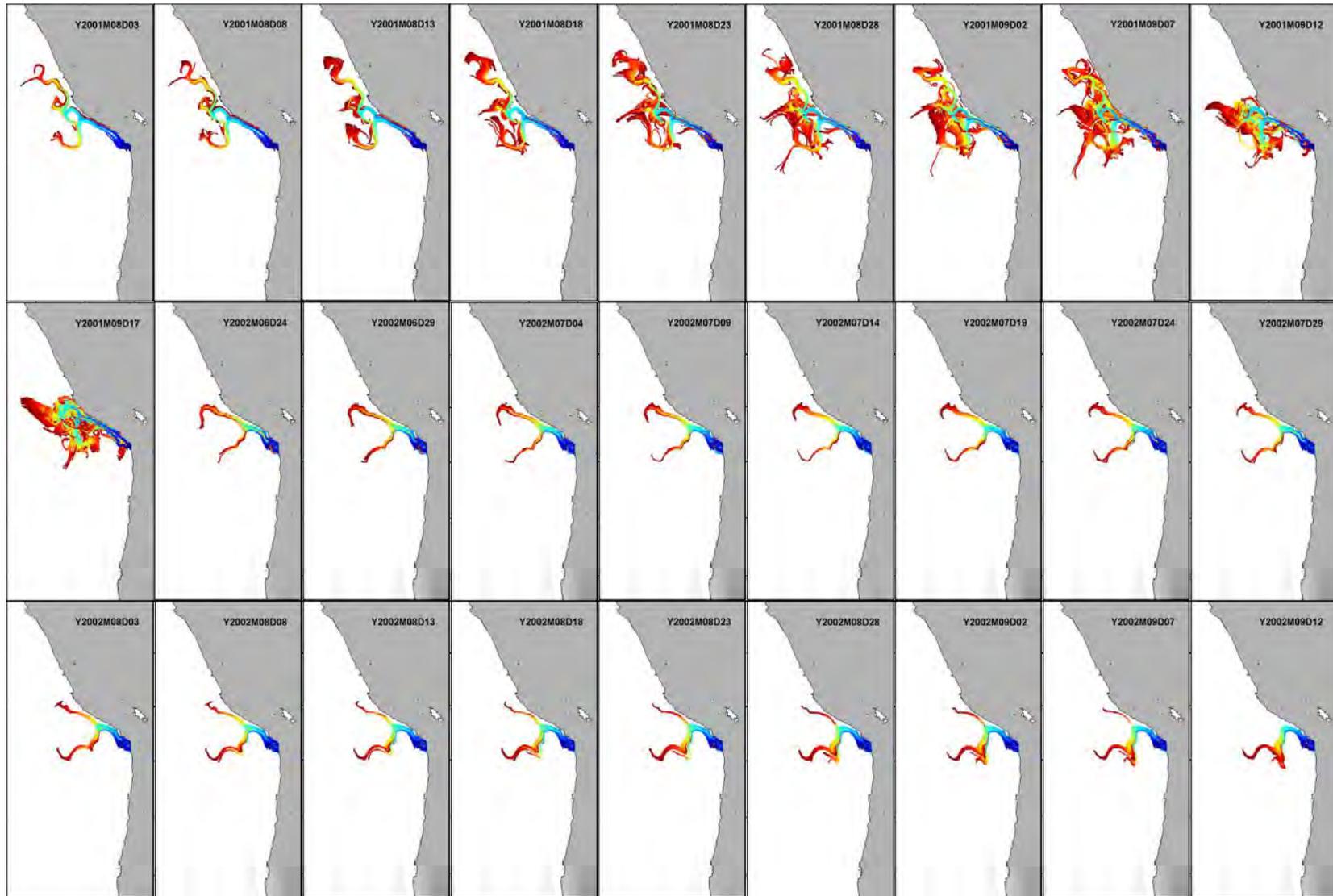




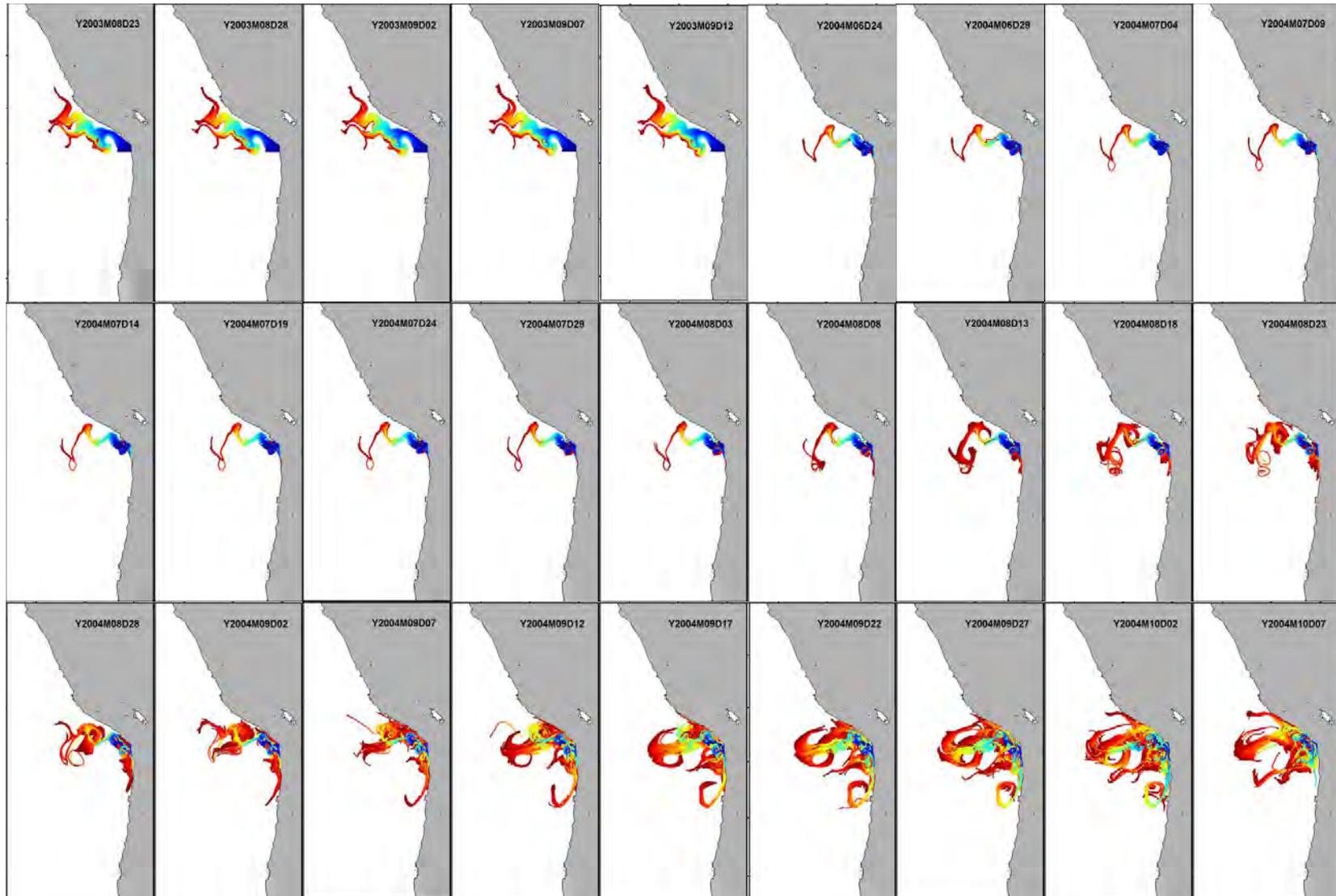


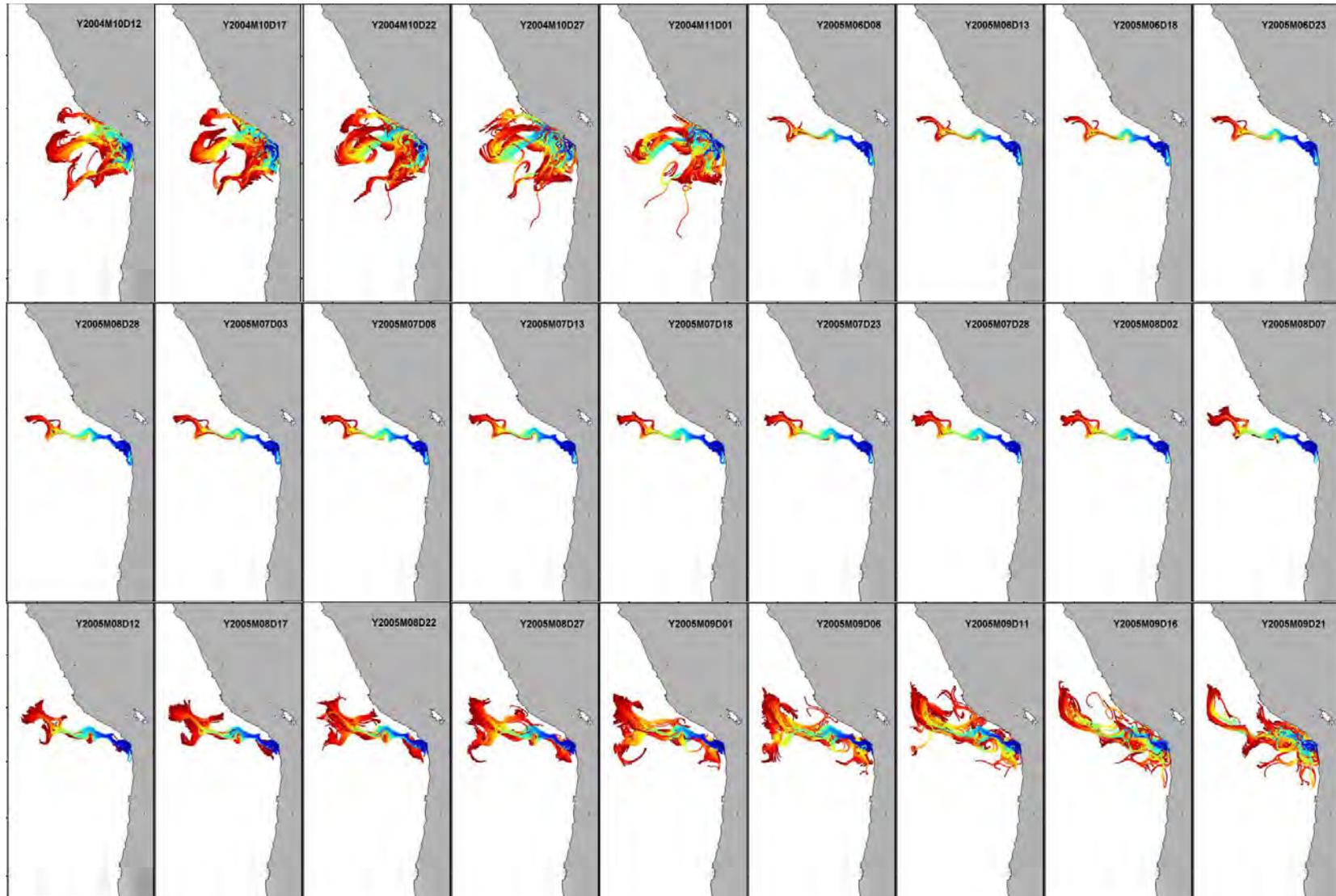


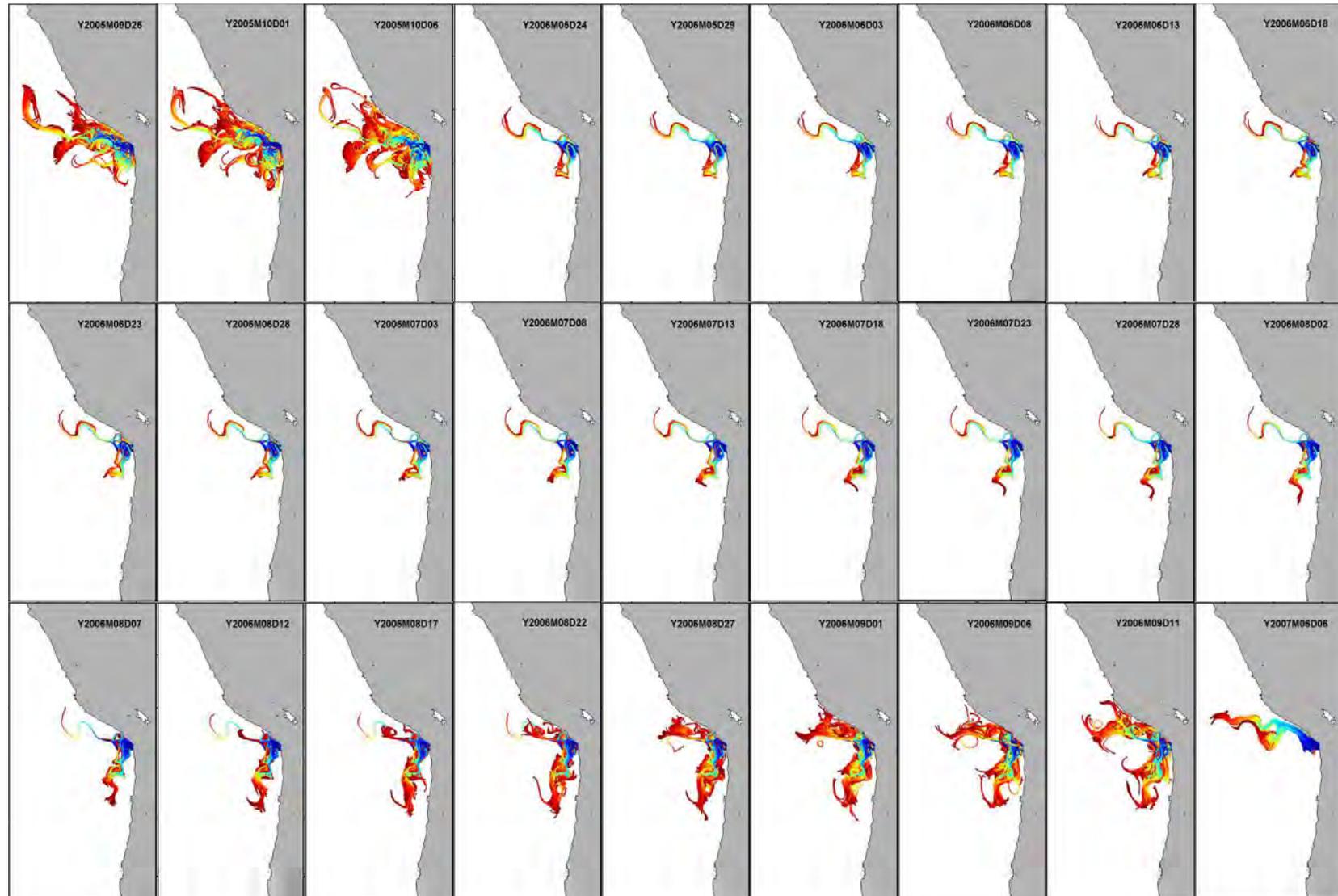


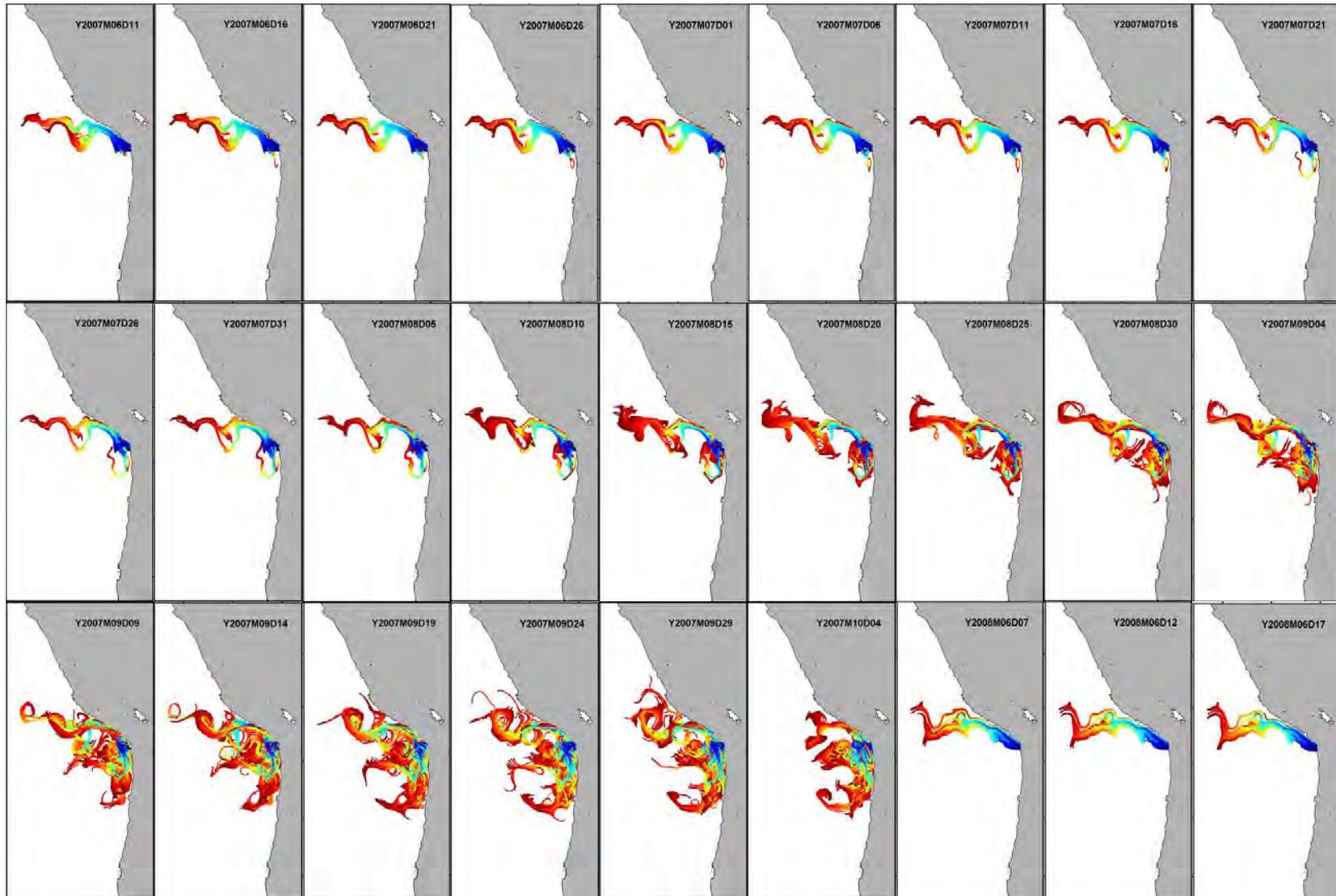


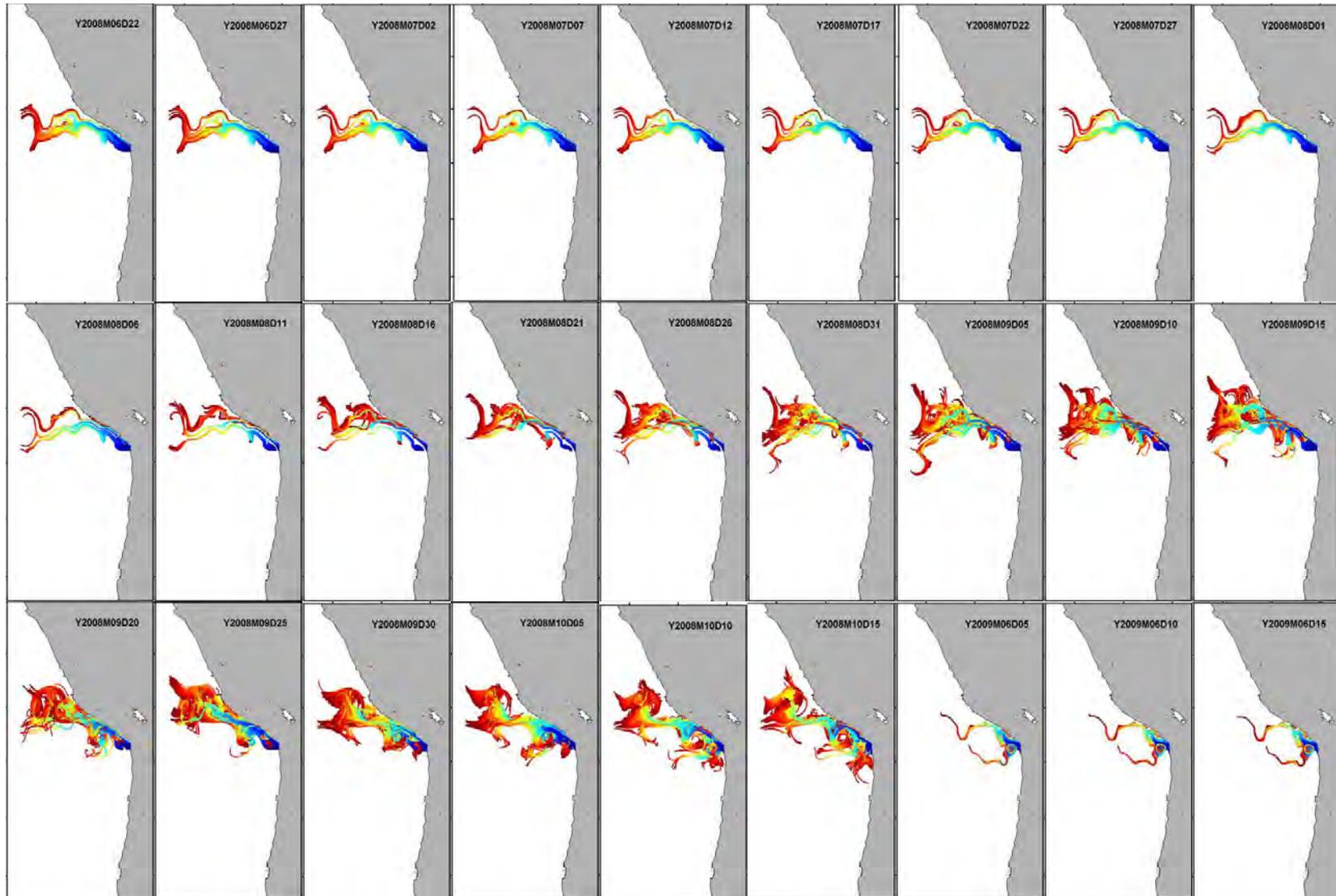


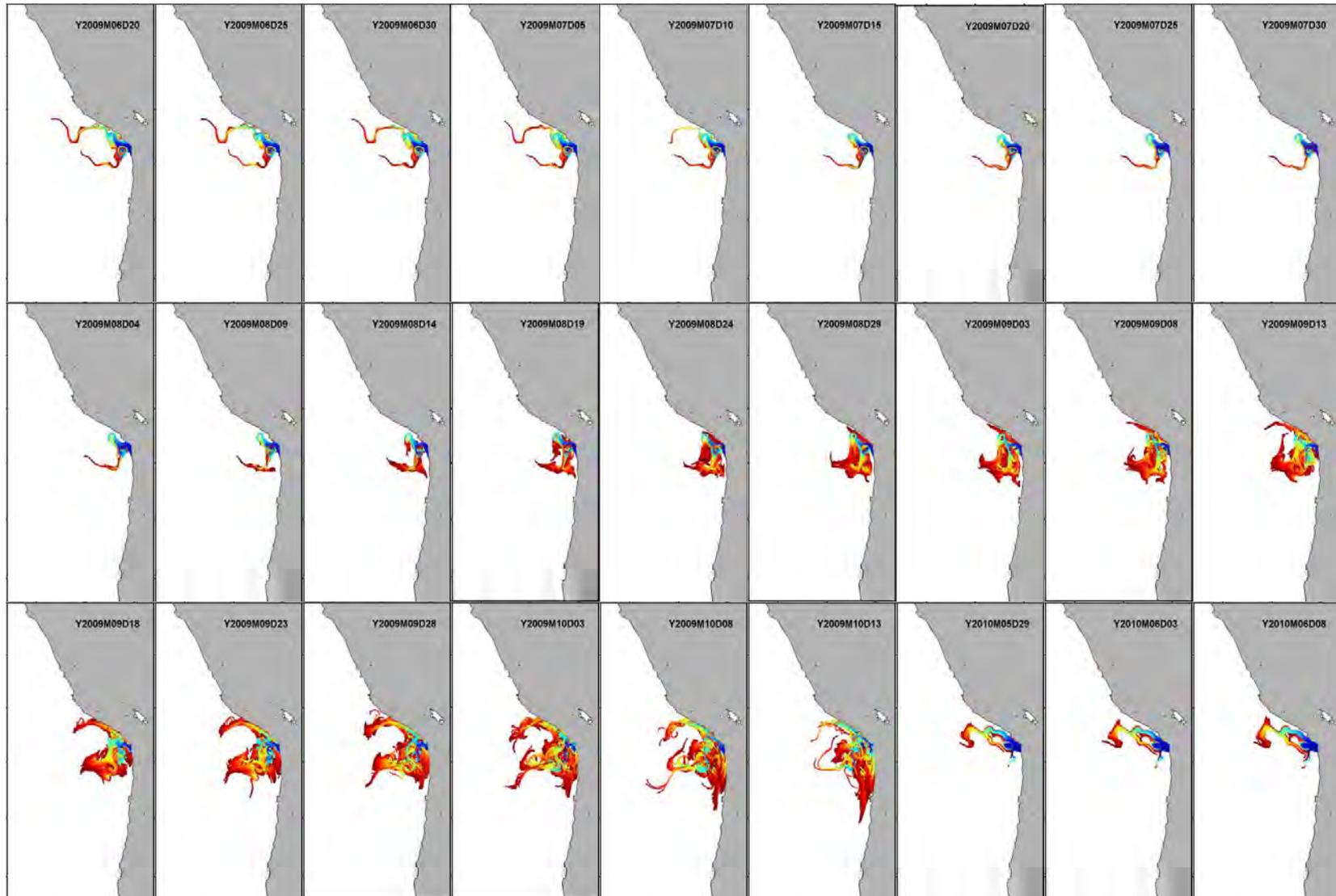


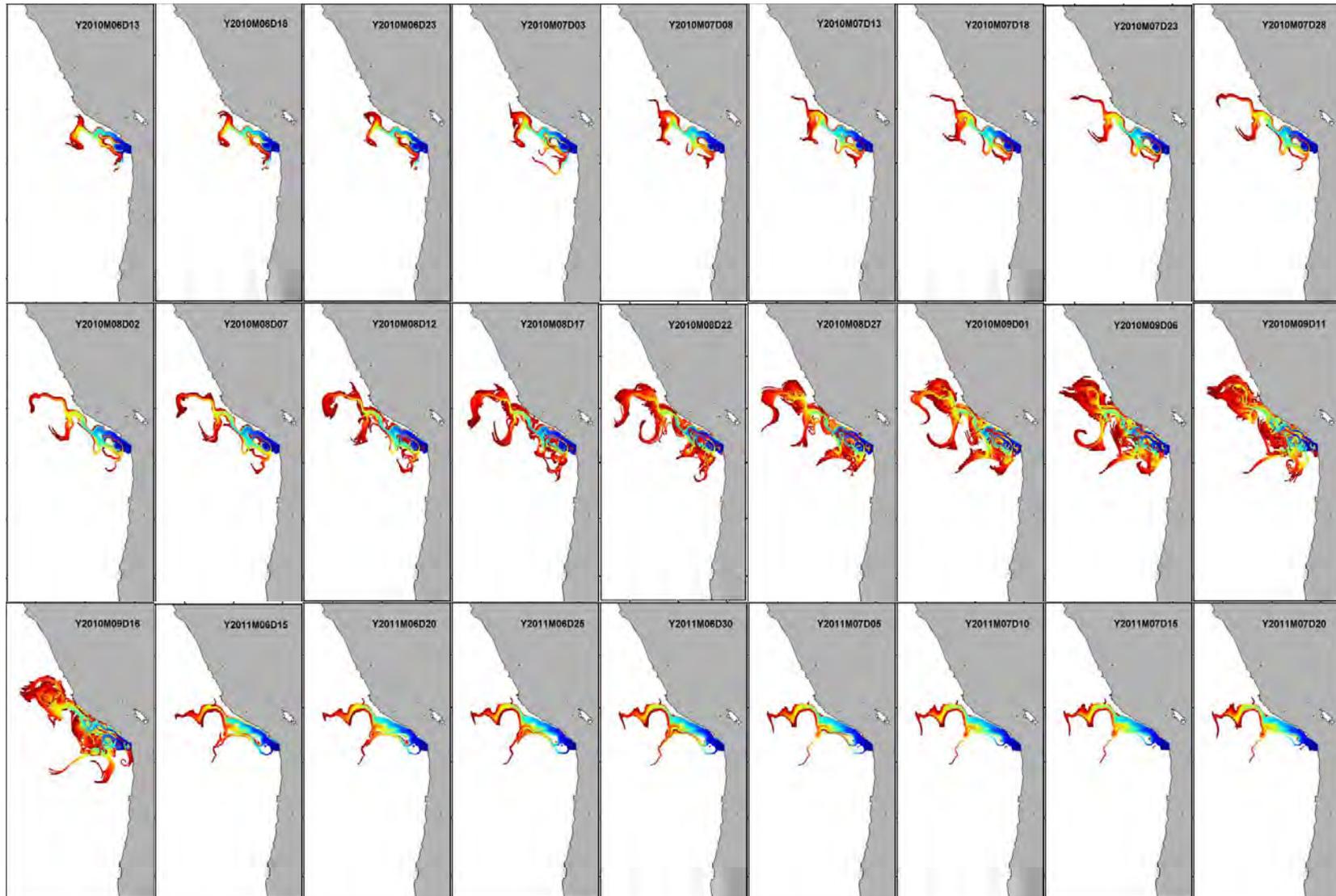


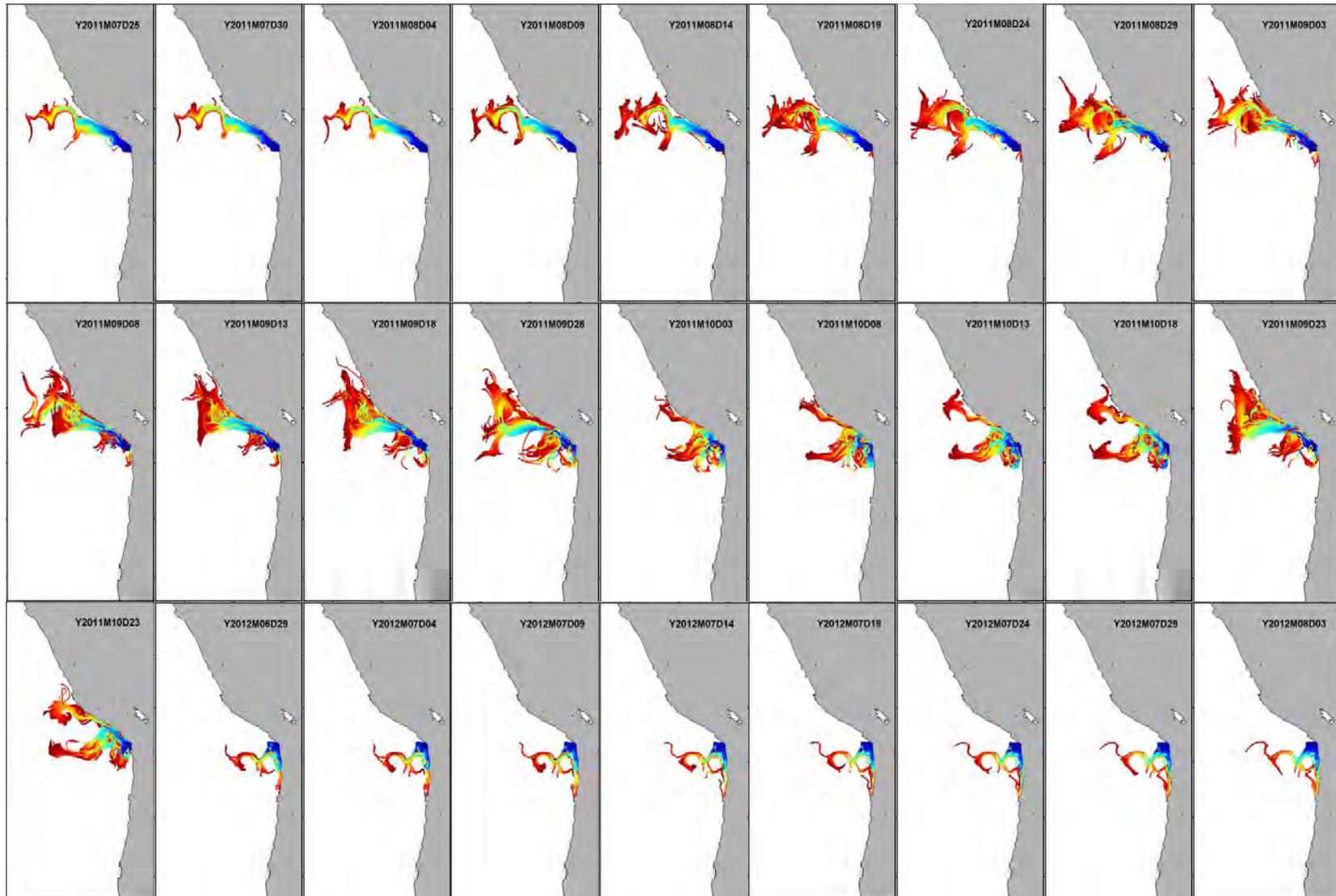


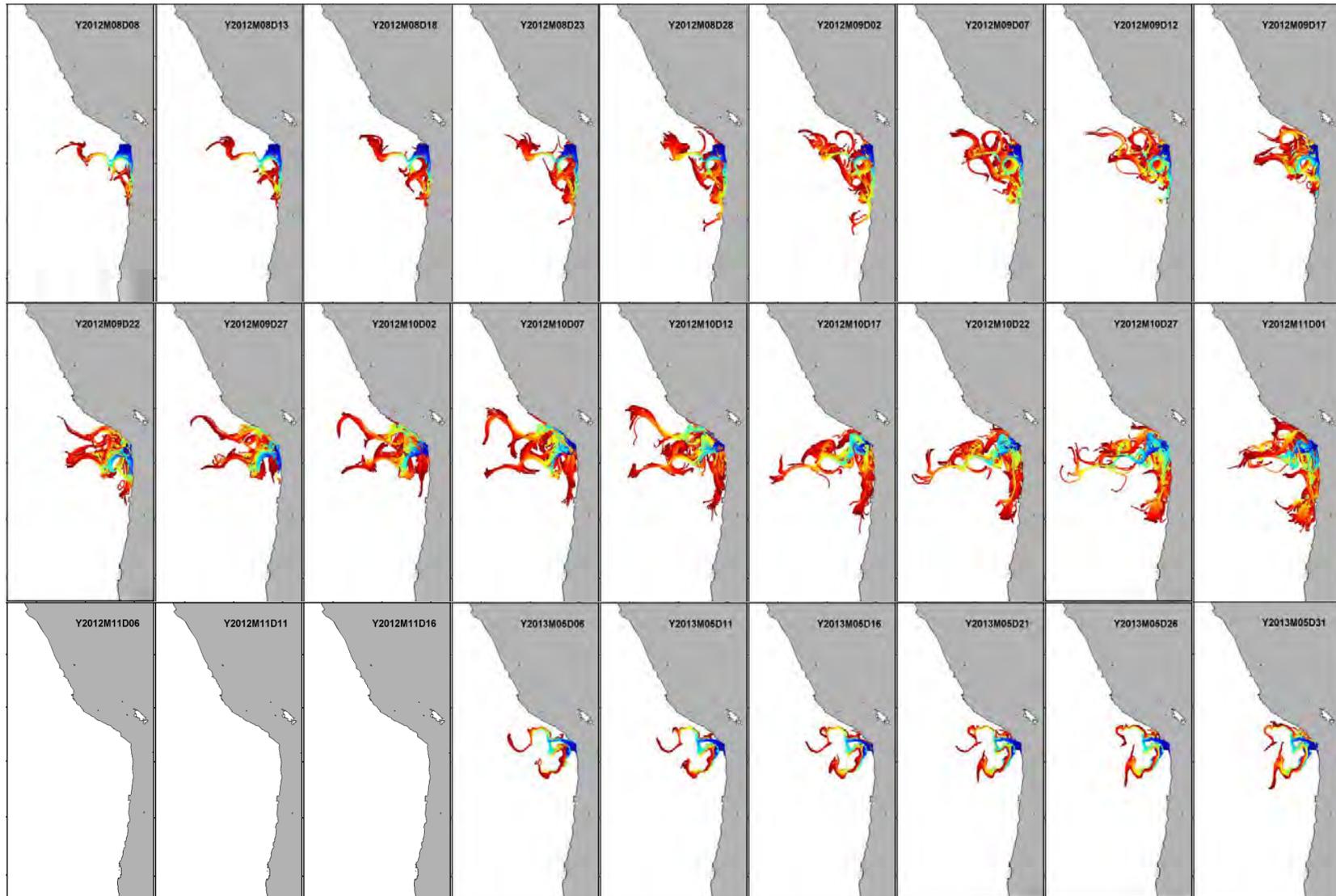


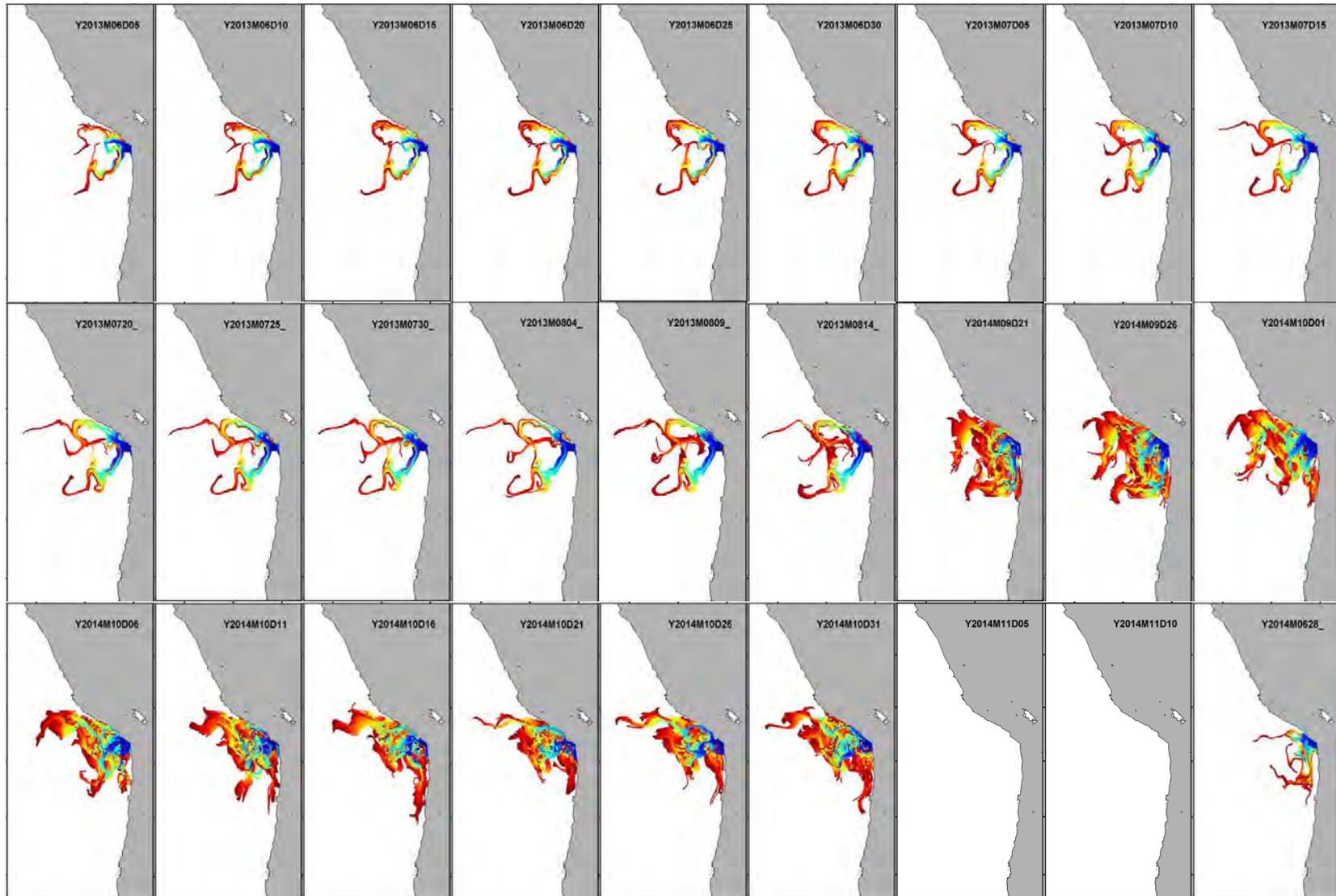


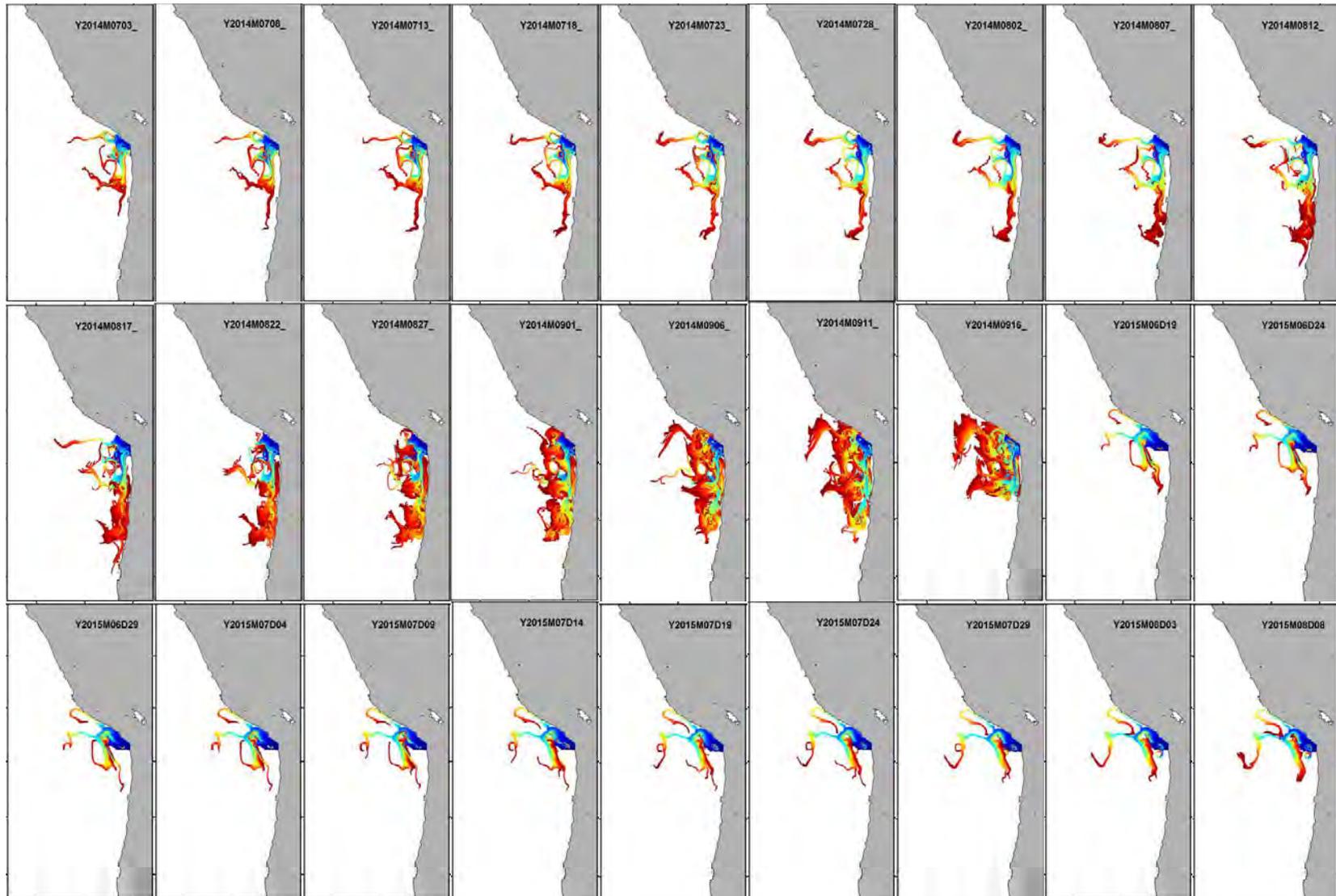


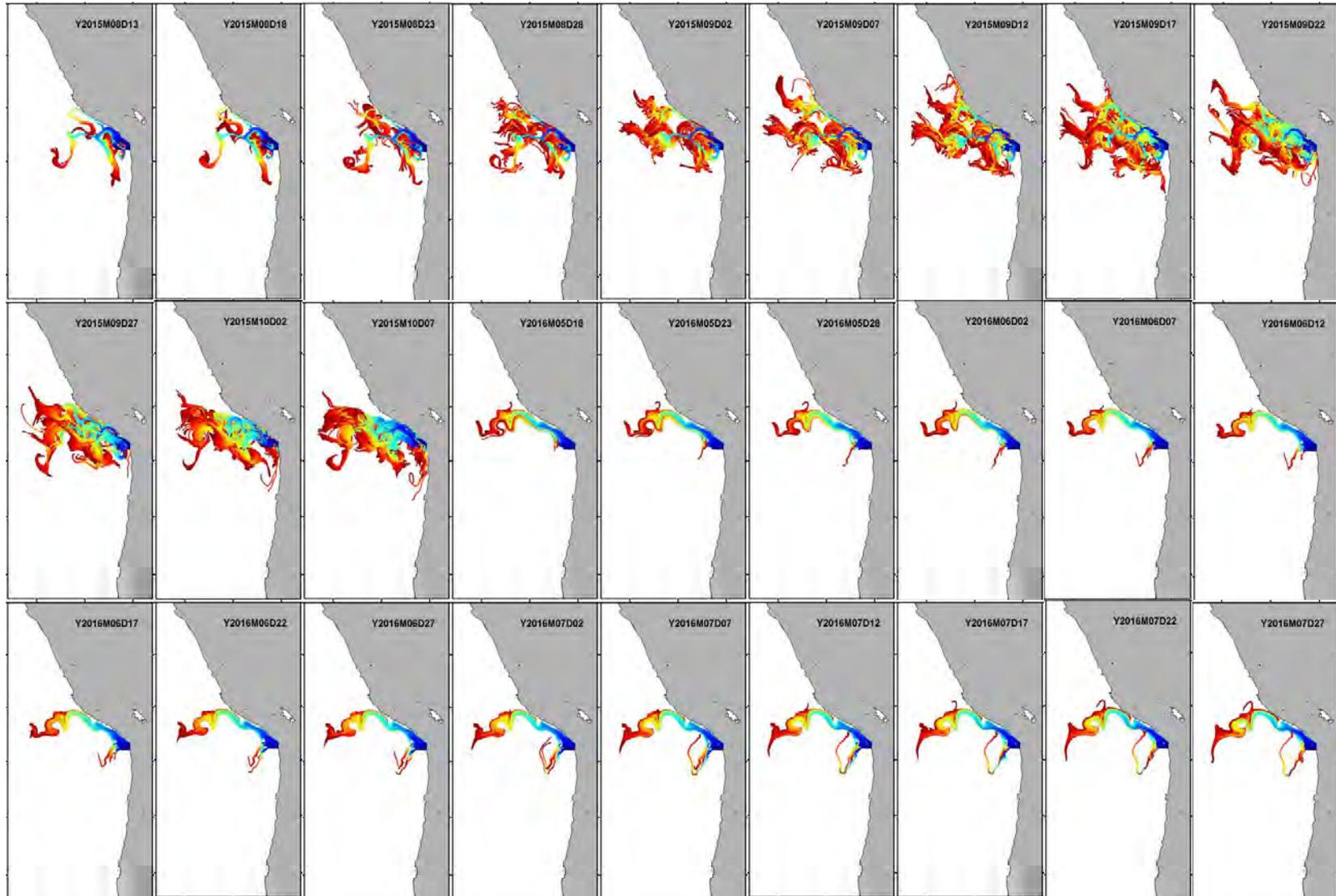


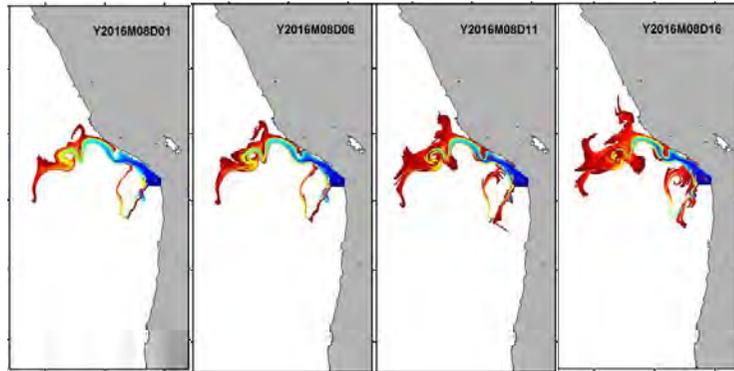




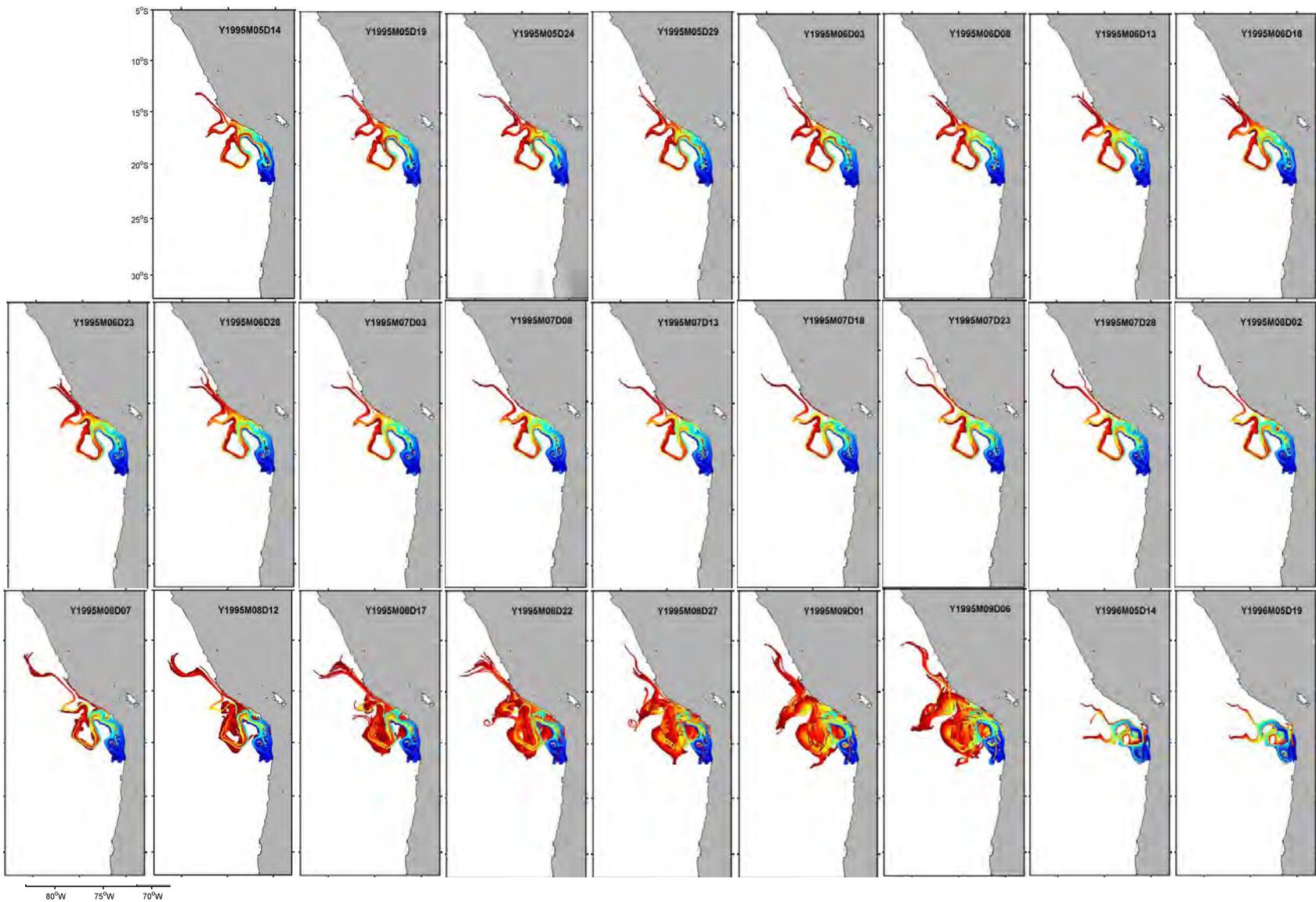


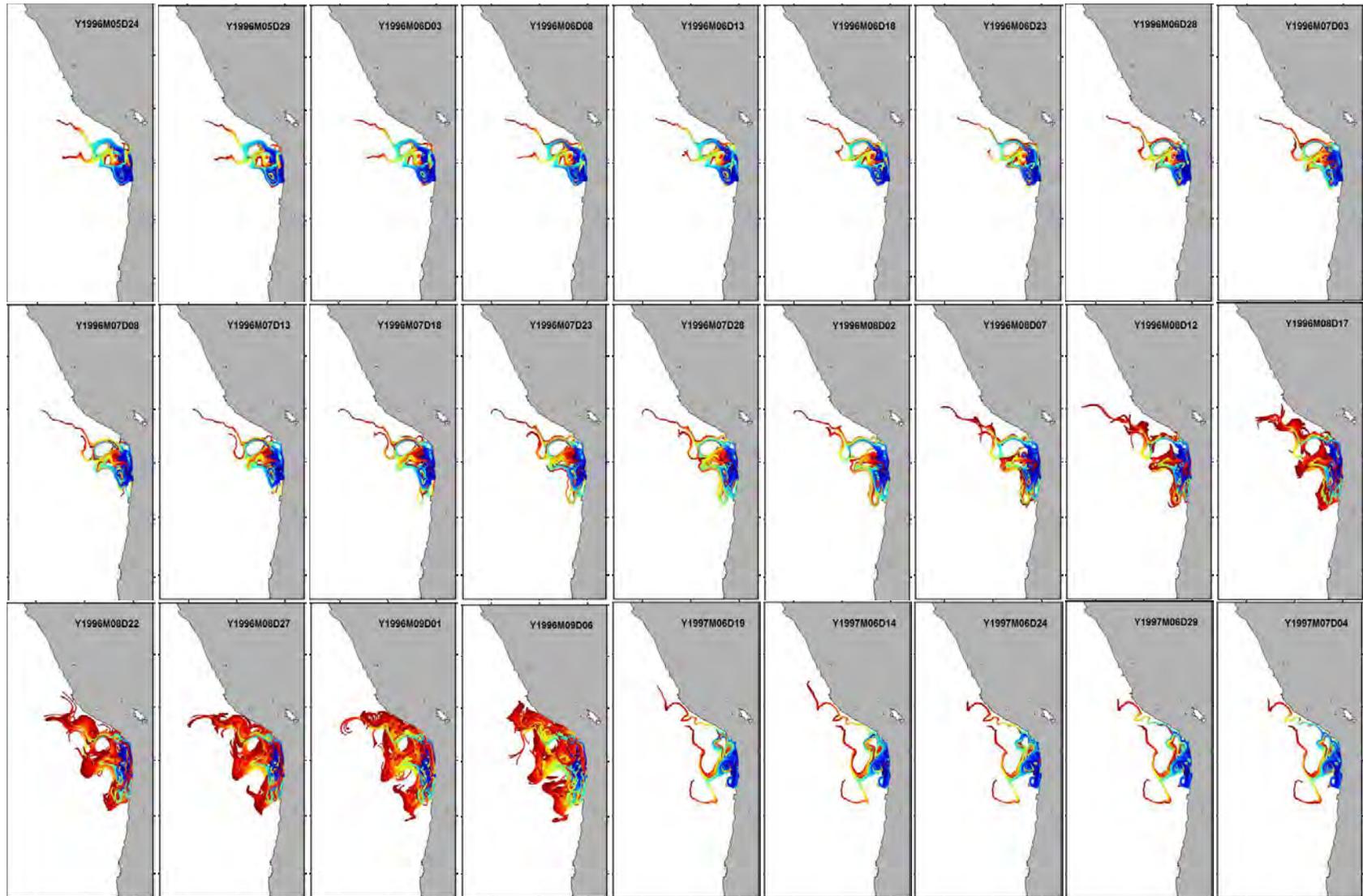


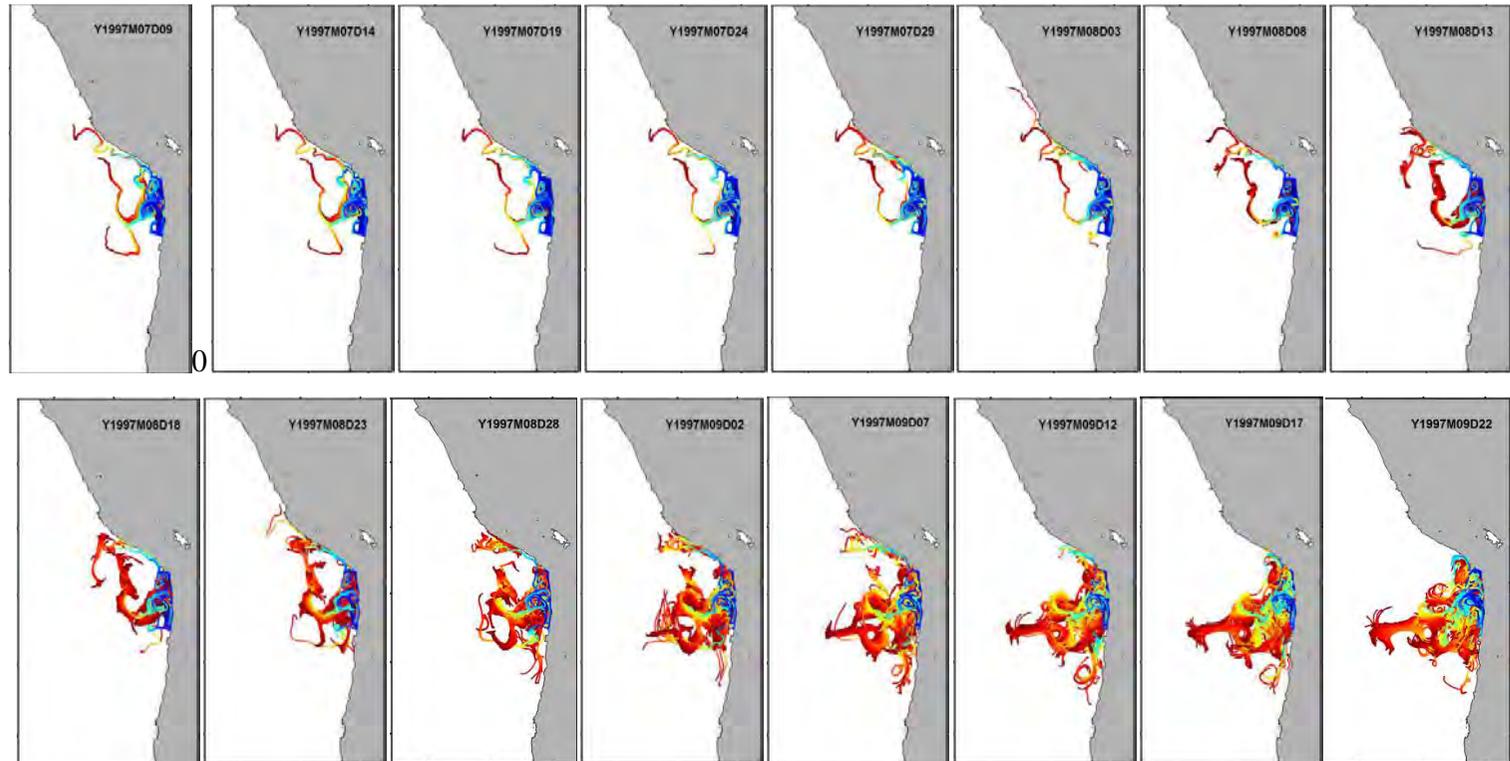


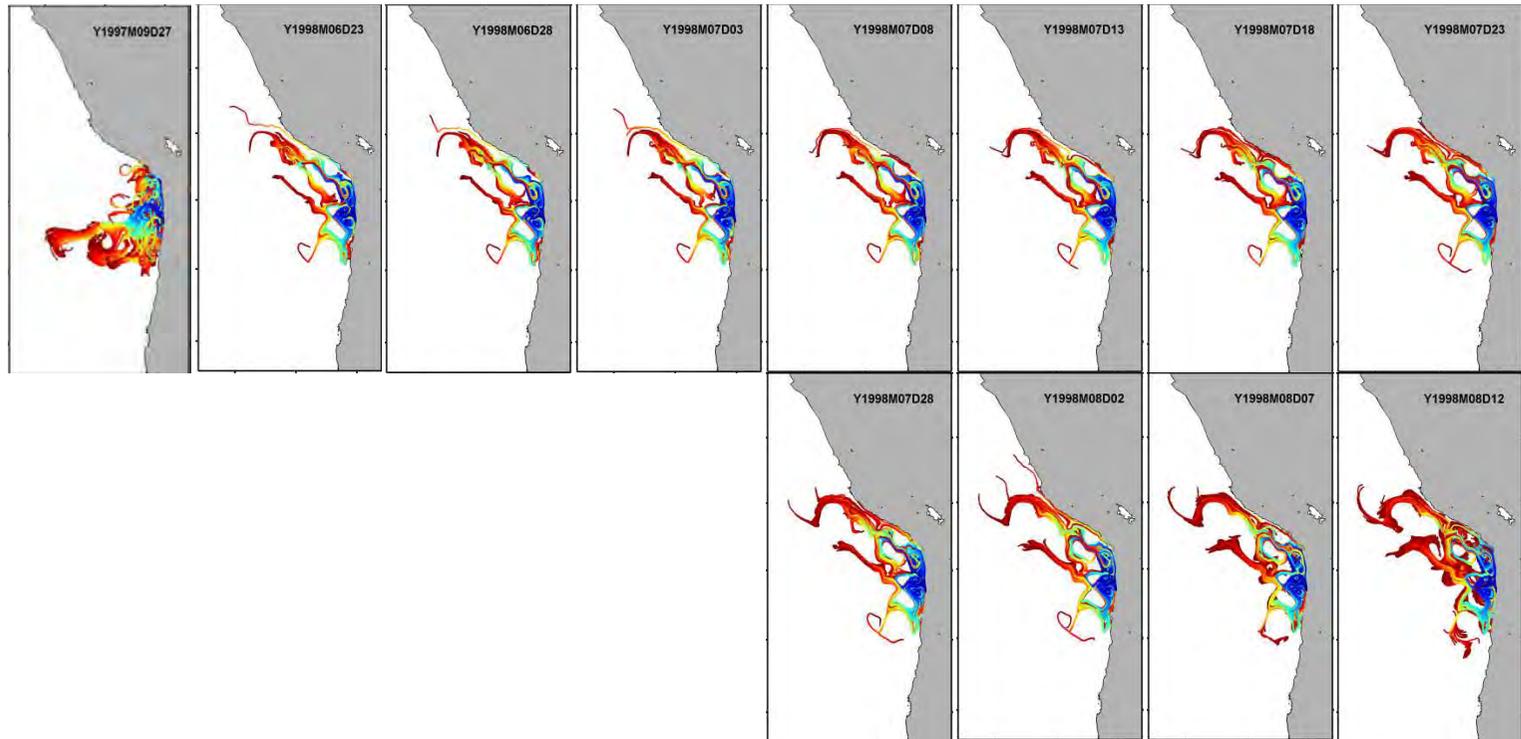


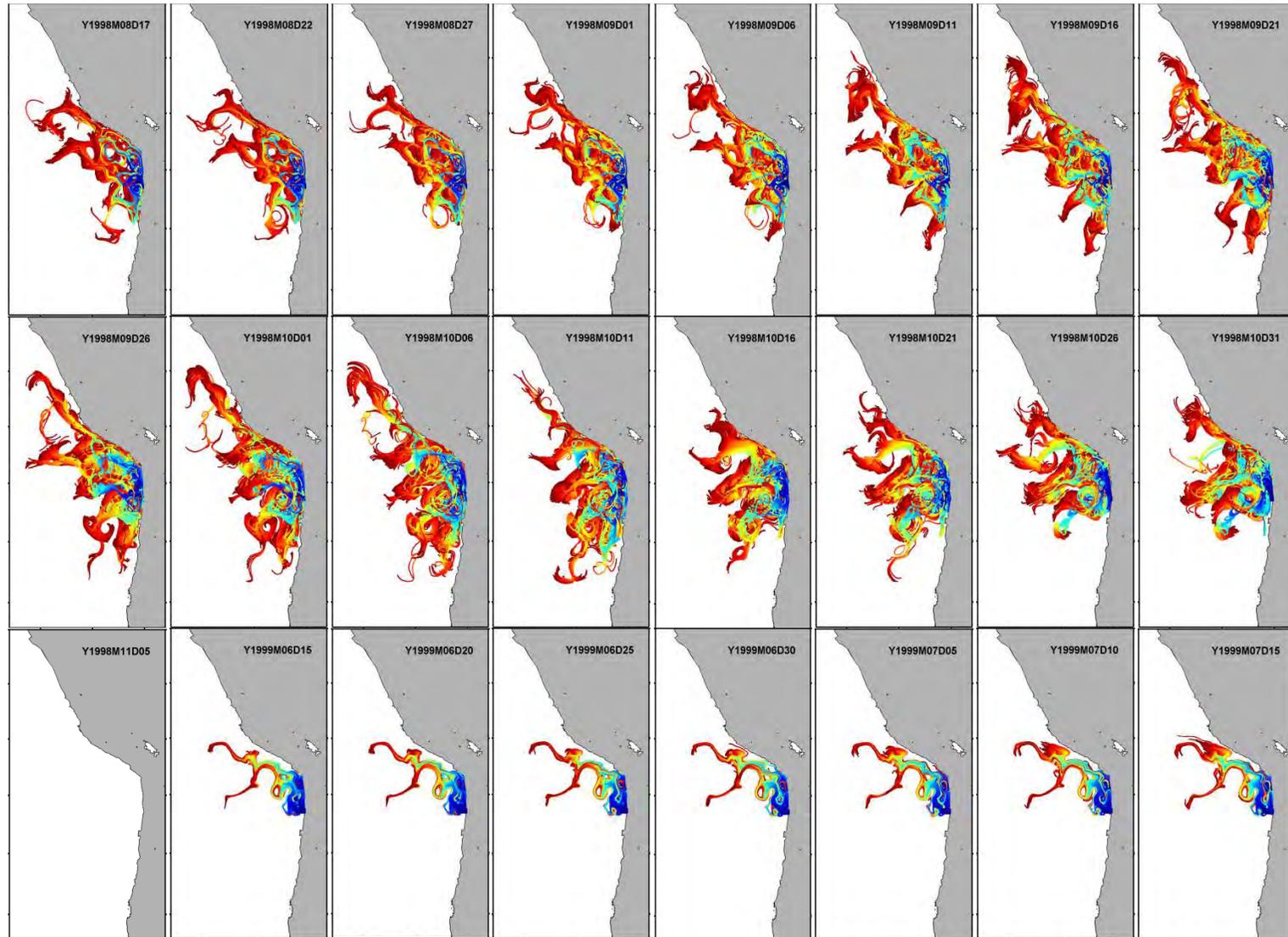
Anexo VII. Trayectorias de transporte de huevos y larvas de anchoveta simuladas mediante modelación biofísica en el norte de Chile: desoves generados en la región de Tarapacá.

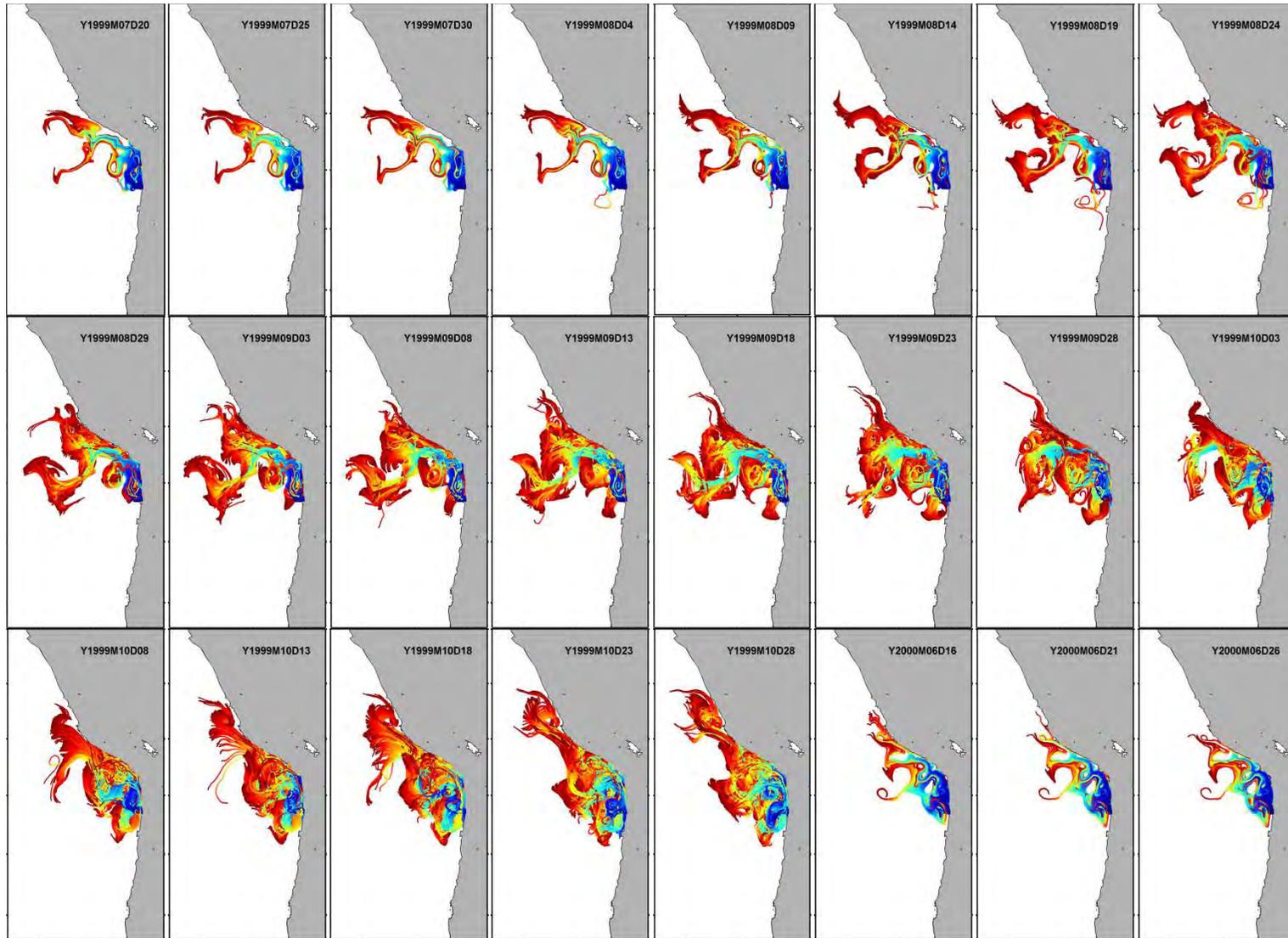


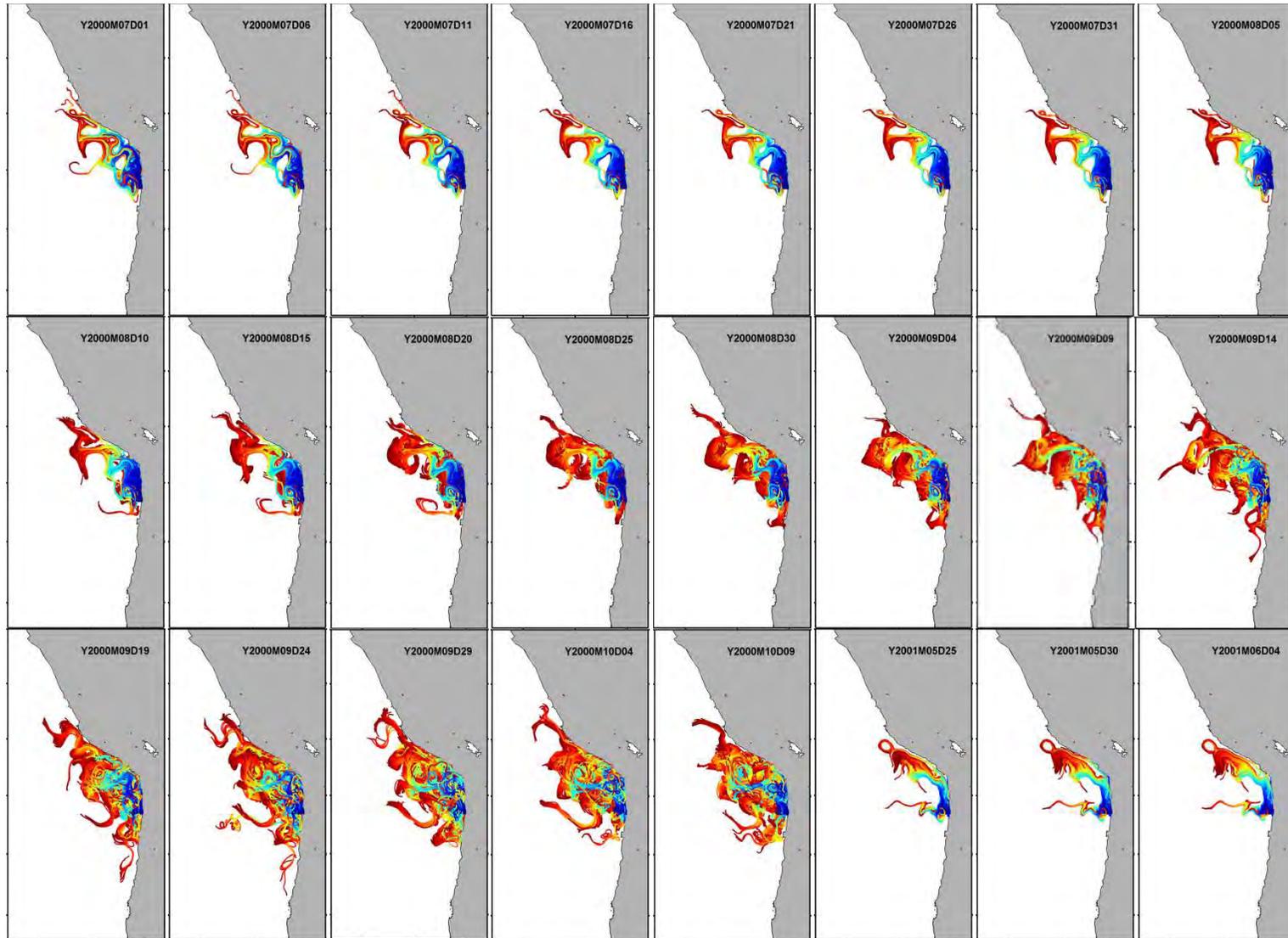


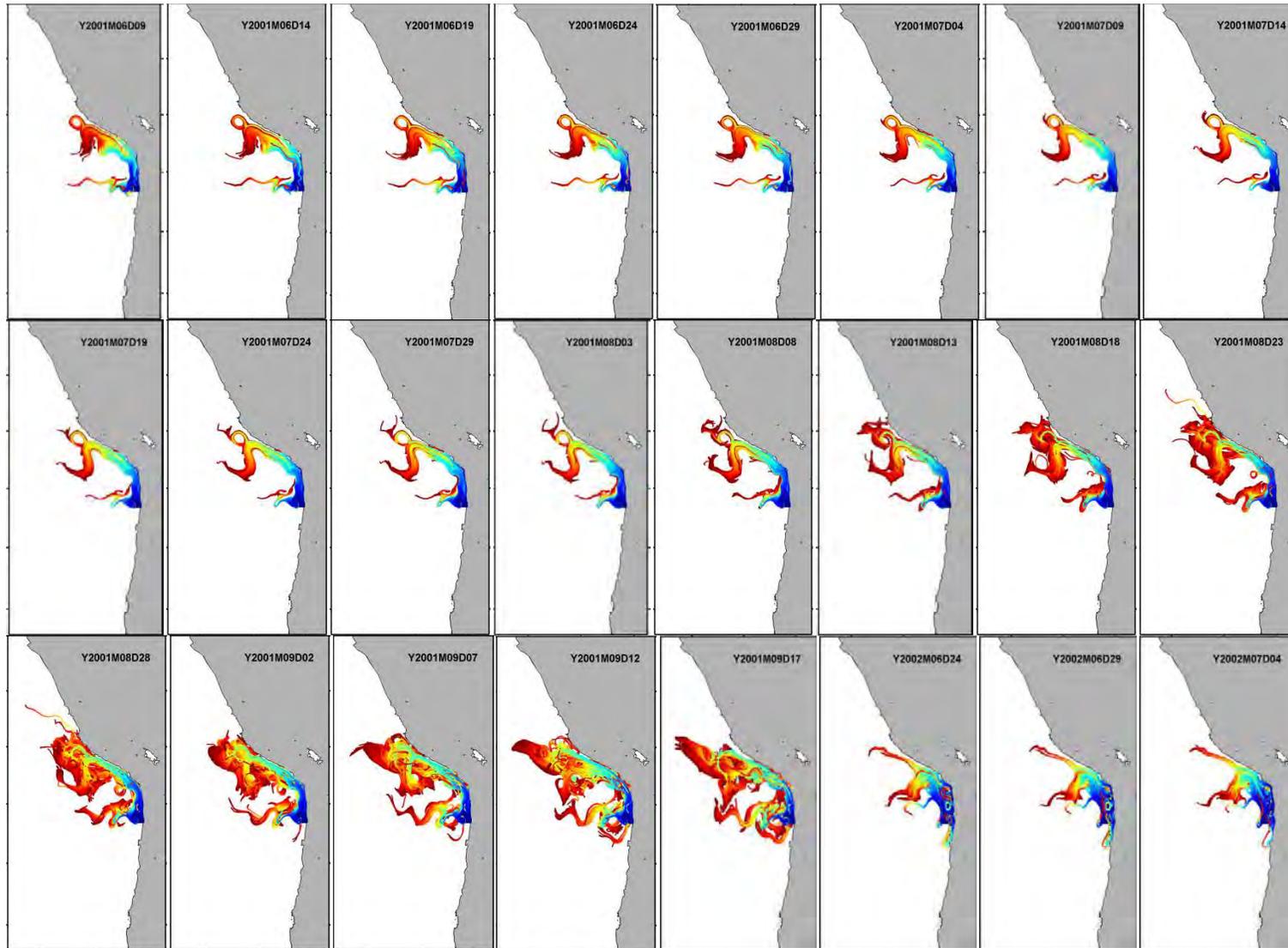


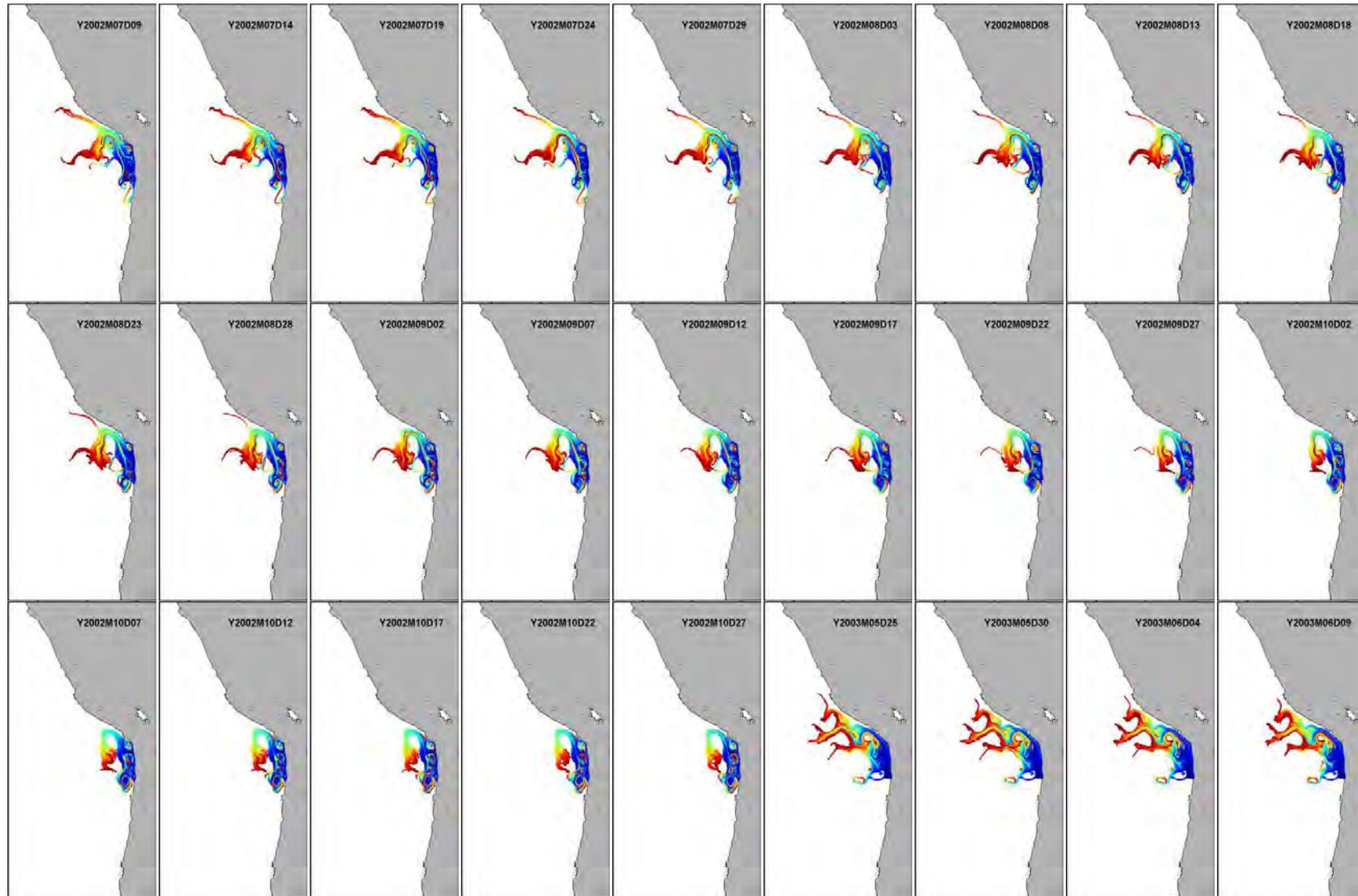


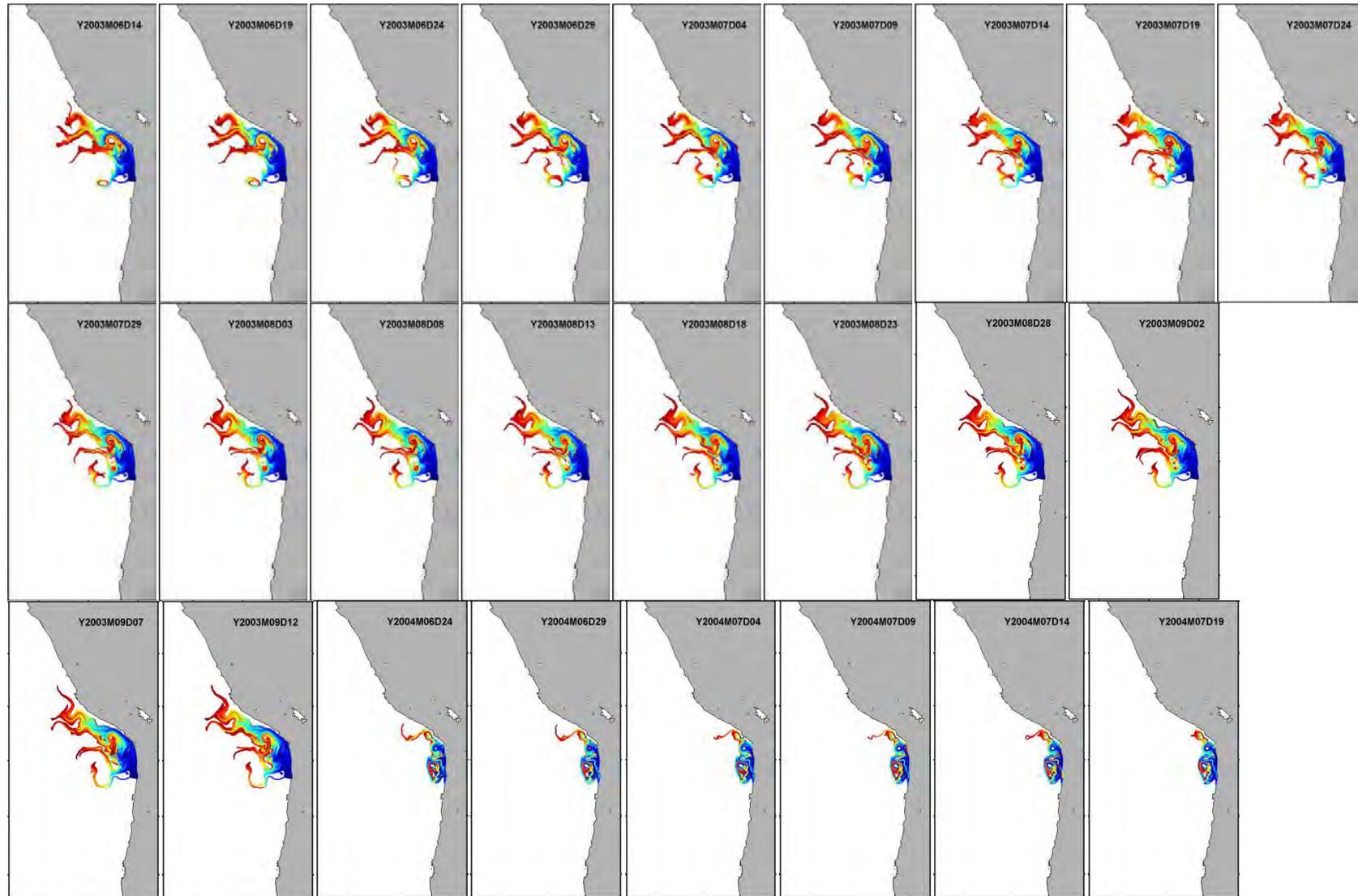


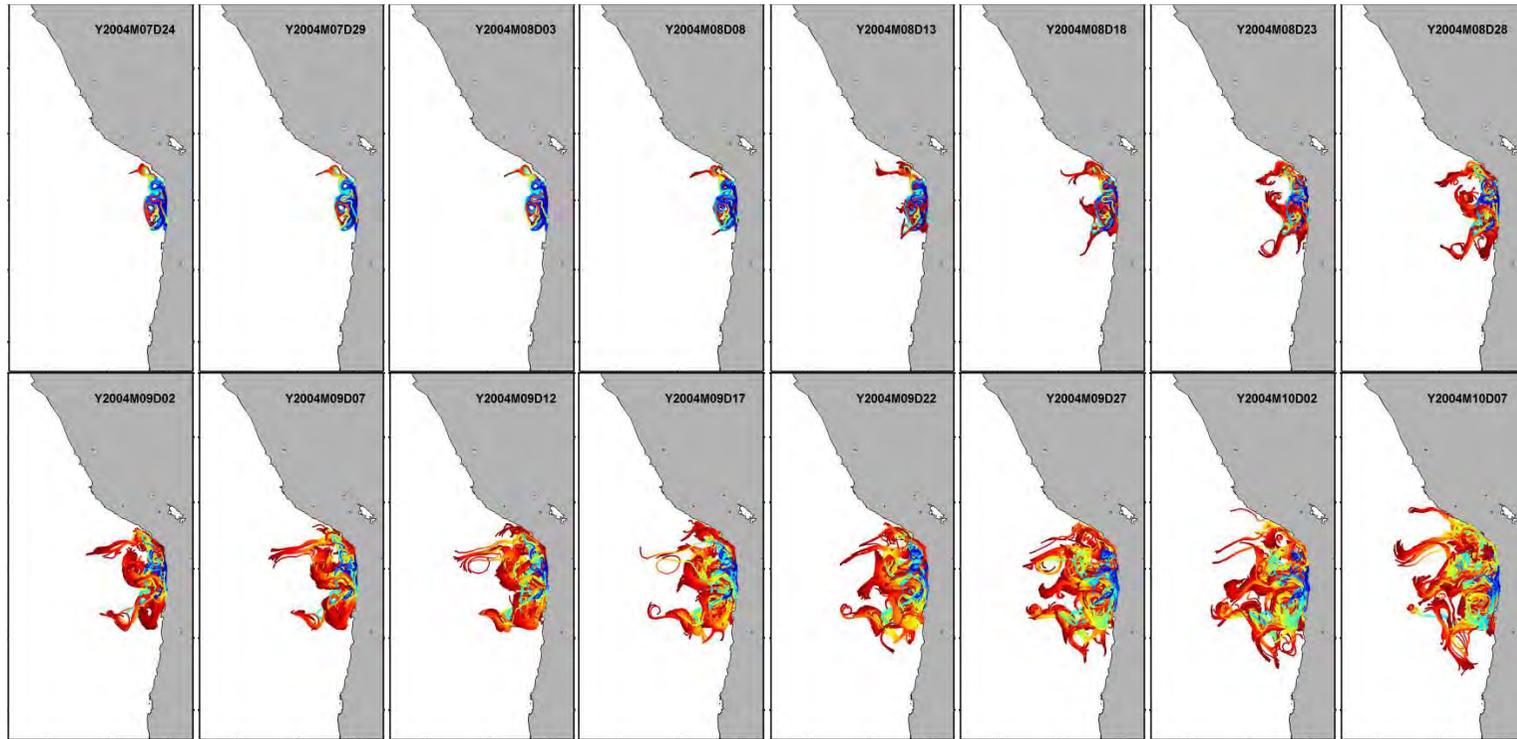


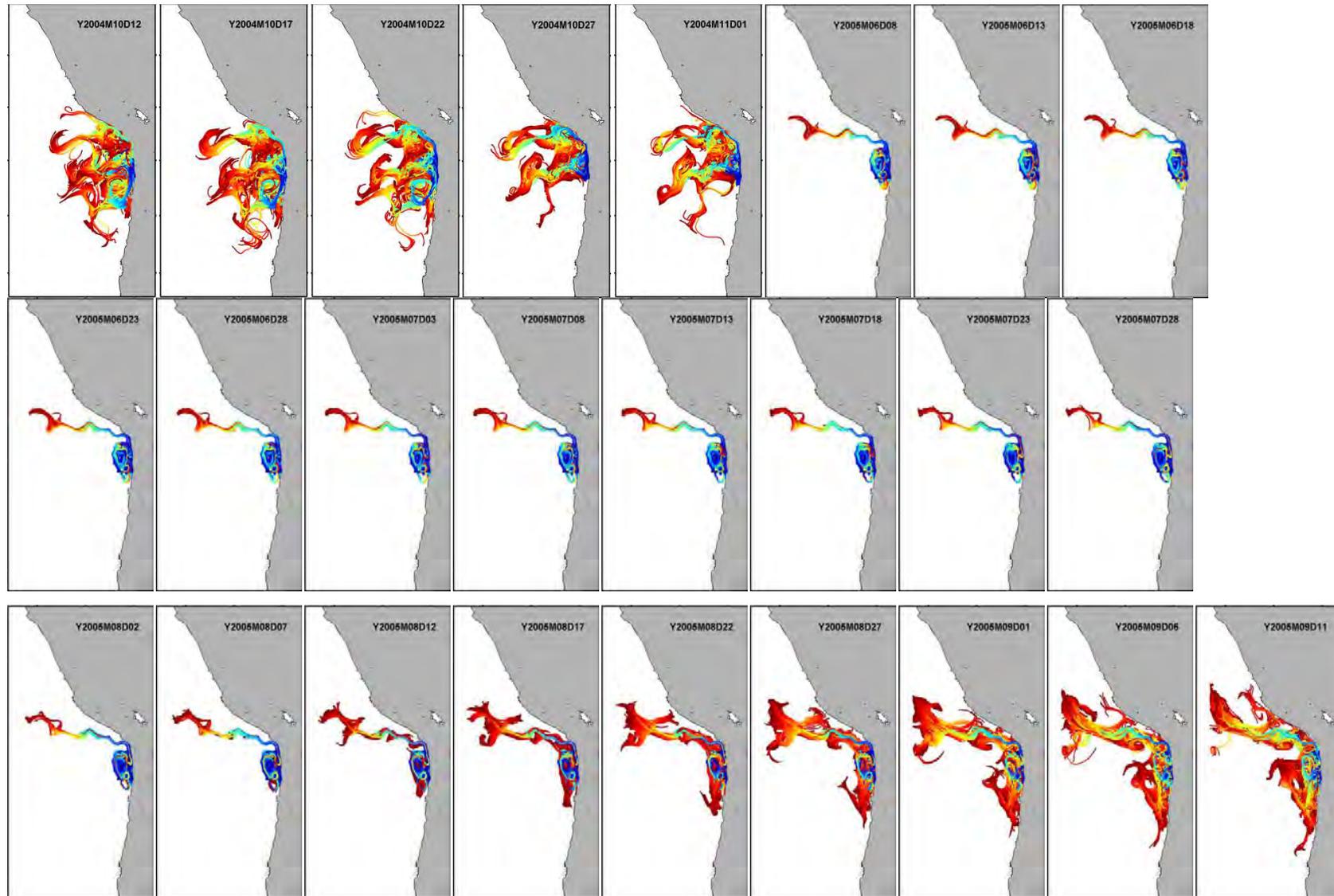


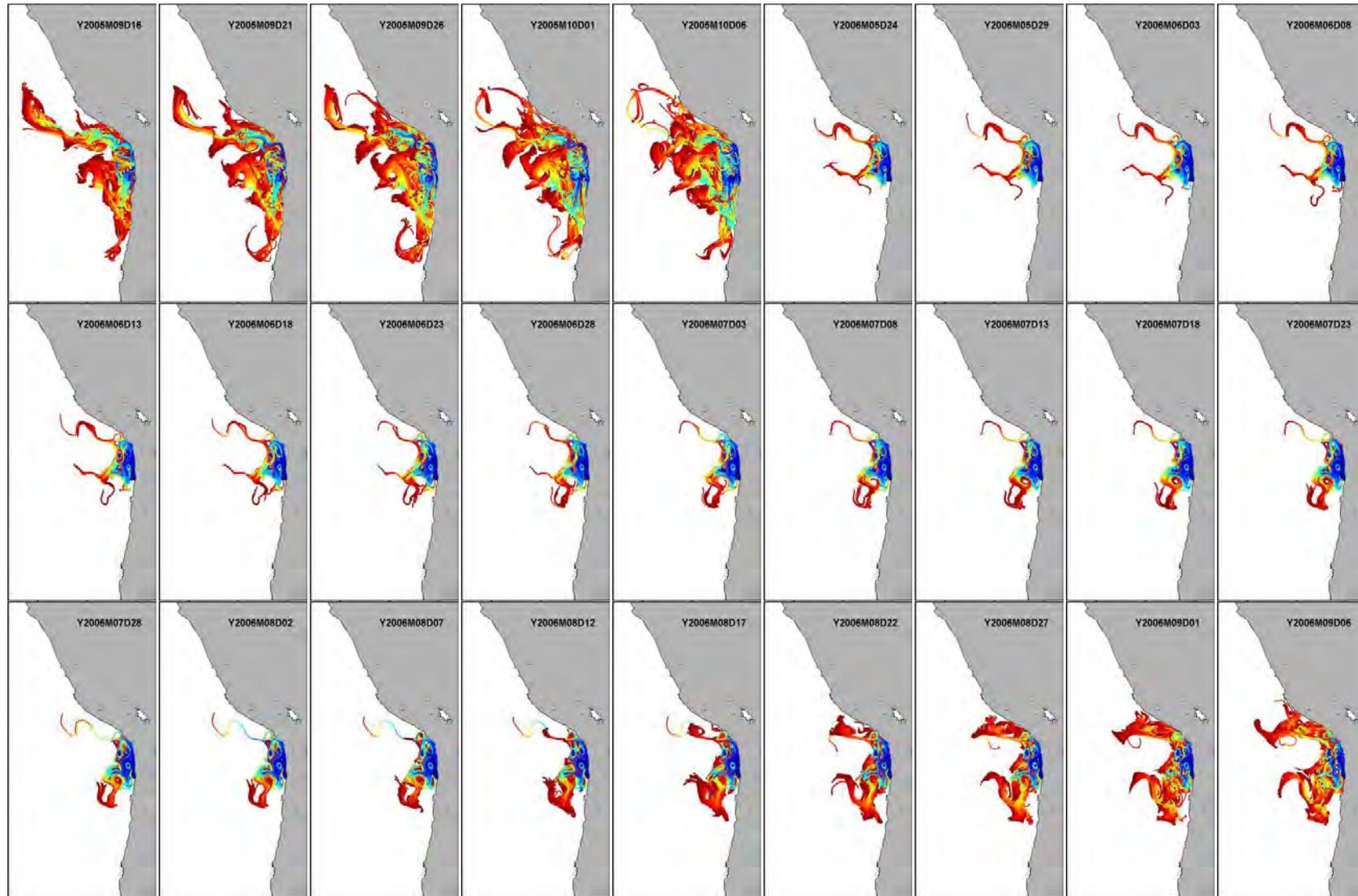


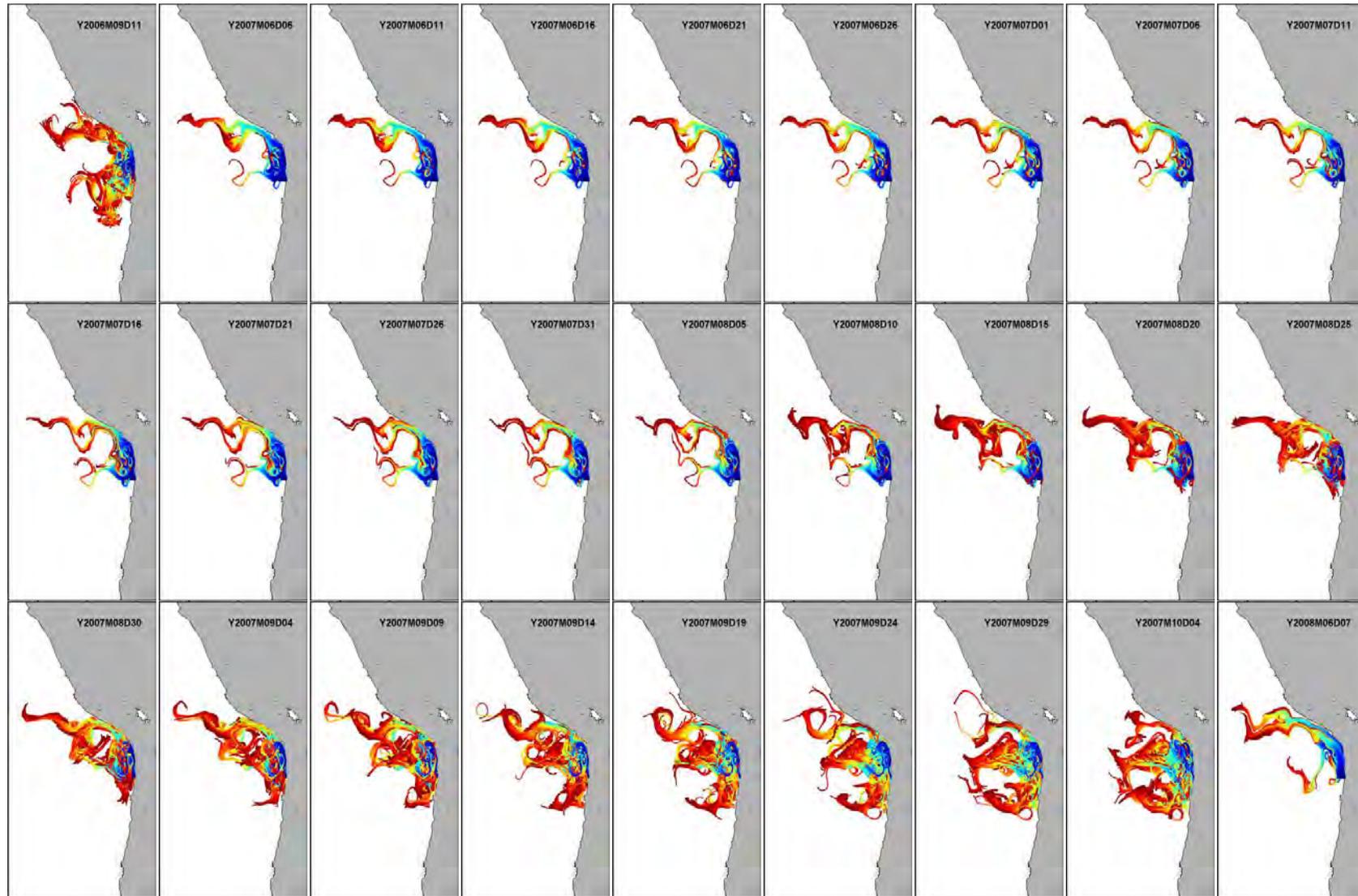


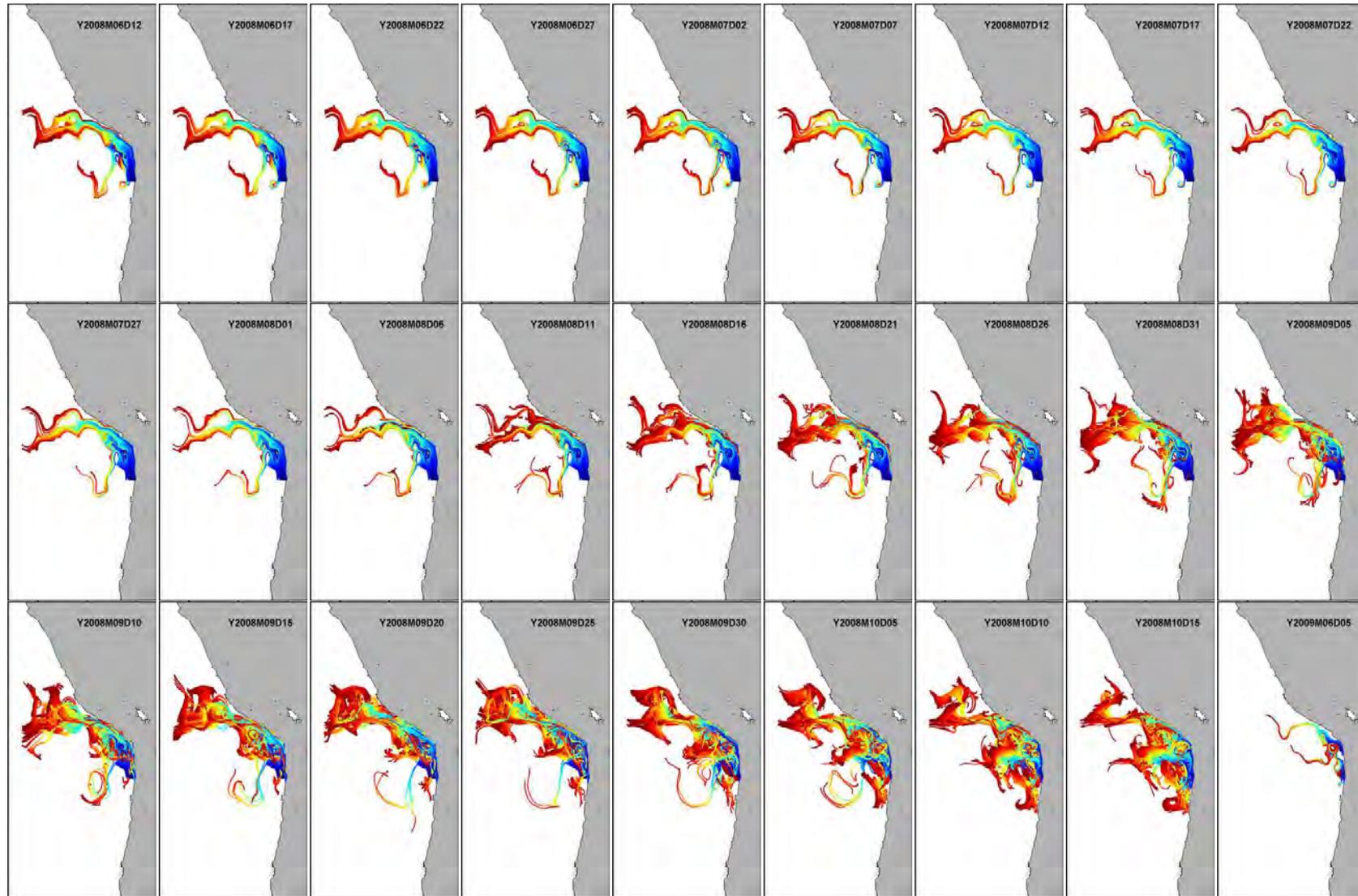


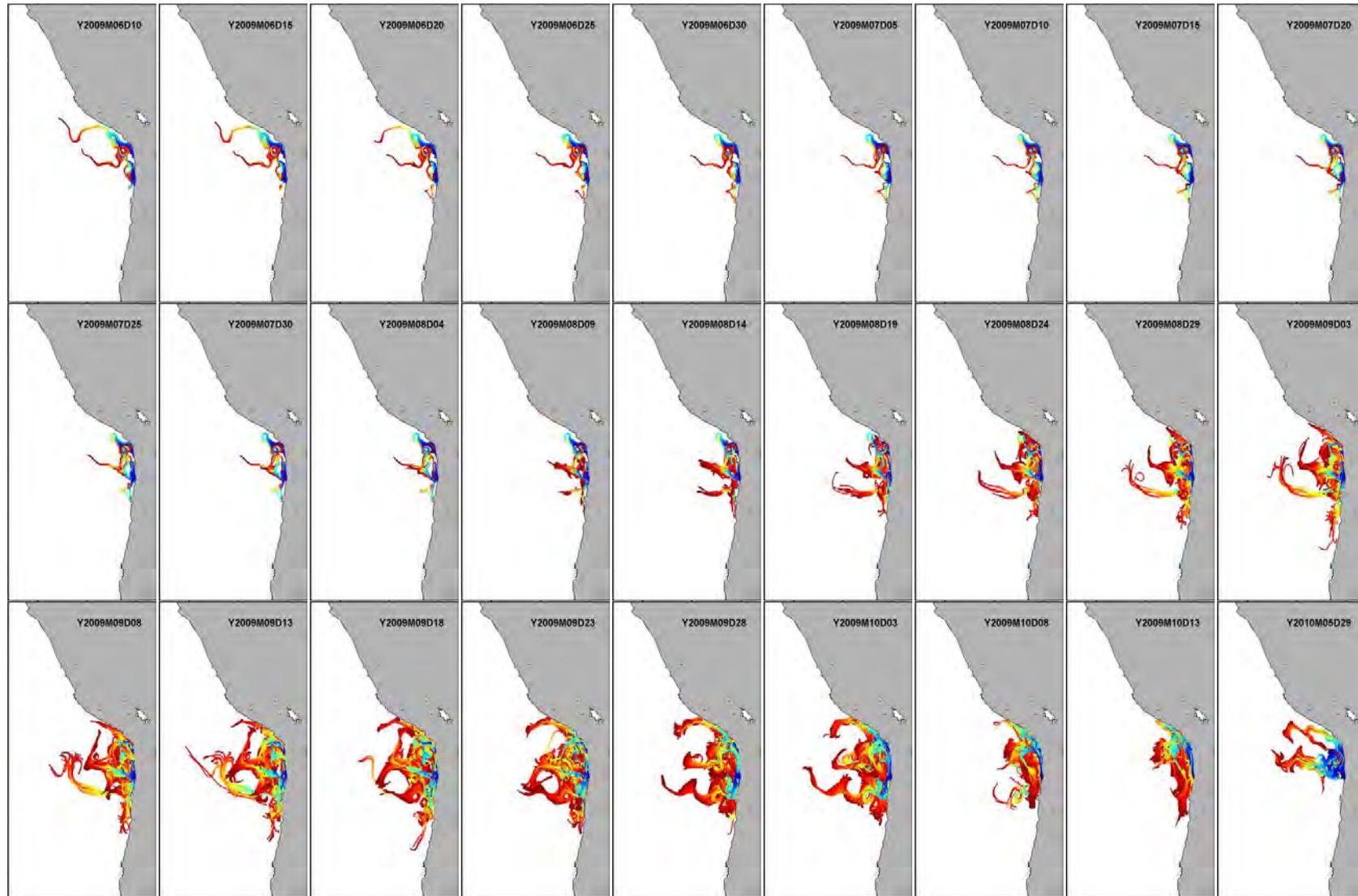






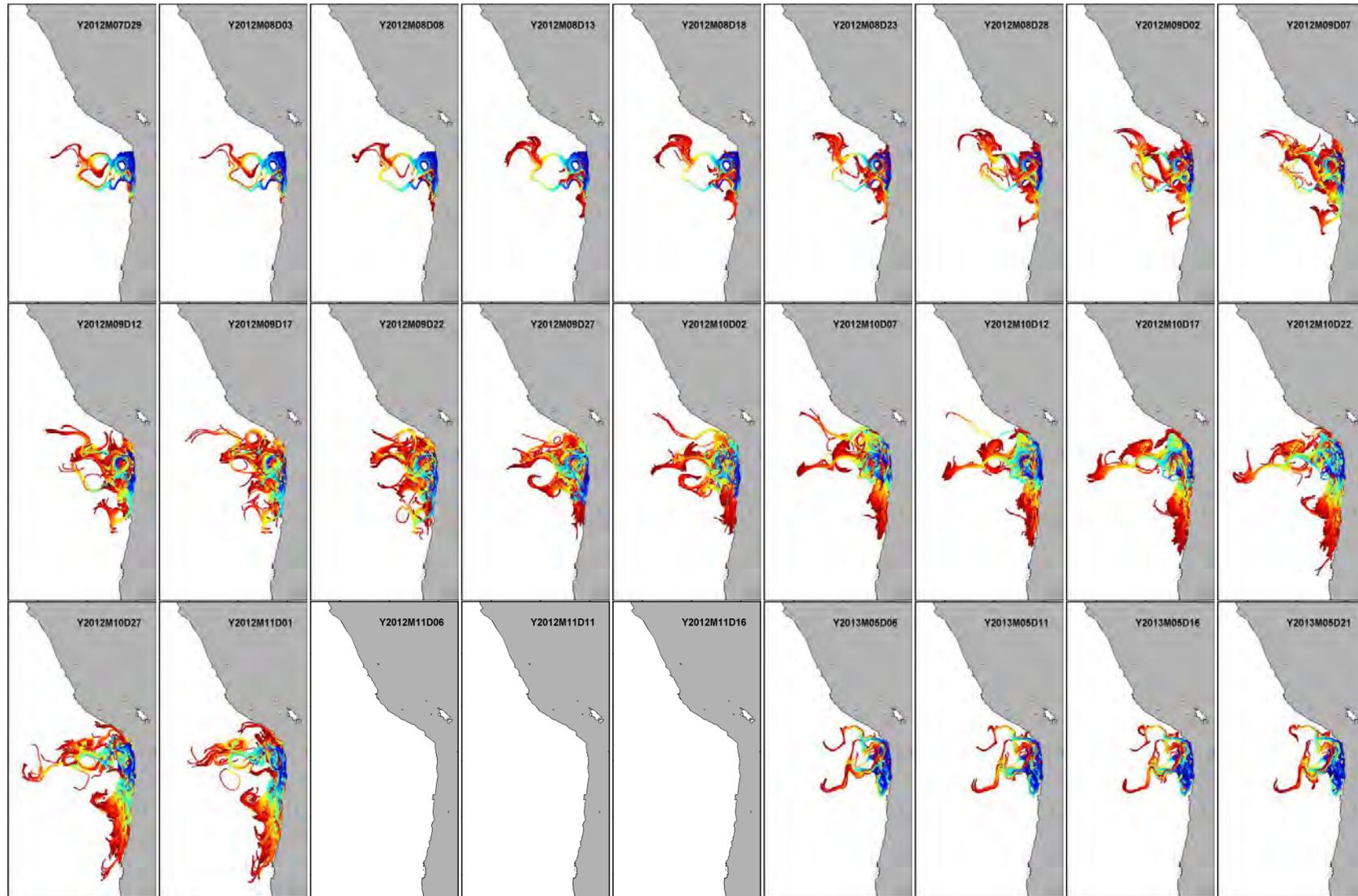


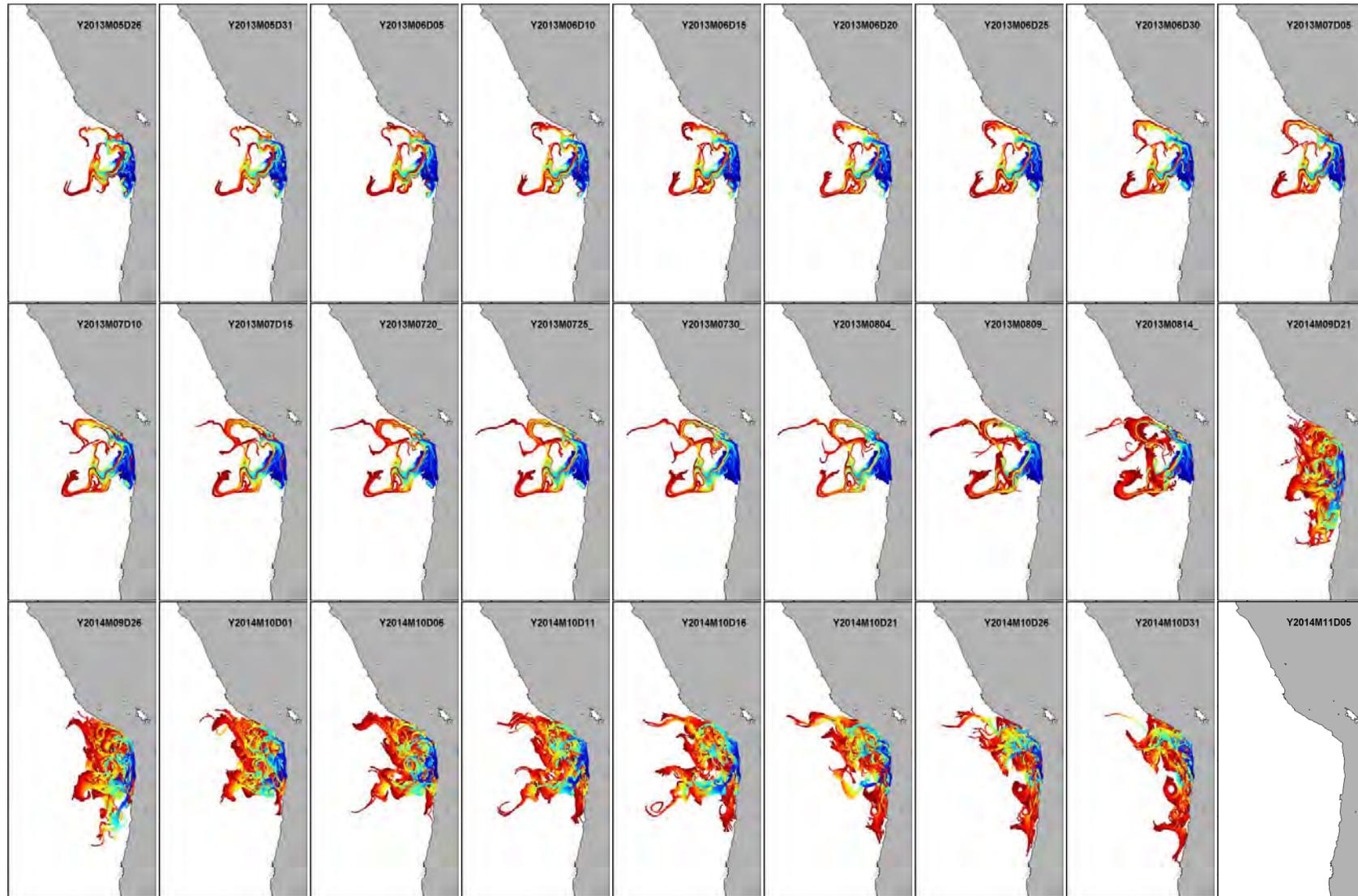


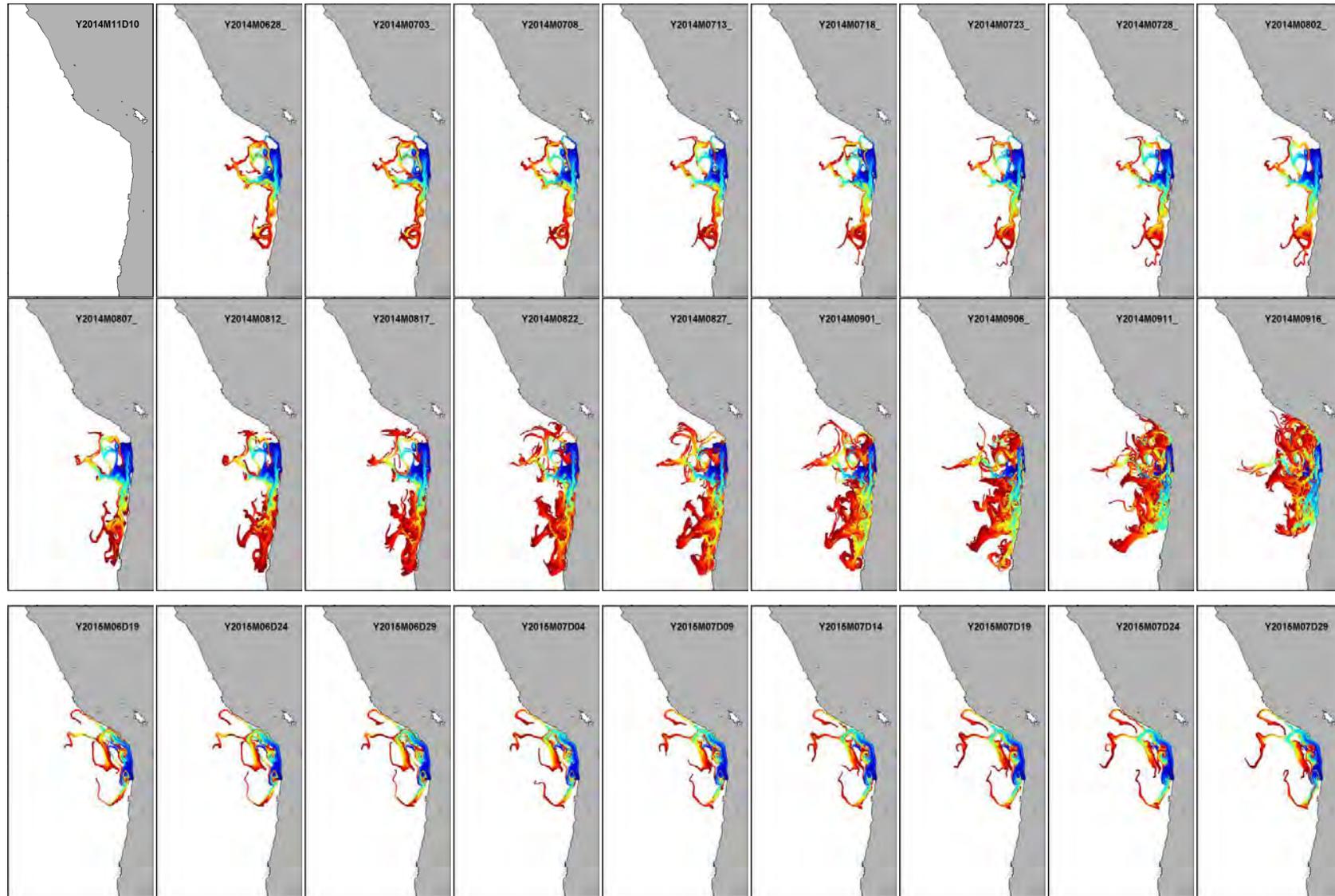


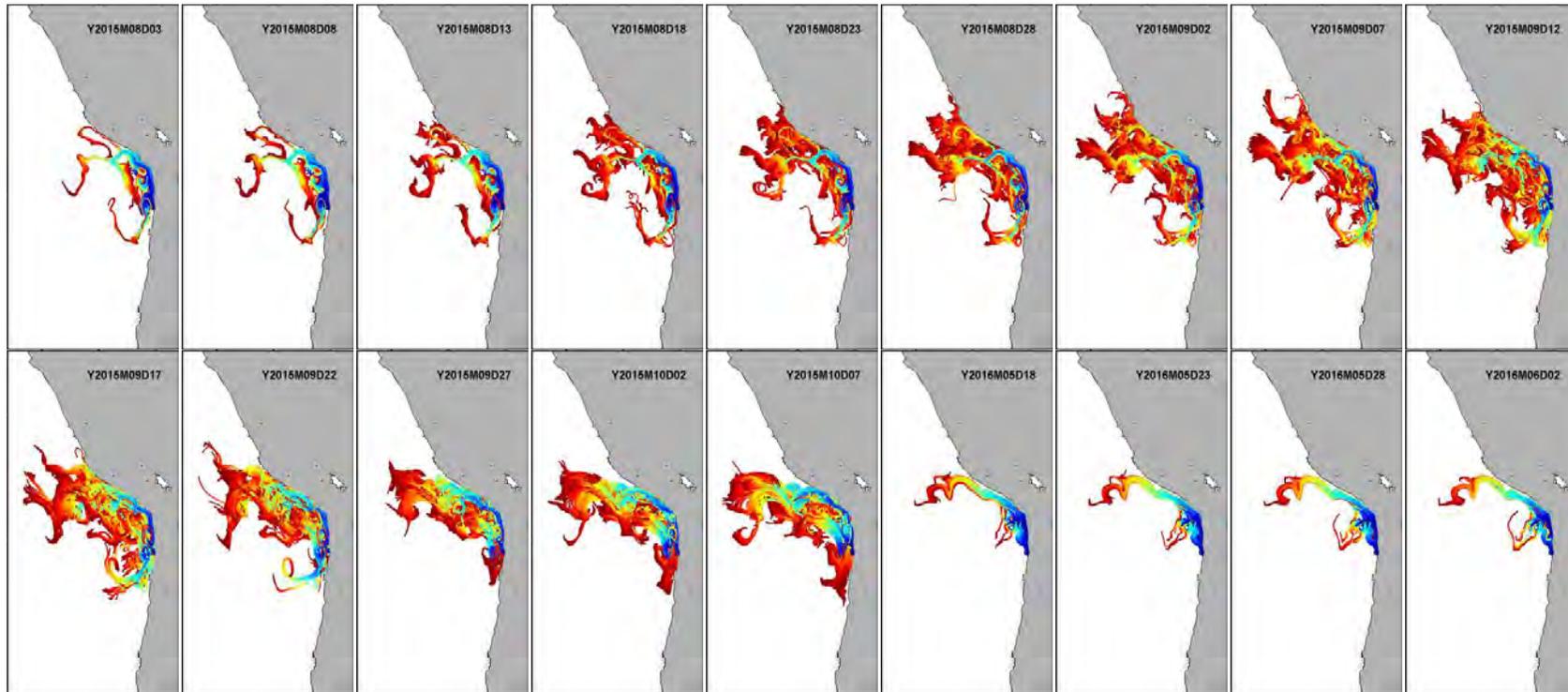


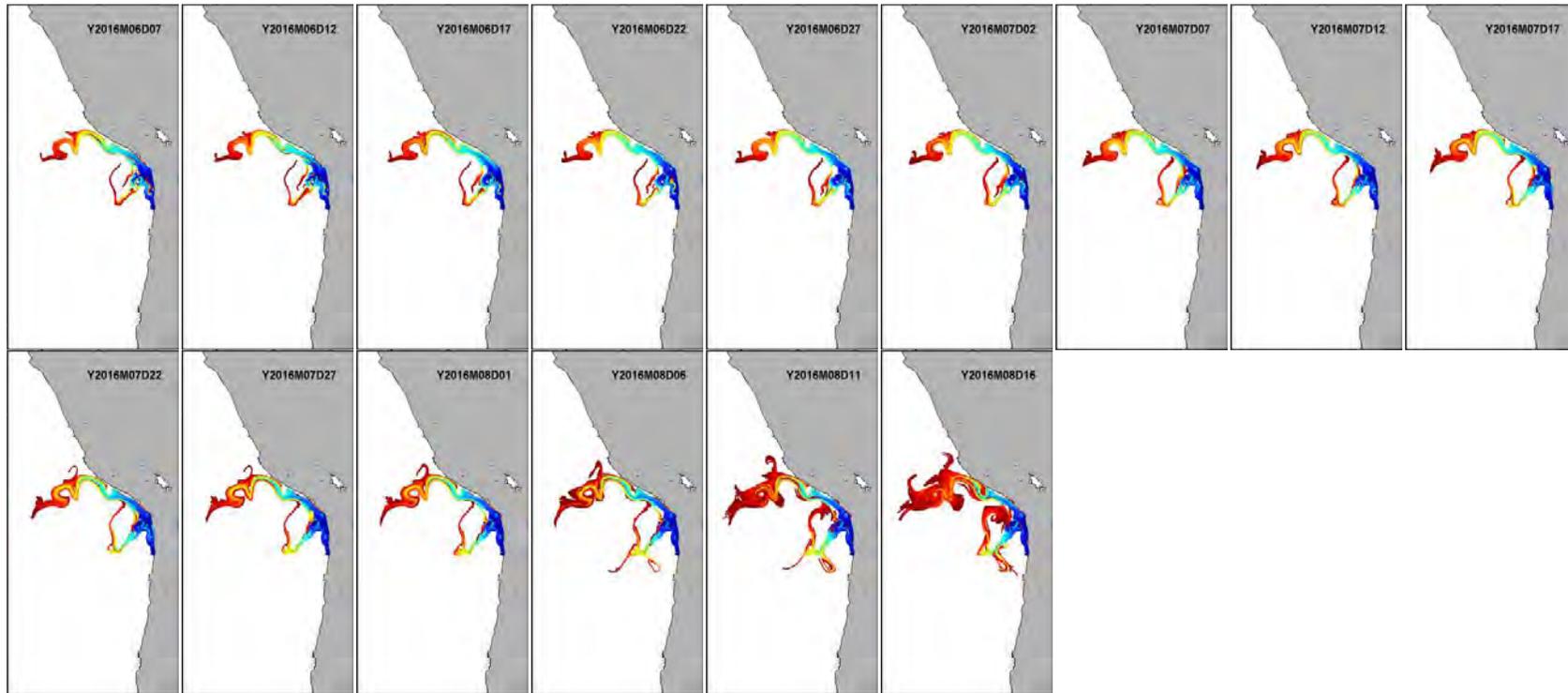












Anexo VIII. Trayectorias de transporte de huevos y larvas de anchoveta simuladas mediante modelación biofísica en el norte de Chile: desoves generados en la región de Antofagasta.

