



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

**TRANSPORTE Y RETENCIÓN DE
LARVAS DE CONCHA DE ABANICO
Argopecten purpuratus ENTRE LA BAHÍA
DE SECHURA Y LA ISLA LOBOS DE
TIERRA USANDO UN MODELO
LAGRANGIANO**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAESTRO EN
CIENCIAS DEL MAR**

Lic. JORGE ARTURO FLORES VALIENTE

**LIMA – PERÚ
2016**

ASESOR DE LA TESIS

Dr. Jorge Larry Tam Málaga

Profesor principal Programa de Maestría en Ciencias del Mar
Investigador del Instituto del Mar del Perú (IMARPE)

CO – ASESOR DE LA TESIS
Dr. Timothée Brochier
IRD – Francia

JURADO EVALUADOR DE LA TESIS

Dr. François Colas (Presidente)

MSc. Ricardo Bandin LLanos (Secretario)

Dra. Tania Peña-Baca (Vocal)

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia, a mi mamá Gloria y mi papá José, quienes desde pequeño dedicaron sus esfuerzos a mi educación y también la de mis hermanas, para quienes espero ser un buen ejemplo; a mis abuelos Marina y Rodolfo, quienes hicieron de mis vacaciones escolares momentos agradables en el campo; a mi abuelo José María, a quien no conocí pero que educó a buen padre para mí y en especial a mi abuela Manuela, quien siempre tuvo palabras dulces para sus nietos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible con el apoyo de la beca integral y el aporte a la ciencia por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC) del Ministerio de Educación del Perú en el marco de la Cátedra CONCYTEC en Ciencias del Mar.

Agradecimiento especial al Dr. Jorge Tam por los consejos diarios para la realización de la investigación y porque siempre está presto para discutir de variados temas; a los compañeros de Laboratorio de Modelado Oceanográfico, Ecosistémico y del Cambio Climático (LMOECC) de IMARPE por su importante ayuda para resolver problemas informáticos y de programación. A los investigadores del IRD, Dr. François Colas y Dr. Vincent Echevin que colaboraron enormemente facilitando el modelo hidrodinámico (ROMS). Agradezco también al Dr. Timothée Brochier y Dr. Christophe Lett por el asesoramiento y apoyo técnico en el manejo del modelo ICHTHYOP.

A la Dra. Laure Pecquerie y al Dr. Jonathan Flye por su apoyo y enseñanzas en el curso DEB en Marsella; al grupo del JEAI y el proyecto DISCOH-2 quienes facilitaron mi estadía en dicho curso.

Gracias a mis amigos de la promoción Ciencias del Mar-2014 y en especial a Edgart, quien ha estado presente desde el pre-grado compartiendo momentos buenos y también difíciles (aunque el tiempo de seguir caminos diferentes está próximo).

Gracias a los aportes del Dr. Arturo Aguirre, Dr. Jaime Mendo, Blgo. Juan Arguelles y Blga. María Nelly Sanjinez, quienes ayudaron con su amplia experiencia en campo sobre concha de abanico y propiciaron la mejora de esta investigación en concha de abanico.

RESUMEN

Se realizaron simulaciones para investigar el éxito de transporte y retención larval de *Argopecten purpuratus* entre la bahía de Sechura y la isla Lobos de Tierra usando el modelo lagrangiano ICHTHYOP forzado con salidas del modelo hidrodinámico ROMS. El mes de desove, profundidad de desove y la edad mínima de asentamiento afectaron significativamente ($p < 0.05$) los procesos de transporte y retención. El éxito de transporte larval desde Sechura hacia Lobos de Tierra (0.0149 %) fue significativamente mayor ($p < 0.05$) que el transporte en sentido contrario (0.0066 %). Las partículas liberadas a mayor profundidad de desove (20-30 m en Sechura y 30-45 m en Lobos de Tierra) lograron mayor éxito de transporte y retención, además, edades mínimas de asentamiento menores también favorecieron a estos procesos. Según la profundidad de transporte de las partículas se asoció la Corriente Costera Peruana (CCP) al transporte larval desde Lobos de Tierra hacia Sechura, mientras que la Corriente Sub-superficial Peruano Chilena (CSSPCH) estaría asociada al transporte larval en sentido opuesto. La retención larval en Sechura (0.6213 %) fue significativamente menor ($p < 0.05$) que la retención en Lobos de Tierra (2.0358 %). De acuerdo a las tasas de éxito de transporte y retención larval se puede considerar al sistema norte “bahía de Sechura - isla Lobos de Tierra” como una “fuente débil - sumidero fuerte”. Se discute la importancia de conservar el banco de la bahía como fuente de larvas de concha de abanico.

Palabras clave: *Argopecten purpuratus*, transporte larval, retención larval, IBM, ICHTHYOP, ROMS

ABSTRACT

Simulations were performed to investigate the transport success and larval retention of *Argopecten purpuratus* between Sechura Bay and Lobos de Tierra Island using the Lagrangian ICHTHYOP model forced by archived hydrodynamic model ROMS. The spawning month, spawning depth and minimum age of settlement significantly affected ($p < 0.05$) the transport and retention processes. The larval transport success from Sechura to Lobos de Tierra (0.0149%) was significantly higher ($p < 0.05$) than the transport in the opposite direction (0.0066%). Particles released deeper (20-30 m in Sechura and 30-45 m in Lobos de Tierra) achieved greater transport and retention success, in addition, smaller minimum settlement ages also favored these processes. According to the vertical distribution of the particles, the Peruvian Coastal Current (PCC) was associated with larval transport from Lobos de Tierra to Sechura, while the Peru-Chile Undercurrent (PCUC) was associated with larval transport in the opposite direction. The larval retention in Sechura (0.6213%) was significantly lower ($p < 0.05$) than the retention in Lobos de Tierra (2.0358%). According to the larval transport success rates and larval retention rates the northern system "Sechura Bay - Lobos de Tierra" can be considered as a "weak source - strong sink". The importance of conserving the bank of Sechura Bay as a source of fan shell larvae is discussed.

Keywords: *Argopecten purpuratus*, larval transport, larval retention, IBM, ICHTHYOP, ROMS

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	5
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
2.2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.2.1. Aspectos generales	7
2.2.2. Biología y ecología de <i>Argopecten purpuratus</i>	9
2.2.2.1. Descripción taxonómica y distribución espacial	9
2.2.2.2. Características de su hábitat, dieta y depredadores naturales.....	13
2.2.2.3. Ciclo biológico	13
2.2.3. La concha de abanico en la isla Lobos de Tierra.....	19
2.2.4. La concha de abanico en la bahía de Sechura	20
2.2.5. Modelo Basado en Individuos	23
2.2.6. De partículas a individuos	25
2.2.7. Circulación General.....	26
2.2.7.1. Circulación en la bahía de Sechura	29
2.2.7.2. Circulación en la isla Lobos de Tierra.....	32
2.3. ESTUDIOS PREVIOS DE TRANSPORTE Y RETENCIÓN LARVAL EN DIFERENTES ORGANISMOS; PROYECCIÓN A ENTENDER UN SISTEMA FUENTE - SUMIDERO.....	34
2.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	37
2.5. OBJETIVOS	40
2.5.1. Objetivo general	40
2.5.2. Objetivos específicos.....	40
2.6. HIPÓTESIS	40
3. METODOLOGÍA	41
3.1. MODELO HIDRODINÁMICO (ROMS).....	41
3.2. MODELO IBM (ICHTHYOP)	42
3.2.1. Propósito.....	42
3.2.2. Variables de estado.....	44
3.2.3. Visión general y planificación de procesos	44
3.2.4. Diseño de conceptos.....	44

3.3.	SUB-MODELOS	45
3.3.1.	Estrategia de desove	45
3.3.2.	Proceso de advección	45
3.3.3.	Proceso de dispersión horizontal.....	45
3.4.	EXPERIMENTOS DE SIMULACIÓN	46
3.4.1.	Simulación I y II.....	46
3.4.2.	Simulación III y IV	46
3.5.	DE PARTÍCULAS A INDIVIDUOS.....	47
3.6.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	48
3.7.	TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS	49
4.	RESULTADOS.....	51
4.1.	PERFIL DE CORRIENTES MERIDIONALES (V) Y ZONALES (U).....	51
4.2.	ÉXITO DE TRANSPORTE LARVAL.....	58
4.2.1.	Éxito de transporte desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra.....	58
4.2.1.1.	Efecto del mes de desove sobre el éxito de transporte	58
4.2.1.2.	Efecto de la profundidad de desove sobre el éxito de transporte	58
4.2.1.3.	Efecto de la edad mínima de asentamiento sobre el éxito de transporte	58
4.2.1.4.	Interacción de los factores sobre el éxito de transporte.....	60
4.2.2.	Éxito de transporte desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura.....	62
4.2.2.1.	Efecto del mes de desove sobre el éxito de transporte	62
4.2.2.2.	Efecto de la profundidad de desove sobre el éxito de transporte	62
4.2.2.3.	Efecto de la edad mínima de asentamiento sobre el éxito de transporte	62
4.2.2.4.	Interacción de los factores sobre el éxito de transporte.....	64
4.2.3.	Retención larval en la bahía de Sechura.....	66
4.2.3.1.	Efecto del mes de desove sobre la retención larval	66
4.2.3.2.	Efecto de la profundidad de desove sobre la retención larval	66
4.2.3.3.	Efecto de la edad mínima de asentamiento sobre la retención larval	66
4.2.3.4.	Interacción de los factores sobre la retención larval	67
4.2.4.	Retención larval en la isla Lobos de Tierra.....	70
4.2.4.1.	Efecto del mes de desove sobre la retención larval	70
4.2.4.2.	Efecto de la profundidad de desove sobre la retención larval	70
4.2.4.3.	Efecto de la edad mínima de asentamiento sobre la retención larval	70
4.2.4.4.	Interacción de los factores sobre la retención larval	71
4.3.	TRAYECTORIA DE PARTÍCULAS.....	74

4.3.1.	Trayectoria de partículas desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra...	74
4.3.2.	Trayectoria de partículas desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura...	76
4.4.	DE PARTÍCULAS A INDIVIDUOS.....	79
5.	DISCUSIÓN.....	80
5.1.	MODELO HIDRODINÁMICO (ROMS).....	80
5.2.	TRANSPORTE Y RETENCIÓN DE LARVAS	81
6.	CONCLUSIONES.....	86
6.1.	SOBRE EL ÉXITO DE TRANSPORTE LARVAL	86
6.2.	SOBRE LA RETENCIÓN LARVAL.....	87
7.	RECOMENDACIONES.....	89
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Relación entre los componentes espacial y temporal del transporte larval, dispersión larval, y conectividad poblacional para especies sésiles. La sobrevivencia no está representada. Los círculos blancos son locaciones en el espacio con coordenadas x,y en tiempos t . Todas las locaciones son pelágicas, excepto x_0,y_0 y x_4,y_4 , los que son locaciones bentónicas. Imagen tomada de (Pineda et al. 2007)..... 8
- Figura 2. Distribución geográfica de los principales bancos de *Argopecten purpuratus* y zonas adaptadas para su cultivo (suspendido y de fondo) en la costa de Perú (Mendo et al. 2016)..... 12
- Figura 3. Esquema del ciclo de vida de *Argopecten purpuratus* mostrando la fase larval pelágica y la fase bentónica (modificado de Mendo et al. 2016). 17
- Figura 4 Gráfico de barras del porcentaje de tallas de *Argopecten purpuratus* en la isla Lobos de Tierra entre los años 1998 a 2006. Las tallas son expresadas en milímetros (mm) (Modificado de Mendo 2009). 20
- Figura 5. Carta batimétrica de la bahía de Sechura (IMARPE, 2007)..... 22
- Figura 6 Gráfica de barras de la población de concha de abanico (expresado en millones de individuos). La línea roja representa la biomasa estimada expresada en toneladas. Parte superior (bahía Sechura), parte inferior (isla Lobos de Tierra). 23
- Figura 7. Esquema resumido de corrientes oceánicas; los nombres de cada corriente se mantendrán en inglés. (a) Salinidad superficial del mar y en flechas las corrientes superficiales, (b) Temperatura superficial del mar y en flechas las corrientes sub-superficiales. Las recientemente definidas Ecuador-Peru Coastal Current (EPCC) y Chile-Peru Deep Coastal Current (CPDCC) están indicadas con flechas blancas. Corrientes superficiales, SEC: South Equatorial Current; EPCC: Ecuador-Peru Coastal Current; POC: Peru Oceanic Current; PCC: Peru Coastal Current. Corrientes sub-superficiales, EUC: Equatorial Undercurrent; pSSCC: primary (northern branch) Southern Subsurface Countercurrent; sSSCC: secondary (southern branch) Southern Subsurface Countercurrent; PCCC: Peru-Chile Countercurrent; PCUC: Peru-Chile Undercurrent; CPDCC: Chile-Peru Deep Coastal Current (modificado de Chaigneau et al. 2013). 28
- Figura 8. Variaciones estacionales del transporte (en Sv) para la (a) Corriente Sub-superficial Peruano Chilena (PCUC, por sus siglas en inglés), (b) Corriente Costera Peruana (PCC por sus siglas en inglés) bajo condiciones pre-industriales (línea negra) y bajo condiciones de $4xCO_2$ (línea roja). El transporte fue calculado por el flujo en dirección ecuatorial a través de un promedio cross-shore entre $6^{\circ}S$ y $12^{\circ}S$ (de Echevin et al. 2011). 29
- Figura 9 Circulación marina a los niveles de 15, 30 y 45 metros de profundidad en la bahía de Sechura en Julio de 1998 (Morón et al. 2013). 31
- Figura 10 Dirección y velocidades de las corrientes locales en la isla Lobos de Tierra (Region-Piura y Region-Lambayeque 2004). 33

Figura 11 Vista de la sección transversal entre la isla y la costa de Lambayeque, frente a El Palo (Region-Piura y Region-Lambayeque 2004).	33
Figura 12 Producción de concha de abanico en el Perú de acuerdo a su origen. Imagen tomada de (Mendo 2009).	37
Figura 13 Diagrama de flujo del Modelo Basado en Individuos (ICHTHYOP), que utiliza como forzantes las salidas del Modelo Hidrodinámico (ROMS).	41
Figura 14 Diagrama de flujo del modelo ICHTHYOP, donde MD = mes de desove, PD = profundidad de desove, EMA = edad mínima de asentamiento.	43
Figura 15 Perfil mensual de corriente meridional (v). Latitud 6.32 °S y longitud 80.83 °O. Este punto está ubicado entre la línea de costa y la isla Lobos de Tierra. Los valores positivos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el norte y los valores negativos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el sur.	52
Figura 16 Perfil mensual de corriente meridional (v). Latitud 6.19 °S y longitud 81.07 °O. Los valores positivos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el norte y los valores negativos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el sur.	53
Figura 17 Perfil mensual de corriente meridional (v). Latitud 5.51 °S y longitud 81.30 °O. Los valores positivos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el norte y los valores negativos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el sur.	54
Figura 18 Perfil mensual de corriente zonal (u). Latitud 6.32 °S y longitud 80.83 °O. Este punto está ubicado entre la línea de costa y la isla Lobos de Tierra. Los valores positivos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el norte y los valores negativos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el sur.	55
Figura 19 Perfil mensual de corriente zonal (u). Latitud 6.19 °S y longitud 81.07 °O. Los valores positivos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia la costa (onshore) y los valores negativos indican un flujo de corriente (en m/s) off-shore.	56
Figura 20 Perfil mensual de corriente zonal (u). Latitud 5.51 °S y longitud 81.30 °O. Los valores positivos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia la costa (onshore) y los valores negativos indican un flujo de corriente (en m/s) off-shore.	57
Figura 21 Éxito de transporte larval desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra en función de a) el mes de desove, b) la profundidad de desove y c) la edad mínima de asentamiento.	59
Figura 22 Gráfico de barras del éxito de transporte larval (%) desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra para cada edad mínima de asentamiento.	60

Figura 23 Éxito de transporte larval desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura en función de a) el mes de desove, b) la profundidad de desove y c) la edad mínima de asentamiento.	63
Figura 24 Gráfico de barras del éxito de transporte larval (%) desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura para cada edad mínima de asentamiento.....	64
Figura 25 Retención larval en la bahía de Sechura en función de a) el mes de desove, b) la profundidad de desove y c) la edad mínima de asentamiento.....	67
Figura 26 Gráfico de barras de la retención larval (%) en la bahía de Sechura para cada edad mínima de asentamiento.....	68
Figura 27 Retención larval en la isla Lobos de Tierra en función de a) el mes de desove, b) la profundidad de desove y c) la edad mínima de asentamiento.....	71
Figura 28 Gráfico de barras de la retención larval (%) en la isla Lobos de Tierra para cada edad mínima de asentamiento.....	72
Figura 29 Trayectoria del total de partículas transportadas desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra. Los bigotes indican los límites de confianza al 95%. El sentido del transporte es de izquierda a derecha.	75
Figura 30 Trayectoria del total de partículas transportadas desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura. Los bigotes indican los límites de confianza al 95%. El sentido del transporte es de derecha a izquierda.	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especies de "scallops" que habitan la costa de Perú (Coan and Valentich Scott 2012 en Mendo et al. 2016).....	10
Tabla 2. Principales características de los estadios de desarrollo y actividades del cultivo suspendido del <i>Argopecten purpuratus</i> (modificado de Bandin 1994).	16
Tabla 3. Tabla resumen de las investigaciones realizadas en transporte larval.	35
Tabla 4. Tabla resumen de las investigaciones realizadas en retención larval.	35
Tabla 5. Tipología de escenarios de sistemas fuente-sumidero basados en los porcentajes de retención y éxito del transporte (J. Tam, com. pers.).	36
Tabla 6 Resumen de los experimentos realizados con el modelo ICHTHYOP.....	47
Tabla 7 Resumen de la biomasa (expresada en toneladas) y la población (expresada en millones de individuos) de la isla Lobos de Tierra y la bahía de Sechura entre los años 1995 -2010. Los datos fueron recopilados de los reporte de IMARPE.....	48
Tabla 8 ANOVA para la salida de la Simulación I mostrando la importancia relativa de cada factor y sus interacciones, sobre el éxito de transporte larval desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra. (***) altamente significativo).	61
Tabla 9 ANOVA para la salida de la Simulación II mostrando la importancia relativa de cada factor y sus interacciones, sobre el éxito de transporte larval desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura. (***) altamente significativo)	65
Tabla 10 ANOVA para la salida de la Simulación III mostrando la importancia relativa de cada factor y sus interacciones, sobre sobre la retención en la bahía de Sechura. (***) altamente significativo)	69
Tabla 11 ANOVA para la salida de la Simulación IV mostrando la importancia relativa de cada factor y sus interacciones, sobre sobre la retención en la isla Lobos de Tierra. (***) altamente significativo).....	73

1. INTRODUCCIÓN

Argopecten purpuratus, es un molusco bentónico, conocido en el ámbito nacional de Perú como “Concha de abanico” y en el ámbito internacional como “Peruvian scallop” o “Bay scallop”. Esta especie ha alcanzado un importante lugar en la sociedad peruana, convirtiéndose en un insumo importante de su variada gastronomía marina, además de ser un importante impulso en la economía de varias comunidades de pescadores artesanales dedicadas a la extracción y cultivo (en modalidad de suspendido y de fondo) de este recurso.

A. purpuratus, como recurso hidrobiológico, habitualmente se puede encontrar en bancos, donde su población y biomasa es significativa. En Perú, los principales bancos se pueden observar en zonas someras y protegidas como la bahía de Sechura, la bahía Independencia y la isla Lobos de Tierra, pero además existen otros bancos con poblaciones menos numerosas como las bahías de Paita, Chimbote, Casma, Samanco y Callao. Además la presencia de este recurso se extiende hasta Chile, donde se pueden encontrar bancos naturales de concha de abanico en zonas como Iquique, Mejillones y Tongoy (Wolff and Mendo 2000).

Gracias a la gran aceptación en el mercado mundial de este recurso, muchas áreas en la costa peruana, han sido implementadas para el cultivo suspendido y el cultivo de fondo, ampliando la distribución geográfica de esta especie. Actualmente es difícil encontrar áreas con poblaciones de concha de abanico que no han tenido intervención humana, ya sea de modo extractivo o utilizadas para el cultivo (suspendido o de fondo).

En las últimas décadas, esta especie se ha convertido en uno de los moluscos de exportación más importantes en el Perú, con fuertes fluctuaciones en los volúmenes de desembarques desde el inicio de la exportación que data de los años ochenta. Los niveles

poblacionales de los bancos, en especial los bancos de la bahía Independencia, la bahía de Sechura y la isla Lobos de Tierra, se correlacionan muy bien con los desembarques (Mendo et al. 2008).

De manera natural, el incremento poblacional de los bancos se ve favorecido principalmente por fuertes asentamientos influenciados positivamente por el evento El Niño (evento climático cálido del ecosistema marino), como ocurrió en 1982/83 y 1997/98. Sin embargo los efectos de eventos como El Niño o La Niña (evento climático opuesto al Niño), en algunas zonas de la costa peruana no están aún bien documentadas (Mendo and Wolff 2003).

En Chile el cultivo de *A. purpuratus* fue un éxito y es considerada como una de las actividades más prometedoras en el campo de la acuicultura, siendo la producción del año 1999 (posterior al evento El Niño), superada sólo por los volúmenes cosechados de salmones y alga *Gracilaria sp.* Las 1700 toneladas de carne de *Argopecten purpuratus* producidas en ese año, permitieron a Chile posicionarse como el tercer productor mundial de pectínidos por cultivo, luego de China y Japón. En términos económicos, el cultivo de concha de abanico en el año 1998 alcanzó el primer lugar entre las distintas especies de moluscos que comercializó ese país, superando incluso al recurso *Concholepas concholepas* y generando alrededor de US\$ 21 millones de dólares en divisas, por concepto de venta del producto en mercados extranjeros tales como Francia, Bélgica, Alemania, Argentina, USA, Taiwan, y Nueva Zelandia (Avendaño et al. 2001a).

Actualmente, bajo condiciones ambientales frías en la zona norte del país, los desembarques se han incrementado considerablemente en la bahía de Sechura y en la isla Lobos de Tierra debido al incremento de los niveles poblacionales en sus bancos (Mendo et al. 2008). La isla Lobos de Tierra como banco de *A. purpuratus* y debido a su lejanía de la

costa, se convirtió en la despensa de semillas de concha de abanico (individuos juveniles entre 10 - 30 milímetros de altura de valva), que son extraídos manualmente por buzos artesanales de la zona y luego son transportados en embarcaciones hacia diversas zonas de engorde en la costa norte de Perú, principalmente la bahía de Sechura, usada desde hace algunos años por los pescadores artesanales y empresas privadas, como zona de acopio de las semillas provenientes de la isla Lobos de Tierra.

La concha de abanico ejemplifica a las pesquerías de pectínidos dependientes de poblaciones naturales, que muestra grandes fluctuaciones de rendimiento anual como consecuencia de asentamientos irregulares y la sobre-explotación (Mottet 1979).

El cultivo de concha de abanico depende básicamente del abastecimiento de semillas que tienen tres fuentes principales: la primera fuente es la producción en “hatchery” (donde se hace desovar individuos adultos y luego los embriones son cuidados, alimentados y cultivados en laboratorio hasta que logran convertirse en juveniles con una talla de aproximadamente 10 milímetros de altura de valva, para luego ser puestos en los sistemas de cultivo en el medio natural; la segunda fuente es la captación de semillas del ambiente natural mediante el uso de bolsas captadoras de larvas, actividad ampliamente difundida a partir de la experiencia exitosa en Japón (Mottet 1979) y la tercera fuente es la translocación de individuos juveniles desde un ambiente natural hacia una zona implementada para el cultivo; esta última actividad es deficientemente regulada y monitoreada generando vacíos de información que luego se convertirán en problemas de manejo y toma de decisiones.

La variabilidad de la producción de los bancos de concha de abanico se presenta como un desafío para el manejo y la sostenibilidad de este recurso. Esto implica estudiar y conocer la dinámica poblacional de esta especie desde la distribución geográfica y actividad de desove de los bancos parentales, hasta el proceso de reclutamiento poblacional. Esta investigación

se enfoca en aspectos complejos y poco conocidos para la mayoría de especies; estamos hablando de los procesos de transporte y retención larval que darán la luz en estudios futuros para el entendimiento de procesos posteriores como el asentamiento larval y reclutamiento poblacional. Esta investigación facilitó los primeros detalles sobre los mecanismos de transporte y retención larval de *A. purpuratus* en el sistema norte de la bahía de Sechura - isla Lobos de Tierra, haciendo uso de un enfoque de modelado.

2. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La bahía de Sechura y la isla Lobos de Tierra son dos de los bancos de concha de abanico más importantes del Perú por su alto volumen de desembarques anuales y el importante volumen de biomasa de este recurso. La concha de abanico es la especie clave en ambas áreas debido a su importancia ecológica (por ser presa de diversos depredadores como pulpos, cangrejos y equinodermos) y también gracias a su importancia económica, al ser el principal molusco de exportación de Perú (Mendo et al. 2016).

A. purpuratus es una especie mero-planctónica que pasa su fase larval como parte del plancton para posteriormente asentarse y transformarse en un organismo bentónico de escaso movimiento (Cragg 2006). El período larval de los organismos marinos como constituyente del plancton, es una fase crítica para la sobrevivencia, metamorfosis y asentamiento, eventos que luego modularán la dinámica de la población (Pineda 2000). La larva planctónica de los pectínidos, (como en muchos invertebrados bentónicos), es su principal fase de diseminación y la supervivencia larval depende de la duración de la fase planctónica y de las condiciones ambientales como la temperatura, alimento, además de la velocidad y dirección de las corrientes (Tremblay and Sinclair 1988).

El ciclo biológico de los pectínidos ha sido ampliamente estudiado principalmente enfocados en su fisiología (Barber and Blake 2006; Cragg 2006), pero aún quedan muchos vacíos de información acerca de los mecanismos de transporte y retención larval, que determinan la interacción entre zonas de desove y zonas de asentamiento. Existen estudios donde se evalúa la densidad y distribución vertical de larvas de pectínidos, pero no logran definir el origen o destino de los individuos, variando los patrones de acuerdo a la especie

como es el caso de *A. purpuratus* que muestra una mayor abundancia de larvas a profundidades de 17 metros (Bandin and Mendo 1999) mientras que *Placopecten magellanicus* mostró una mayor abundancia de larvas a profundidades de 20 metros, pero también con presencia menor de individuos hasta los 40 metros (Tremblay and Sinclair 1988; Tremblay et al. 1994).

Por lo antes expuesto, es que se hace necesaria una investigación que detalle los mecanismos que intervienen en el éxito de transporte larval de *A. purpuratus* entre la bahía de Sechura y la isla Lobos de Tierra, además de evaluar los patrones de retención larval en ambas zonas. Para poder alcanzar los objetivos de la investigación, debemos hacernos la pregunta científica: ¿Existe un flujo larval entre ambas áreas (bahía de Sechura e isla Lobos de Tierra)? y en el caso de existir dicho flujo ¿Existe algún patrón estacional del transporte larval? Esta información ayudará a definir y entender el sistema norte bahía de Sechura - isla Lobos de Tierra, dándole sustento y énfasis a los esfuerzos de conservación y proponiendo estrategias de captación larval para maximizar el suministro de semillas a las áreas de cultivo con el objetivo de minimizar la translocación de juveniles de un área natural hacia áreas vecinas dedicadas al cultivo.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Aspectos generales

(Cowen and Sponaugle 2009) definen la “dispersión larval” (Figura 1) como la propagación entre generaciones de larvas lejos de una fuente hasta un sitio de destino o sitio de asentamiento al final de su etapa larvaria. Sin embargo debemos hacer notar que la suma de distancias del transporte larval puede ser mayor a la distancia de la dispersión larval.

(Pineda et al. 2007) definen el “transporte larval” (Figura 1) como la translocación horizontal de una larva entre dos puntos (X_1, Y_1 y X_2, Y_2). En el transporte larval sólo importan las dimensiones espaciales. Aunque esta definición ignora el eje vertical (Z) por simplicidad, esta dimensión es importante para el transporte, porque una larva puede modificar su distribución horizontal gracias a su capacidad de natación vertical encontrando así diferentes intensidades y direcciones de corrientes de agua. Para transportarse desde un punto a otro una larva puede nadar horizontalmente y puede ser transportada por procesos de difusión o advección. El transporte larval definido como la translocación entre dos puntos, podría aparentar ser un proceso simple, sin embargo, un amplio rango de comportamientos larvales y mecanismos físicos, juntos con su variabilidad a múltiples escalas, hace del transporte larval un proceso difícil de medir. Las variaciones temporales y espaciales son enormes, incluso considerando un transporte causado sólo por mecanismos físicos.

Cowen and Sponaugle (2009) también definen la “conectividad poblacional” (Figura 1) como el intercambio de individuos entre sub-poblaciones separadas geográficamente que comprenden una meta-población. En el contexto de especies marinas bentónicas, la conectividad poblacional abarca la fase de dispersión desde la reproducción hasta la finalización del asentamiento (incluida la elección del hábitat y la metamorfosis). Bajo el

enfoque de la presente investigación, no mediremos el aspecto de conectividad poblacional, pero se discutirá la posibilidad de incluirlo en estudios posteriores sobre la meta-población del pacífico.

Una “meta-población” es un conjunto de sub-poblaciones locales discretas que en alguna medida tienen migración compartida entre ellas. Mientras que una “sub-población” es un conjunto de individuos que viven en un mismo hábitat y que interactúan unos con otros Cowen and Sponaugle (2009).

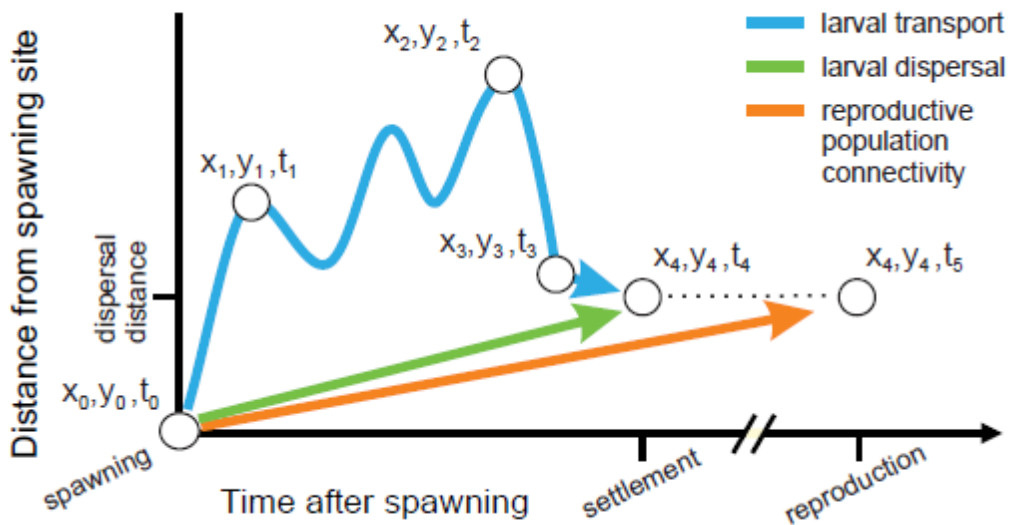


Figura 1 Relación entre los componentes espacial y temporal del transporte larval, dispersión larval, y conectividad poblacional para especies sésiles. La sobrevivencia no está representada. Los círculos blancos son locaciones en el espacio con coordenadas x,y en tiempos t . Todas las locaciones son pelágicas, excepto x_0,y_0 y x_4,y_4 , los que son locaciones bentónicas. Imagen tomada de (Pineda et al. 2007).

La “retención local” se puede definir como la proporción entre el asentamiento local producido del total de huevos que existen localmente y tiene una clara relación con la auto-persistencia de los individuos en sus sitios de origen (Lett et al. 2015). Pineda (2000) indica que el momento del desove y el transporte de larvas, conducido principalmente por las

corrientes oceánicas e influenciadas por sus características físicas, son factores que modulan la retención de larvas de muchas especies.

2.2.2. Biología y ecología de *Argopecten purpuratus*

2.2.2.1. Descripción taxonómica y distribución espacial

La posición sistemática de *Argopecten purpuratus* se detalla a continuación (Mendo et al. 2016):

Phylum Mollusca

Clase Bivalvia

Sub-clase Pteriomorphia

Súper-orden Euptheriomorphia

Orden Pectinoidea

Súper-familia Pectinoidea

Familia Pectinidae

Género **Argopecten**

Especie *Argopecten purpuratus*

A. purpuratus está presente en Perú y Chile, desde Paita (5.1 °S) hasta Valparaíso (33.1 °S) (Marincovich 1973; Wolff and Mendo 2000; González 2010). También se puede encontrar esta especie al norte de Paita, en Los Órganos (4.17 °S) y al sur del Valparaíso, aunque esto es resultado de la translocación de individuos debido a actividades con propósito de acuicultura. Esta especie se puede encontrar principalmente en aguas someras entre los 5 a 40 metros de profundidad en bahías semi-protegidas con sustrato arenoso, rocoso, de fango-arenoso o sobre conchuela (Mendo et al. 2016).

La distribución poblacional de *A. purpuratus* estaría condicionada principalmente por las características de vida de la larva, cuya permanencia como constituyente del plancton es de tres a cuatro semanas (Disalvo et al. 1984; Illanes 1986; Ysla 2009) aunque este periodo de permanencia puede reducirse en condiciones ambientales cálidas (Wolff 1987; Stotz 2000).

En el Perú existen algunas especies conocidas como “scallop”, pero *A. purpuratus* tiene la mayor importancia comercial (González 2010). En el ámbito internacional se conoce a la especie *Argopecten purpuratus* bajo el nombre común de “scallop”, sin embargo, bajo la misma denominación se le conoce también a varias especies de bivalvos que habitan la costa de Perú (Tabla 1).

Tabla 1. Especies de "scallops" que habitan la costa de Perú (Coan and Valentich Scott 2012 en Mendo et al. 2016).

Sub-familia	Nombre de la especie	Distribución	Profundidad (m)
PECTININAE	<i>Euvola perulus</i> (Olsson, 1961)	Guaymas, Golfo de California, México (27.9 °N)-Lobitos, Perú (4.5 °S)	2-119
	<i>Leopecten sericeus</i> (Hinds, 1845)	Isla Ángel de la Guarda (29.5 °N)-Caleta Cruz (3.6 °S)	13-183
	<i>Nodipecten subnudosus</i> (G. B. Sowerby I, 1835)	Isla Santa Catalina, USA (33.4 °N)-Paita, Perú (4.7 °S)	Intermareal-110
CAMPTONECTINAE	<i>Delectopecten zacae</i> (Hertlein, 1935)	Baja California Sur (24.9 °N)-Lambayeque, Perú (6.6 °S)	10-1840
CHLAMYDINAE	<i>Argopecten purpuratus</i> (Lamarck, 1819)	Paita, Perú (5.1 °S)-Valparaíso, Chile (33.1 °S)	Intermareal-95
	<i>Argopecten ventricosus</i> (G. B. Sowerby II, 1842)	California, USA (34.4 °N)-Bayovar, Perú (5.9 °S)	Intermareal-180
	<i>Lectopecten tumbezensis</i> (d'Orbigny, 1846)	Santa Rosalía, Baja California Sur (27.3 °N)-Paita, Perú (4.7 °S)	Intermareal-128
	<i>Lectopecten velero</i> (Hertlein, 1935)	Puertecitos, Baja California, México (30.3 °N)-Máncora, Perú (4.6 °S)	5-90
	<i>Spathochlamys vestalis</i> (Reeve, 1853)	Santa Catalina Island, USA (33.4 °N)-Cabo Blanco, Perú (4.3 °S)	2-160
PALLIOLINAE	<i>Pseudamussium fasciculatum</i> (Hinds, 1845)	Arena Bank, Baja California Sur (23.5 °N)-Tumbes, Perú (3.8 °S)	3-333
desconocido	<i>Hyalopecten neoceanicos</i> (Dall, 1908)	Oregon, USA (45 °N)-norte de Perú (8.1 °S)	3500-4100

Según el Reglamento de la Ley de Promoción y Desarrollo de la Acuicultura (D.S.030-2001-PE), un banco natural se define como el conjunto de organismos constituidos por una población de ejemplares bentónicos con predominio de un determinado taxón, que habitan un área geográfica específica. Los bancos naturales no pueden ser demarcados geográficamente en forma rígida, ya que los organismos que lo conforman realizan pequeñas migraciones relacionadas con procesos biológicos y ambientales.

Para evitar confusiones, en la presente investigación, haremos uso de la palabra “banco” para referirnos a un área geográfica que tiene presencia considerable de individuos de concha de abanico. Los principales bancos que producen concha de abanico en Perú son bahía Independencia, bahía de Sechura e isla Lobos de Tierra (González 2010). Hasta antes de 1980, bahía Independencia era el banco más productivo de toda la costa peruana, pero desde 1990 la bahía de Sechura y la isla Lobos de Tierra pasaron a ser los principales bancos más productivos, sin embargo existen pequeños bancos en bahías como Chimbote, Casma y Callao (Mendo et al. 2016). La Figura 2 se observa la distribución geográfica de los principales lugares donde podemos encontrar individuos de *Argopecten purpuratus*, ya sea de manera natural o en áreas que han sido adecuadas para su cultivo.

Se ha observado un incremento en la biomasa de concha de abanico en el sur del Perú y norte de Chile durante eventos El Niño (Wolff 1987; Stotz 2000), ya que estos eventos mejoran las concentraciones de oxígeno en zonas bentónicas a través de la profundización de la termoclina, por lo tanto también incrementan la actividad metabólica (respiración y crecimiento somático), debido a periodos de desarrollo desde huevo/larva hasta el asentamiento más rápidos, siendo estos los principales responsables de los “booms” poblacionales durante periodos El Niño (Wolff et al. 2007). En la bahía de Sechura, la

biomasa desovante (efecto positivo) compensa las descargas de los ríos (efecto negativo) sobre la población adulta de concha de abanico (Taylor et al. 2008).

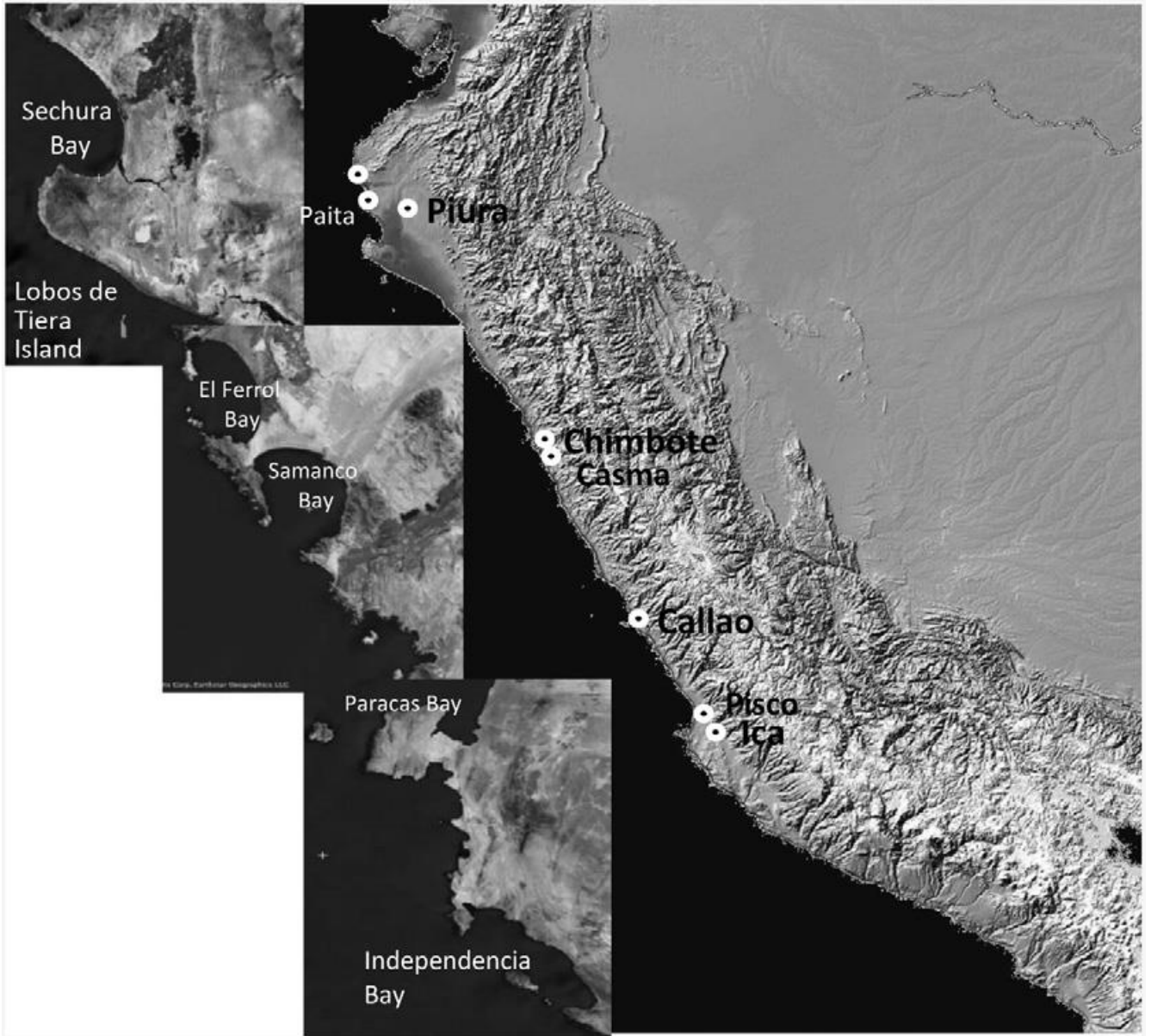


Figura 2. Distribución geográfica de los principales bancos de *Argopecten purpuratus* y zonas adaptadas para su cultivo (suspendido y de fondo) en la costa de Perú (Mendo et al. 2016).

2.2.2.2. Características de su hábitat, dieta y depredadores naturales

A. purpuratus es una especie bentónica que habita en bahías someras y de aguas relativamente tranquilas, con temperaturas que varían entre los 13°C y 28°C. Puede tolerar rangos de oxígeno entre 0.2 y 9 ml/litro (González 2010).

La concha de abanico es una especie bentónica filtradora. Análisis del contenido estomacal de individuos colectados en bahía Independencia revelaron que 87 % de las especies identificadas fueron fitoplancton (principalmente diatomeas) y el resto zooplancton (copépodos, larvas de invertebrados y protozoos) con la presencia también de detritus (Rouillon et al. 2005; IMARPE 2008).

Argopecten purpuratus es una especie clave en el ecosistema debido a su importancia ecológica, pues es parte importante de la cadena alimenticia y es presa de organismos como el caracol *Thais chocolata*, los cangrejos *Cancer porteri* y *Cancer setosus*, la estrella de mar *Luidia sp.*, el pulpo *Octopus mimus* y rayas del género *Myliobatis* (Takahashi and Mendo 2002; Alfaro et al. 2011).

2.2.2.3. Ciclo biológico

Argopecten purpuratus es una especie de pectinido hermafrodita funcional de vida libre, que libera óvulos y esperma al ambiente, donde ocurre la fertilización. Logra la madurez sexual cuando los individuos alcanzan una altura de valva aproximada de 25 milímetros (Disalvo et al. 1984; Avendaño et al. 2001b; Gosling 2003).

Argopecten purpuratus presenta dos fases importantes en su ciclo reproductivo: una **fase planctónica**, con una duración que varía de acuerdo a las condiciones ambientales (Wolff 1987; Stotz 2000), que comprende desde la fecundación hasta su etapa de post-larva,

conociéndose que la liberación de gametos puede ser estimulada por un incremento de la temperatura del agua; la otra es la **fase bentónica** que inicia cuando la post-larva se fija a un substrato mediante filamentos denominados biso que en los pectínidos, le dan una capacidad limitada para la locomoción, aunque después de fijarse al fondo se desarrolla como un organismo bentónico de escaso movimiento (Cragg 1980, 2006).

El fase planctónica de *Argopecten purpuratus* presenta una etapa de embrión, que puede durar desde algunas horas hasta dos días aproximadamente y que comprende los estadios de huevo, blástula y gástrula. Otra etapa es la de larva propiamente dicha (de duración variable) y que comprende los estadios de trocófora, velígera recta, veliconcha y larva pedivelígera. Como larva propiamente dicha, los tres últimos estadios presentan características fácilmente distinguibles al estereoscopio (Bandin 1994).

El estadio de la larva trocófora termina cuando el organismo es encerrado entre dos valvas transparentes de charnela recta que dejan apreciar algunos gránulos de vitelo (los que al desaparecer en fases más avanzadas, definen el paso de la condición lecitotrófica a la condición planctotrófica). Continúa el estadio de larva velígera recta, que tiene capacidad de locomoción que depende de un órgano ciliado llamado velo (que perdura hasta después de la metamorfosis). El estadio de veliconcha se caracteriza por la formación de dos umbos que cambian la apariencia recta de la charnela y la aparición de una concha opaca. El último estadio larval es la pedivelígera y se observa el desarrollo del pie, que le permite alternar la reptación con la actividad natatoria del velo (Bandin 1994), además de la aparición de la mancha ocular, un órgano foto-receptor, que marca el inicio de la fijación y posterior metamorfosis, siendo una etapa crítica en el desarrollo de las larvas, durante la cual se producen grandes cambios anatómicos que dependen de la acumulación de reservas energéticas en estadios previos y que puede generar altas mortalidades. Durante la fase

planctónica los movimientos verticales de la larva pueden ser voluntarios, pero los laterales responden a las corrientes de agua (Cragg 2006). Tapia et al. (1993) realizaron observaciones del comportamiento de la larva pedivelígera, describiendo la alternancia de nado libre, deslizamiento o reptación y giros en el sustrato.

Al final de su desarrollo, la pedivelígera se asienta sobre un sustrato y luego se fija mediante el biso, iniciándose la metamorfosis hacia la vida bentónica. Esta metamorfosis implica la pérdida gradual del velo, aumento del tamaño del pie, formación de branquias y la secreción de una concha irregular que da nombre al estadio de disconcha. La formación de costillas radiales en la concha determina la aparición del estado plegado, que culmina al obtener las características anatómicas de un adulto convirtiéndose primero en juvenil (Mottet 1979). Bandin (1994) recopiló información bibliográfica de las fases del ciclo biológico de concha de abanico detalladas en la Tabla 2. La Figura 3 presenta el esquema resumido con los principales estadios del ciclo biológico de *A. purpuratus*, haciendo la diferencia entre su fase pelágica y su fase bentónica.

En términos generales esta especie evacua gametos varias veces durante el ciclo anual aunque su mayor frecuencia e intensidad es en primavera y verano. Está documentado que *A. purpuratus* muestra un ciclo reproductivo continuo y sincrónico durante todo el año, durante el cual, gran parte de los ejemplares desovan más de una vez. Debido a esto no se observa un estadio claro de reposo (Chavez and Ishiyama 1988). Se ha reportado que la reproducción de *A. purpuratus* en Perú y Chile ocurre durante todo el año con pulsos importantes en los meses de Setiembre a Mayo, mientras que en la bahía de Sechura los desoves son principalmente en verano y primavera (Disalvo et al. 1984; Chavez and Ishiyama 1988).

Tabla 2. Principales características de los estadios de desarrollo y actividades del cultivo suspendido del *Argopecten purpuratus* (modificado de Bandin 1994).

ESTADIOS DE DESARROLLO											
Nomenclatura Biológica	EMBRIÓN			LARVA				DISCONCHA	ESTADO PLEGADO	JUVENIL	ADULTO
	Huevo	Blástula	Gástrula	Trocófora	Velígera Recta	Veliconcha	Pedivelígera				
Nomenclatura Técnica					Larva D	Larva Umbonada		Post-larva	Semilla	Juvenil	
Longitud (mm)	0.06		0.07	0.085	0.17		0.22	1	30	50	
Tiempo (días)	1		2		13		20	30	190	370	
ACTIVIDAD EN EL CULTIVO					MUESTREO DE PLANKTON (monitoreo larval)		EXPOSICIÓN DE COLECTORES	PRE-CULTIVO	CULTIVO FINAL		

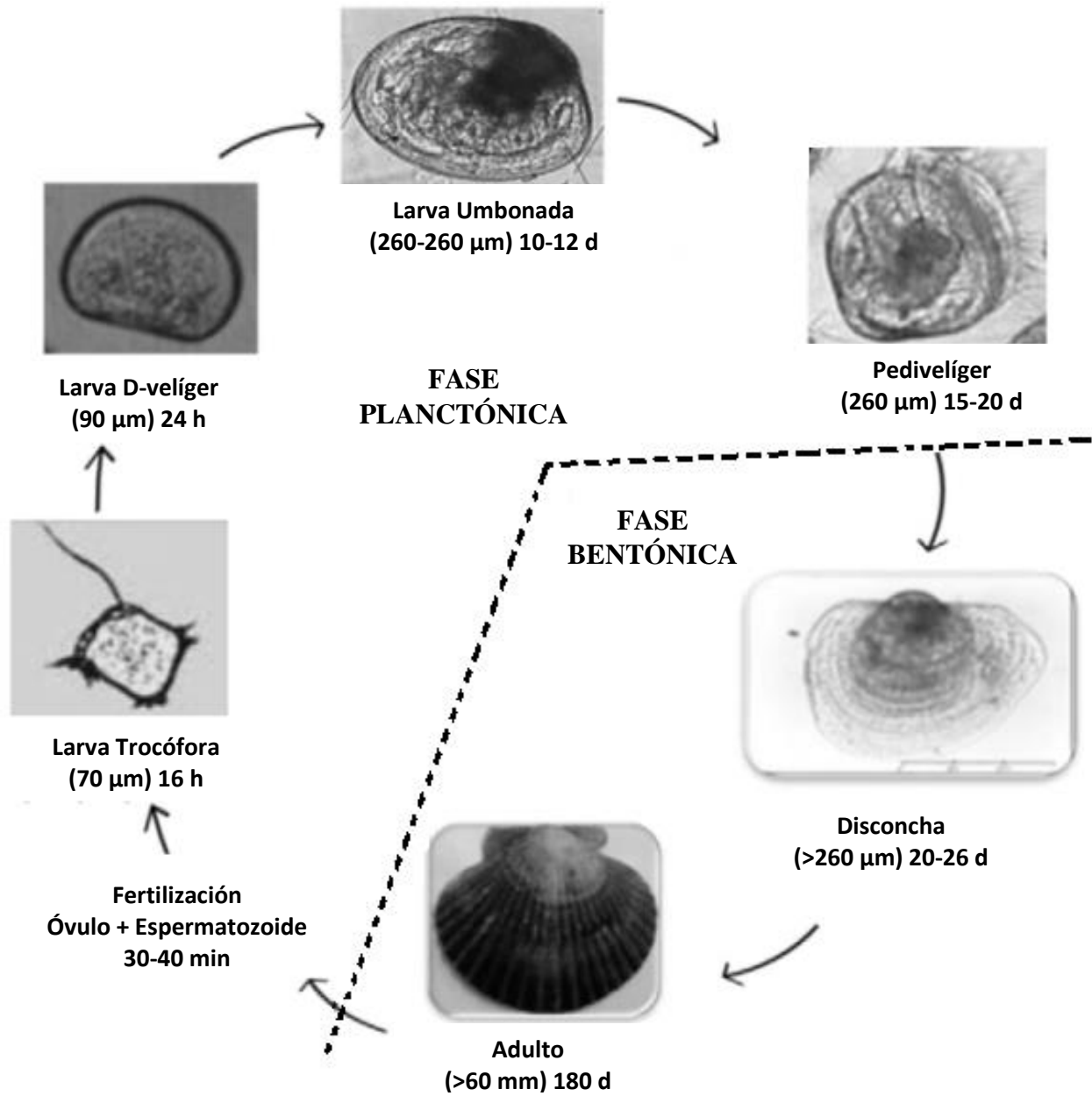


Figura 3. Esquema del ciclo de vida de *Argopecten purpuratus* mostrando la fase larval pelágica y la fase bentónica (modificado de Mendo et al. 2016).

Estudios de la fecundidad de *A. purpuratus* en Perú son limitados, pero se ha estimado que durante el primer desove se logra liberar entre 1 - 10 millones de huevos. En Chile, estudios mostraron que individuos entre 60 - 90 mm de altura valvar pueden producir entre 6 - 28 millones de huevos respectivamente (Avendaño et al. 2001b). El número de huevos liberados por cada individuo en edad reproductiva puede variar con la temperatura, mostrando una recuperación gonadal acelerada durante periodos de alta temperatura (Wolff 1988). Por lo tanto el número de huevos estaría en función del stock desovante y también de la temperatura (Wolff et al. 2007).

Esta especie tiene una dinámica poblacional irregular, con períodos de gran abundancia hasta períodos de escasez (Wolff 1988). Las fluctuaciones de concha de abanico son muy pronunciadas y se correlacionan con la presencia del evento El Niño, donde las condiciones del hábitat favorecen notablemente a la especie, estimulando la liberación de gametos e incrementando su tasa de crecimiento. El bivalvo *Argopecten purpuratus*, es uno de los invertebrados marinos que ha estado sometido a un intenso nivel de extracción en el litoral peruano, existiendo además una relación entre el asentamiento y la biomasa desovante (Wolff et al. 2007). Las capturas anuales de concha de abanico son consideradas hasta ahora como impredecibles, así también su entorno ambiental, con una dinámica poblacional favorecida por el evento El Niño, (Mendo et al. 2008).

Posterior a periodos cálidos (1982/83 – 1997/98), la población se ve favorecida por un incremento en su biomasa influenciada por un fuerte asentamiento y un incremento en la tasa de crecimiento. Sin embargo, el manejo del recurso por parte de los maricultores no siempre es el adecuado, aumentando el esfuerzo de extracción y causando, en algunos casos, el colapso de la pesquería de esta especie. El asentamiento larval y la sobrevivencia post-asentamiento, son eventos que aseguran la sostenibilidad de la población (González 2010).

2.2.3. La concha de abanico en la isla Lobos de Tierra

La isla Lobos de Tierra es habitada por numerosas especies marinas (aves y mamíferos). Se extiende frente al desierto de Sechura, a 25 millas del sureste de Punta La Negra. Es reconocida como una de las extensiones más grandes de nuestro litoral norte, en la cual, debido a su proximidad a tierra firme, se distinguen laderas pedregosas y playas arenosas. Esta atractiva zona geográfica, de clima cálido y carencia de agua dulce, registra una extensión de 6 millas de largo por 2.2 millas en su parte más ancha, en sus contornos se encuentran una serie de islotes que sirven de abrigo a sus ensenadas, los cuales se deben de tomar en cuenta para la navegación, recomendándose a los buques de gran calado evitar el pase entre la Isla y tierra firme, pues existen fondos de profundidades variables y fuertes corrientes marinas en direcciones también variables (Ruidías 2009).

Las biomásas máximas registradas en el banco de concha de abanico de la Isla Lobos de Tierra durante 1996 y 2008 estuvieron alrededor de las 7000 toneladas, que se han reducido drásticamente por efecto de la extracción hasta valores menores de 100 toneladas (Mendo 2009). El asentamiento de concha de abanico en la Isla Lobos de Tierra desde 1995 fue muy variable. Los más altos asentamientos se presentaron durante el 2002 y 2003, y se presentan muy débiles durante los años siguientes probablemente por la reducción drástica del stock de padres. La distribución de frecuencias de las tallas de la concha de abanico extraída en la Isla Lobos de Tierra con destino a la Bahía de Sechura u otras áreas de la costa peruana, presenta dos grupos modales, uno en aproximadamente 25 mm y el otro en 63 mm de altura de valva (Figura 4).

Por otro lado, la talla óptima de extracción de la concha de abanico de la Isla Lobos de Tierra, considerando la máxima biomasa o el máximo valor del cohorte se encuentra entre

80 - 90 mm de altura de valva (Mendo 2009). Un estudio de delimitación y prospección del banco de la isla Lobos de Tierra, realizado por IMARPE, determinó que en cuanto a la distribución de las “semillas” (juveniles ≤ 25 mm), éstas fueron identificadas solamente en los estratos III (10 - 20 m de profundidad) y IV (20 - 30 m de profundidad) de la parte norte de la isla asociadas a un gran núcleo de densidades mayores (> 40 ind/m²) de dicha zona (Carbajal et al. 2003).

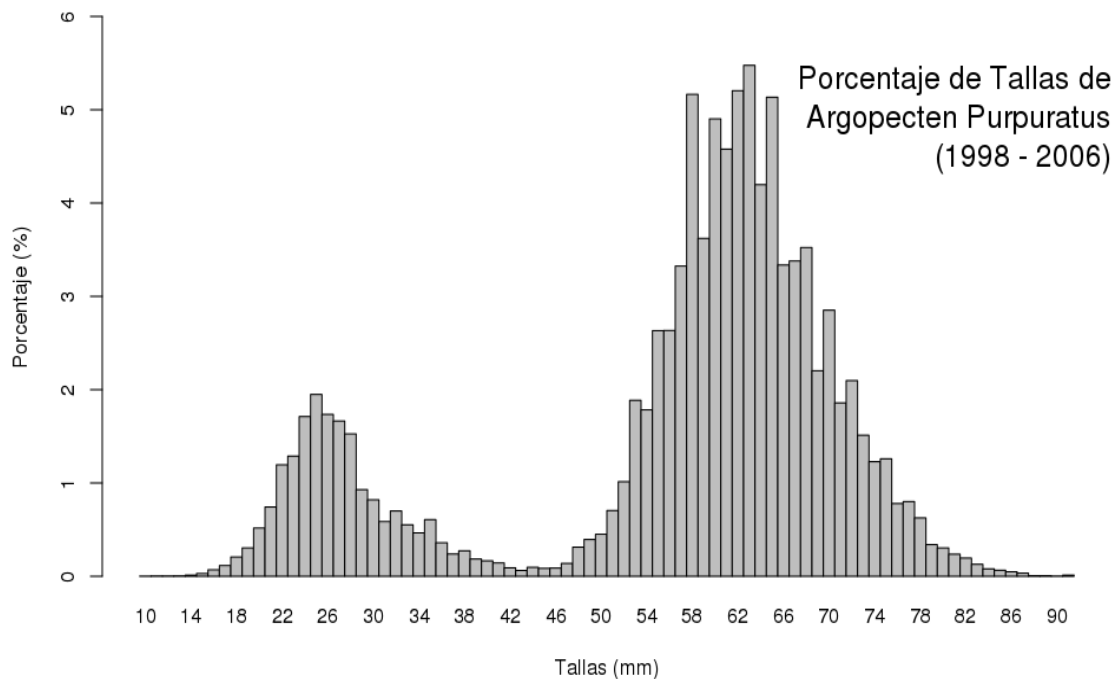


Figura 4 Gráfico de barras del porcentaje de tallas de Argopecten purpuratus en la isla Lobos de Tierra entre los años 1998 a 2006. Las tallas son expresadas en milímetros (mm) (Modificado de Mendo 2009).

2.2.4. La concha de abanico en la bahía de Sechura

La bahía de Sechura se encuentra ubicada en la provincia del mismo nombre, entre los paralelos 5°18'46'' y 5°50'33'', está delimitada al norte por Punta Gobernador y Punta Aguja por el sur. Su borde costero se caracteriza por la presencia de humedales, que están conformados por el estuario de Virrilá, los manglares de San Pedro y Palo Parado; todo este

sistema de humedales y manglares tienen gran influencia sobre el ecosistema marino costero cuando está bajo los efectos del evento El Niño (IMARPE 2007).

Esta bahía presenta una profundidad máxima aproximada de 80 metros a 19 millas náuticas frente a Matacaballo. También presenta una gran planicie o área somera entre la caleta Constante y Punta Tric Trac, con una profundidad máxima de 10 metros a 5 millas náuticas de la caleta Vichayo. En el extremo sur, frente a Punta Aguja la profundidad de incrementa rápidamente alcanzando los 50 metros a menos de una milla y 40 metros a poca distancia de la orilla; características semejantes se dan en el extremo norte entre Punta Gobernador y Punta La Tortuga (IMARPE 2007). En la Figura 5 se puede observar con más detalle la batimetría de la bahía de Sechura.

La producción de concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) en el Perú ha sufrido fuertes fluctuaciones desde la década de los años setenta que pueden ser atribuidas a la ocurrencia del fenómeno El Niño fuerte y a condiciones frías. El aprovechamiento de la concha en el Perú se realiza a través de la extracción (de semillas y adultos) de los bancos y el cultivo (suspendido y de fondo) de áreas concesionadas a maricultores artesanales o empresas privadas.

El cultivo, que considera el engorde en áreas de repoblamiento y en concesiones, generalmente se abastece de semilla del ambiente natural, principalmente de los bancos de manera total o parcial. La isla Lobos de Tierra alberga el banco de concha de abanico más productivo de la costa peruana. Aun cuando no existe información consistente sobre el estado actual de la población en esta isla desde el año 2003, debido a actividades ilegales de extracción de juveniles que no son registradas ni monitoreadas, este banco ha sido sometido a una fuerte explotación con fines de confinamiento en diferentes zonas de la costa peruana

(Mendo 2009), siendo la bahía de Sechura, el principal centro de acopio de semillas llevadas desde la isla Lobos de Tierra.

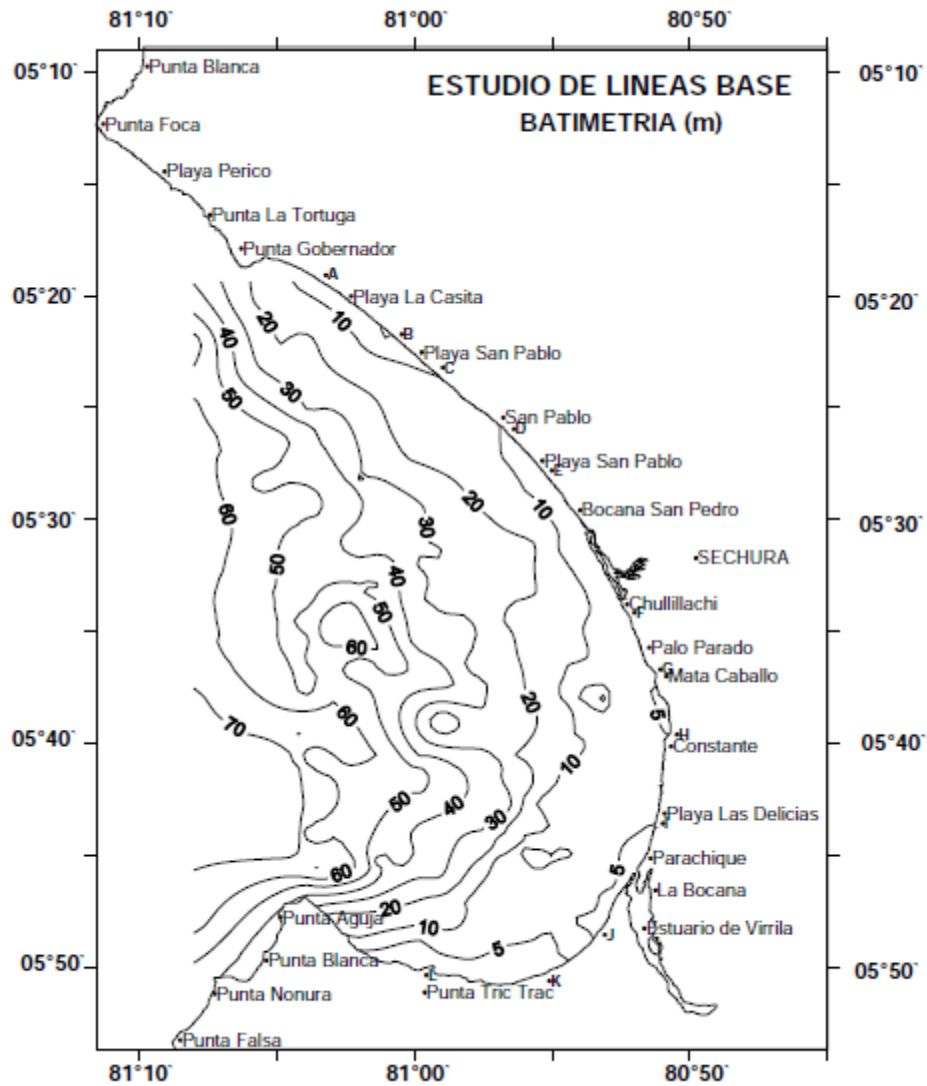


Figura 5. Carta batimétrica de la bahía de Sechura (IMARPE, 2007).

La Figura 6 (parte superior) muestra la biomasa estimada (en toneladas) y la población (en millones de individuos) en la bahía de Sechura entre los años 1995 a 2010. Los datos fueron obtenidos de informes de IMARPE. La Figura 6 (parte inferior) muestra la biomasa

estimada (en toneladas) y la población (en millones de individuos) en la isla Lobos de Tierra entre los años 1995 a 2006 trabajada con datos de IMARPE.

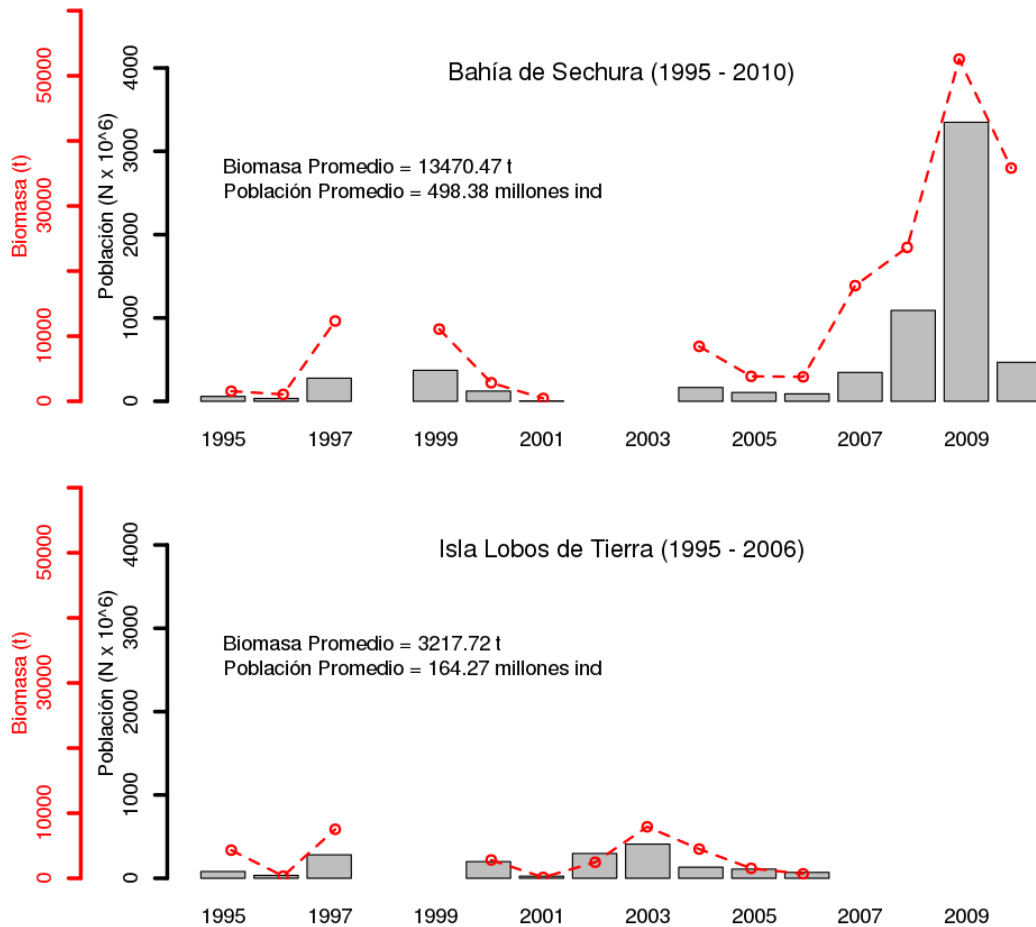


Figura 6 Gráfica de barras de la población de concha de abanico (expresado en millones de individuos). La línea roja representa la biomasa estimada expresada en toneladas. Parte superior (bahía Sechura), parte inferior (isla Lobos de Tierra).

2.2.5. Modelo Basado en Individuos

En ecología, un “Modelo Basado en Individuos” (IBM, por las siglas en inglés de “Individual Based Model”) es un modelo de simulación que considera a los individuos como entidades únicas y discretas, las cuales tienen al menos una propiedad que cambia a través del tiempo además de su edad, como por ejemplo la talla, el peso, la tasa de crecimiento, etc. (Grimm and Railsback 2004).

El uso de los IBM en ecología se popularizó desde la década de los 80's (Huston et al. 1988) con amplias utilidades y ventajas para resolver problemas y responder preguntas tanto del ámbito terrestre y marino (Grimm and Railsback 2004). La presente investigación se desarrolló haciendo uso del modelo ICHTHYOP (<http://www.ichthyop.org/>). Para más detalles de su uso y parametrización, leer el artículo de Lett et al. (2008), donde explica las variables estado y los forzantes que pueden ser utilizados en ICHTHYOP. Este modelo de transporte lagrangiano (modelo que hace un seguimiento de cada partícula espacialmente a través del tiempo), bajo el enfoque de un IBM se utilizó para evaluar el éxito de transporte y la retención larval de *Argopecten purpuratus*, entre la bahía de Sechura y la isla Lobos de Tierra, catalogados como dos de los principales bancos de concha de abanico del Perú (Mendo et al. 2008).

El enfoque de este estudio sigue las pautas generales de un protocolo estándar establecido para describir un modelo basado en individuos (Grimm et al. 2006, 2010), pautas que serán detalladas más adelante. A continuación se presentarán las características más relevantes sobre la ecología basada en individuos (Grimm and Railsback 2004):

- ✓ Los sistemas se entienden y modelan como colecciones de individuos. Las propiedades del sistema y su dinámica surgen de las interacciones de los individuos con su ambiente y con otros individuos.
- ✓ La ecología basada en individuos está fundamentada en teorías. Estas teorías son modelos del comportamiento de los individuos que son útiles para entender la dinámica del sistema. Las teorías están desarrolladas desde la ecología empírica y teórica y son evaluadas usando un enfoque de prueba de hipótesis. El estándar que permite aceptar las teorías es lo bien que estas teorías reproducen las observaciones realizadas en individuos y sistemas.

- ✓ Los patrones observados son una fuente de información primaria usada para probar las teorías y diseñar modelos y estudios. Esos patrones pueden ser patrones al nivel del sistema o patrones de comportamientos individuales que surgen de la interacción de los individuos con el ambiente y otros individuos.
- ✓ En vez de estar enmarcados en los conceptos del cálculo diferencial, los modelos están enmarcados por conceptos complejos tales como la adaptación, la selección natural y el éxito reproductivo.
- ✓ Los modelos se implementan y solucionan usando simulaciones en computador (es). Es la ingeniería de software, no el cálculo diferencial, la habilidad fundamental necesaria para implementar y solucionar estos modelos.

Los estudios de campo y de laboratorio son cruciales para el desarrollo teórico de la ecología basada en individuos. Estos estudios son los que sugieren modelos de comportamiento individual e identifican los patrones usados para organizar los modelos y poner a prueba las hipótesis desarrolladas en la investigación.

2.2.6. De partículas a individuos

El modelado basado en individuos ha sido un enfoque fructífero, pero cuando las poblaciones de estudio son demasiado numerosas, las interacciones de los individuos con su ambiente y entre ellos mismos requiere lapsos de tiempo de cómputo muy largos. La solución sería reducir el número de individuos del modelo, pero eso podría generar una pérdida de la variabilidad y una dinámica irregular. Una solución, sería aplicar el enfoque de súper-individuo, que permite hacer una simplificación desde la realidad a una representación reducida de la misma, sin cambiar la formulación del modelo (Scheffer et al. 1995). Por lo

tanto el enfoque de súper-individuo ofrece ventajas de cómputo y de realismo del comportamiento evaluado por un modelo.

Si tenemos en cuenta que cada individuo en edad reproductiva es capaz de liberar varios millones de huevos al ambiente, que luego se convertirán en larvas en cuestión de horas, y que la población en edad reproductiva cuenta con varios millones de individuos en ambas áreas de estudio, el modelado del transporte y retención de larvas de concha de abanico, representaría un problema técnico de poder de cómputo y sería muy difícil simular el total de individuos que serían objeto de nuestro estudio. Por tal motivo, se hace necesario el enfoque de súper-individuo para la interpretación de este estudio.

2.2.7. Circulación General

La región oceánica delimitada por el meridiano 120 °O y la costa oeste de América del Sur albergan dos sistemas de corrientes importantes: El sistema de Corriente Ecuatorial y el sistema de la Corriente Peruana (Montes et al. 2010).

El sistema de Corriente Peruana está compuesto por corrientes fuertemente influenciadas por la presencia de la masa continental de América del Sur. Cerca de la superficie se observa la Corriente Costera Peruana (CCP) y la Corriente Oceánica Peruana (COP), mientras que en sub-superficie se observa la Corriente Sub-superficial Peruano Chilena (CSSPCH) y la Contracorriente Peruano Chilena (CCPCH) (Montes et al. 2010).

El sistema de afloramiento costero en Perú, es parte de un área mayor que se extiende desde 4 °S hasta 40 °S a lo largo de la costa de Sudamérica. Este sistema es peculiar porque los vientos sostienen un proceso de afloramiento constante a lo largo de todo año y se caracteriza por tener una alta productividad primaria inducida por el estrés de viento

(Tarazona and Arntz 2001; Albert et al. 2010). La intensidad y persistencia del viento es mayor en invierno y menor en verano, por lo tanto, el estrés de viento y consecuentemente la intensidad de afloramiento es mayor en invierno (Tarazona and Arntz 2001). El afloramiento ocurre cerca a la costa cuando el estrés de viento tiene una componente a lo largo de la costa en dirección norte (Albert et al. 2010).

El sistema de corrientes en Perú está asociado al sistema de Corriente Ecuatorial. El flujo de corriente superficial es predominantemente en dirección norte. La Corriente Costera Peruana (CCP, 4-15 cm/s), transporta aguas frías (14 - 16 °C) en verano. La Corriente Oceánica Peruana (COP) alcanza velocidades superiores que la CCP. Entre estas corrientes, existe un flujo irregular débil, en dirección sur, usualmente sub-superficial, pero ocasionalmente alcanza la superficie. Las corrientes sub-superficiales constituyen una extensión de la Contracorriente Ecuatorial (EUC). La Corriente Sub-superficial Peruano Chilena (CSSPCH, 4-10 cm/s) transporta aguas pobres y deficientes en oxígeno en dirección sur, lo que causa un serio impacto sobre la distribución de comunidades bentónicas y demersales. La CSSPCH es más intensa a lo largo de la costa peruana que en la chilena.

Cerca de la costa peruana los vientos dominantes tienen dirección al Ecuador y permiten un intenso afloramiento de aguas frías y altamente productivas además de un sistema de corrientes compuestas por un flujo de superficie en dirección al Ecuador y también un flujo de sub-superficie principalmente en dirección al polo (Chaigneau et al. 2013).

En la capa superior y cerca de la costa, se observa un flujo relativamente fuerte hacia el polo (~ 20 a 30 cm/s en 5° S) asociado con el flujo en superficie cerca a la costa de la extensión sur de la EUC que presenta valores similares cerca de 3° S – 4° S, ya que se acerca a las costas de Ecuador y Perú y que transporta aguas relativamente cálidas. La circulación en dirección norte es asociada a la COP y CCP entre 8 °S – 12 °S que transportan aguas

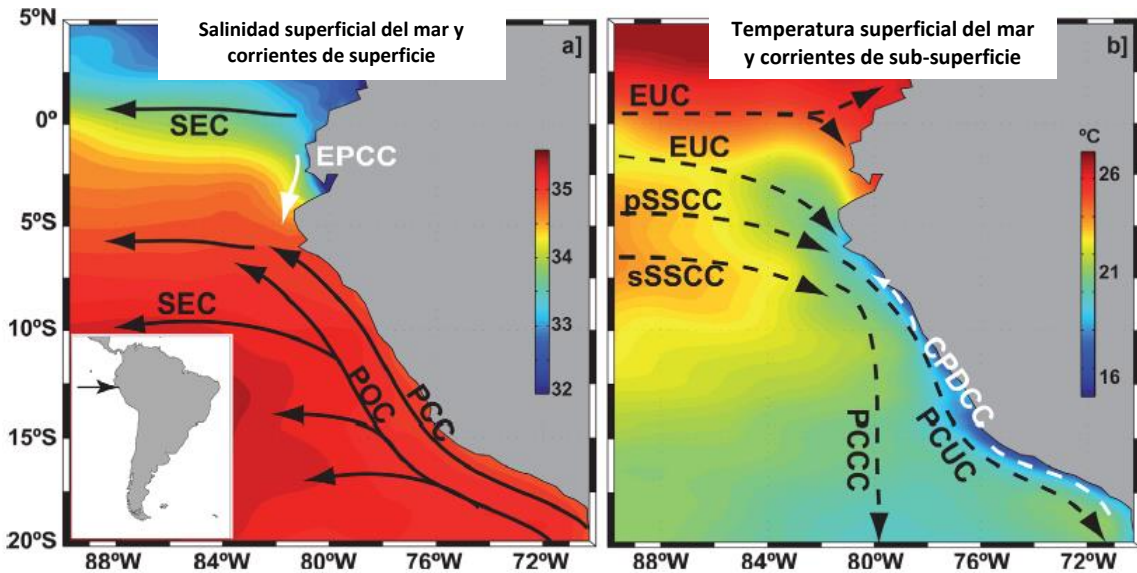


Figura 7. Esquema resumido de corrientes oceánicas; los nombres de cada corriente se mantendrán en inglés. (a) Salinidad superficial del mar y en flechas las corrientes superficiales, (b) Temperatura superficial del mar y en flechas las corrientes sub-superficiales. Las recientemente definidas Ecuador-Peru Coastal Current (EPCC) y Chile-Peru Deep Coastal Current (CPDCC) están indicadas con flechas blancas. Corrientes superficiales, SEC: South Equatorial Current; EPCC: Ecuador-Peru Coastal Current; POC: Peru Oceanic Current; PCC: Peru Coastal Current. Corrientes sub-superficiales, EUC: Equatorial Undercurrent; pSSCC: primary (northern branch) Southern Subsurface Countercurrent; sSSCC: secondary (southern branch) Southern Subsurface Countercurrent; PCCC: Peru-Chile Countercurrent; PCUC: Peru-Chile Undercurrent; CPDCC: Chile-Peru Deep Coastal Current (modificado de Chaigneau et al. 2013).

relativamente frías del sur. En la capa media la circulación es claramente dominada por la presencia de un flujo en dirección sur de la CSSPCH que se intensifica entre 8 °S – 16 °S con valores promedio que localmente pueden alcanzar los 20 cm/s (Chaigneau et al. 2013). Un reciente estudio de modelado mostró una intensificación de la CSSPCH a 60 metros de profundidad (Albert et al. 2010). La Figura 7 muestra un esquema de las principales corrientes de superficie y sub-superficie frente a Perú.

Además, se puede observar una disminución en la intensidad (en Sv) de la Corriente Costera Peruana (CCP) entre los meses de Noviembre a Febrero mientras que la Corriente Sub-superficial Peruano Chilena (CSSPCH) se debilita entre marzo y abril (Echevin et al. 2011) (Figura 8).

2.2.7.1. Circulación en la bahía de Sechura

La bahía de Sechura (5.6 °S, 80.9 °O) está localizada en el norte del Perú y está considerada dentro de la zona de transición entre aguas frías transportadas desde el sur por la corriente de Humboldt y aguas cálidas de la región tropical ecuatorial. Bajo condiciones normales de afloramiento, esta transición se encuentra en el norte de la bahía; sin embargo, durante la fase cálida del ENSO (El Niño Oscilación Sur), esta transición cambia de lugar y se desplaza hacia el sur debido a las ondas Kelvin que arriban a la costa (Taylor et al. 2008).

Esta bahía es alimentada principalmente por Aguas Costeras Frías ACF (16 - 20 °C y 34,9 - 35,0 ups), procedentes de la zona sur, aunque en el verano, por la proyección de las Aguas Ecuatoriales Superficiales AES (20 - 24 °C y 34,0 - 34,8 ups) que usualmente se ubican al norte de 5°00'S, pueden registrarse mezclas por la convergencia de ambas masas de agua, registrándose en superficie las concentraciones más bajas de salinidad. Aguas Tropicales Superficiales ATS caracterizadas por temperaturas mayores de 25 °C y salinidades

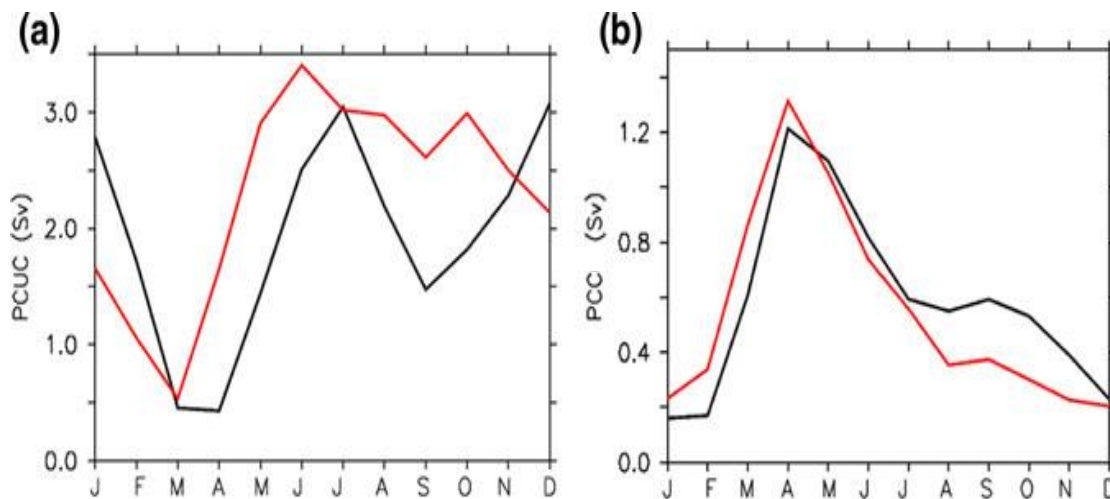


Figura 8. Variaciones estacionales del transporte (en Sv) para la (a) Corriente Sub-superficial Peruano Chilena (PCUC, por sus siglas en inglés), (b) Corriente Costera Peruana (PCC por sus siglas en inglés) bajo condiciones pre-industriales (línea negra) y bajo condiciones de 4xCO₂ (línea roja). El transporte fue calculado por el flujo en dirección ecuatorial a través de un promedio cross-shore entre 6 °S y 12 °S (de Echevin et al. 2011).

menores de 34,0 ups, se registran en la bahía durante el desarrollo de un evento tipo El Niño, o una fuerte proyección del Frente Ecuatorial (Morón et al. 2013).

Morón et al. (2013) describen que en condiciones normales el rango anual de la temperatura superficial de la Bahía de Sechura, fluctúa entre 14 y 24 °C, registrándose los valores más elevados en el verano del hemisferio sur y los mínimos en el invierno. Estacionalmente, en verano (enero-marzo) se registran temperaturas superficiales entre 17 y 24 °C y cerca al fondo entre 16 y 22 °C; en otoño (abril-junio) se pueden registrar valores de 16 a 21 °C en superficie y de 15 a 20 °C cerca al fondo, en invierno (julio-setiembre) se registran temperaturas superficiales entre 15 y 20 °C y de 15 a 19 °C cerca al fondo, mientras que en primavera (octubre-diciembre) las temperaturas varían de 15 a 22 °C y 15 a 21 °C en superficie y cerca al fondo respectivamente.

Morón et al. (2013) también detallan la dinámica de la circulación en la bahía de Sechura, e indican que las aguas que alimentan la bahía de Sechura ingresan por la zona central y sub-superficial de la bahía (debajo de los 10 m), con proyección sureste (hacia Mataballo y Estuario de Virrilá), con intensidades de hasta de 30 cm/s. Estos flujos, por lo general, no llegan a la orilla de playa debido a la poca profundidad por lo que parte de estas aguas se bifurcan en la misma capa sub-superficial, por los bordes norte y sur de la zona costera, dando lugar en algunos casos (entre las playas San Pablo y La Casita, así como entre Punta Tric Trac y Punta Aguja) a la formación de pequeños remolinos por la convergencia con flujos en sentido contrario.

Otra gran parte de las aguas sub-superficiales de ingreso afloran a la superficie por la zona central, entre Playa San Pablo y Punta Aguja, zona que es caracterizada generalmente por presentar los valores más bajos de temperatura y oxígeno superficial. En superficie predominan los flujos de salida de la bahía, principalmente por la zona central y norte,

mientras que en las zonas costeras, tal como en la capa sub-superficial, también se pueden originar remolinos en las áreas anteriormente mencionados (Figura 9).

Ocasionalmente, se puede observar ingreso de agua en la capa superficial por la zona de Punta Aguja, extendiéndose hasta Punta Tric Trac, zona donde converge con las aguas de salida, originándose un remolino superficial en sentido horario. Esta bahía es alimentada principalmente por Aguas Costeras Frías (ACF) (16-20 °C y 34,9-35,0 ups), procedentes de la zona sur, aunque en el verano, por la proyección de las Aguas Ecuatoriales Superficiales (AES) (20-24 °C y 34,0-34,8 ups) que usualmente se ubican al norte de 5°00'S, pueden registrarse mezclas por la convergencia de ambas masas de agua, registrándose en superficie las concentraciones más bajas de salinidad. Aguas Tropicales Superficiales (ATS) caracterizadas por temperaturas mayores de 25 °C y salinidades menores de 34,0 ups, se registran en la bahía durante el desarrollo de un evento tipo El Niño, o una fuerte proyección del Frente Ecuatorial.

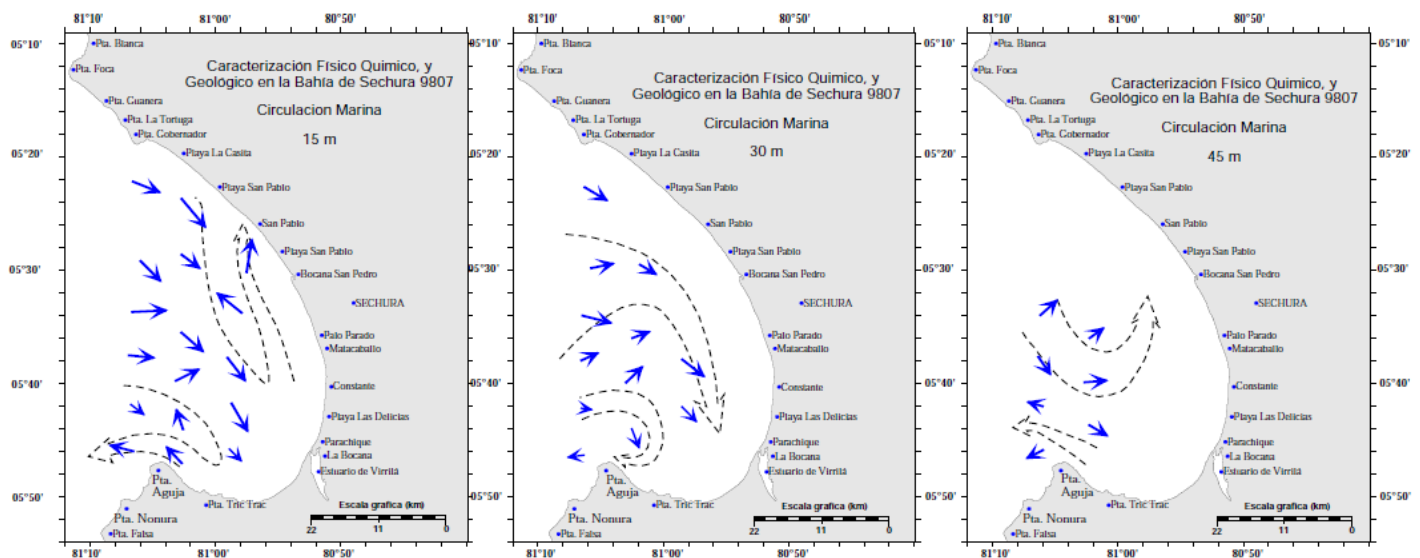


Figura 9 Circulación marina a los niveles de 15, 30 y 45 metros de profundidad en la bahía de Sechura en Julio de 1998 (Morón et al. 2013).

2.2.7.2. Circulación en la isla Lobos de Tierra

Según el plan de manejo bi-regional de la isla Lobos de Tierra (Gobierno de Lambayeque and Gobierno de Piura 2004), la circulación en la zona aledaña a la isla se caracteriza por la presencia en la superficie de la Corriente Costera Peruana (CCP) cuya velocidad promedio es de 5 a 15 cm/s. También se puede identificar a la Extensión Sur de la Corriente Ecuatorial Sub-superficial (EUC), que es una corriente hacia el sur que se extiende hacia la zona costera entre los 5 y 8 - 9° S; se ubicada entre 50 y 300 m de profundidad y una de sus principales atributos es que tiene concentraciones relativamente altas de oxígeno.

Una tercera corriente frente a la zona de Sechura - isla Lobos de Tierra es la Corriente Sub-superficial Peruano Chilena (CSSPCH), que se inicia frente a Talara y cuya velocidad se debilita después de su paso por Punta Falsa; su flujo es más intenso cerca de los 100 metros de profundidad, y transporte agua de origen ecuatorial hacia el sur. Por otro lado, la corriente local en la superficie del lado Este de la isla se caracteriza por ser más fuerte frente a los islotes Peña Negra y Las Rocas, frente a Juanchuquita y al noreste de Cabo Cruz, con velocidades entre 11 y 20 cm/s; mientras que en el fondo las velocidades fueron de 3 a 5 cm/s, particularmente a lo largo de la bahía Juanchuquita y a profundidades menores a 10 m (Figura 10). En la Figura 11 se observa el corte transversal entre parte central de la isla (muelle La Grama) y la zona costera a la altura de El Palo (13 km de distancia), muestra una pendiente más pronunciada hacia los 24 m. de profundidad, a partir de la cual nuevamente se levanta una pendiente más suave, particularmente entre los 14 y 7 m hacia la costa (Gobierno de Lambayeque and Gobierno de Piura 2004).

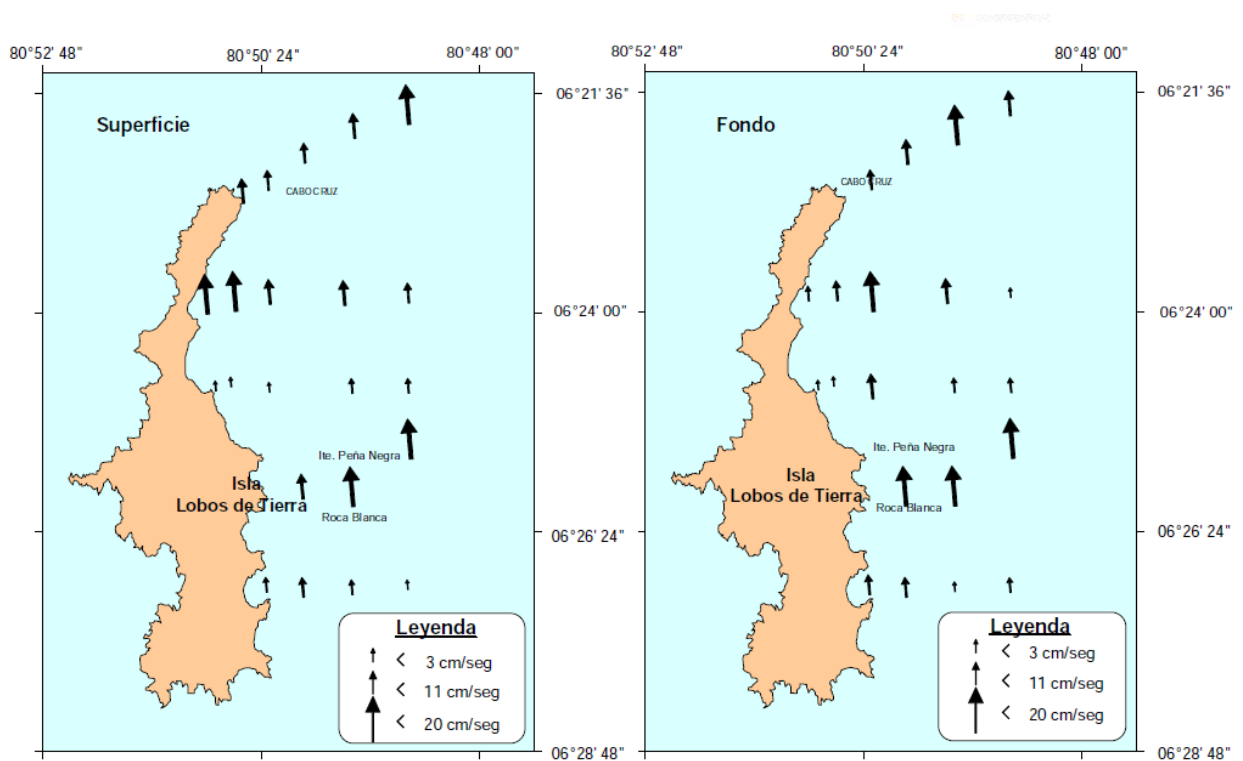


Figura 10 Dirección y velocidades de las corrientes locales en la isla Lobos de Tierra (Region-Piura y Region-Lambayeque 2004).

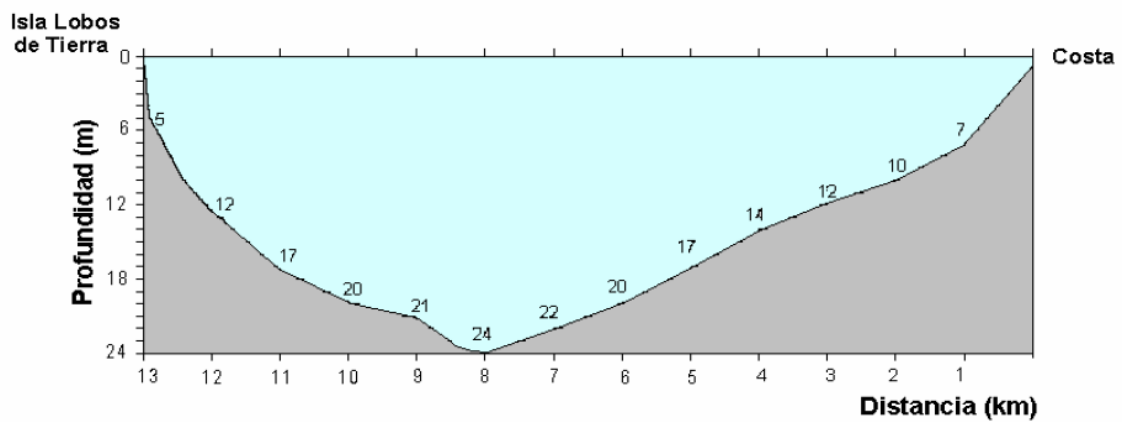


Figura 11 Vista de la sección transversal entre la isla y la costa de Lambayeque, frente a El Palo (Region-Piura y Region-Lambayeque 2004).

2.3. ESTUDIOS PREVIOS DE TRANSPORTE Y RETENCIÓN LARVAL EN DIFERENTES ORGANISMOS; PROYECCIÓN A ENTENDER UN SISTEMA FUENTE - SUMIDERO

En general, la mayoría de estudios sobre transporte y retención larval con enfoque de modelado, están orientados a peces (Brochier et al. 2008a, 2008b, 2009, 2011a, 2011b, 2013; Mbaye et al. 2015), sin embargo también existen investigaciones en algunos moluscos (Garavelli et al. 2014; Hoyer et al. 2014), crustáceos (Lipcius et al. 1997; Butler IV et al. 2011) y corales (Schultz and Cowen 1994) (estos últimos, orientados a la creación de áreas naturales protegidas). Debemos precisar además, que es muy necesario el uso de las salidas de un modelo hidrodinámico que pueda simular el ambiente físico de la zona de estudio; la resolución del modelo hidrodinámico dependerá de los objetivos de la investigación.

La definición clásica de fuente y sumidero, en ecología, se basa en la diferencia entre las tasas de emigración e inmigración en un área determinada. Se considera a una zona como fuente cuando la emigración es mayor a la inmigración, mientras que en una zona sumidero la inmigración es mayor a la emigración (Pulliam 1998; Hanski and Gaggiotti 2004; Kawecki 2004). Cowen and Sponaugle (2009) definen de manera similar los conceptos de fuente y sumidero, aunque refiriéndose a las poblaciones como exportadoras o importadoras de individuos para luego catalogarlas como fuente o sumidero.

Además se considera que la migración es consecuencia de la calidad de hábitat (Pulliam 1998) y en el contexto de organismos bentónicos con fases larvales planctónicas, la migración y el posterior asentamiento estaría en función del tipo de sustrato.

La Tabla 3 contiene información sobre estudios en transporte larval, mientras que la Tabla 4 muestra los trabajos realizados en retención larval con enfoque de modelado.

Tabla 3. Tabla resumen de las investigaciones realizadas en transporte larval.

Autor	Especie	Área	Modelo Hidrodinámico	%	n° individuos	Periodo Pelágico Larval	Observaciones
(Brochier et al. 2011b)	peces pelágicos	Costa africana - Islas Canarias	ROMS	~0-~0.005			
(Brochier et al. 2011a)	anchoveta	Benguela	ROMS	~0.05-~0.35			
Flores et al 2016	concha de abanico	Norte de Perú	ROMS	0.0156	5000	10-22	Transporte de larvas desde Sechura hacia lobos de Tierra
Flores et al 2016	concha de abanico	Norte de Perú	ROMS	0.0070	5000	10-22	Transporte de larvas desde Lobos de Tierra hacia Sechura

Tabla 4. Tabla resumen de las investigaciones realizadas en retención larval.

Autor	Especie	Área	Modelo Hidrodinámico	%	n° individuos	Periodo Pelágico Larval	Observaciones
(Parada et al. 2012)	anchoveta	costa central de Chile	ROMS	~0.10			
(Aiken et al. 2007)	organismos marinos	costa central de Chile	Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC)	~0--0.15		30	Evaluó la probabilidad de dispersión en función de la latitud
(Brochier et al. 2013)	peces pelágicos	ecosistema de Humboldt	ROMS	~2--5			Evaluó el efecto del cambio climático
(Parada et al. 2003)	anchoveta	Benguela	ROMS	>1-->10	5000	~14	
(Brochier et al. 2008a)	anchoveta	ecosistema norte de Humboldt	ROMS	~5--60	3000	30	Evaluó tasas de retención larval, el "drift time" fue de 30 días, periodo después del cual la larval puede nadar.
(Brochier et al. 2008b)	sardina, anchoveta	Canarias	ROMS	~30--55	3000	30	
(Peliz et al. 2007)	cangrejo	costa ibérica	ROMS	~50			
(Brochier et al. 2009)	peces pelágicos	Canarias, Humboldt				30	Utilizó el modelo evolutivo INCHTHYOP
Flores	concha de abanico	Norte de Perú	ROMS	0.6643	5000	10-22	Se evaluó la retención en la bahía de Sechura
et al 2016	concha de abanico	Norte de Perú	ROMS	2.1520	5000	10-22	Se evaluó la retención en la isla Lobos de Tierra

En base a las investigaciones anteriores se elaboraron puntos de referencia para los porcentajes de transporte y retención larval:

Puntos de referencia para los porcentajes de transporte larval:

- ✓ Alto $\geq 0.1 \%$
- ✓ Bajo $< 0.1 \%$

Puntos de referencia para los porcentajes de retención larval:

- ✓ Alto $> 10 \%$
- ✓ Medio $1-10 \%$
- ✓ Bajo $< 1 \%$

Basados en los porcentajes de retención y éxito de transporte larval, es posible proponer una tipología de cuatro escenarios para sistemas fuente-sumidero, detallados en la Tabla 5.

Tabla 5. Tipología de escenarios de sistemas fuente-sumidero basados en los porcentajes de retención y éxito del transporte (J. Tam, com. pers.).

Fuente fuerte – Sumidero fuerte	Área con un porcentaje de éxito de transporte larval alto hacia zonas vecinas y un porcentaje de retención larval medio o alto.
Fuente fuerte – Sumidero débil	Área con un porcentaje de éxito de transporte larval alto hacia zonas vecinas y un porcentaje de retención larval bajo.
Fuente débil – Sumidero fuerte	Área con un porcentaje de éxito de transporte larval bajo hacia zonas vecinas y un porcentaje de retención larval medio o alto.
Fuente débil – Sumidero débil	Área con un porcentaje de éxito de transporte larval bajo hacia zonas vecinas y un porcentaje de retención larval bajo.

2.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Las estadísticas oficiales de producción de concha de abanico en el Perú muestran un mayor aporte del cultivo (Figura 12), sin embargo las observaciones de campo muestran que la extracción de los bancos sustenta la producción de la concha de abanico en el Perú (Mendo 2009).

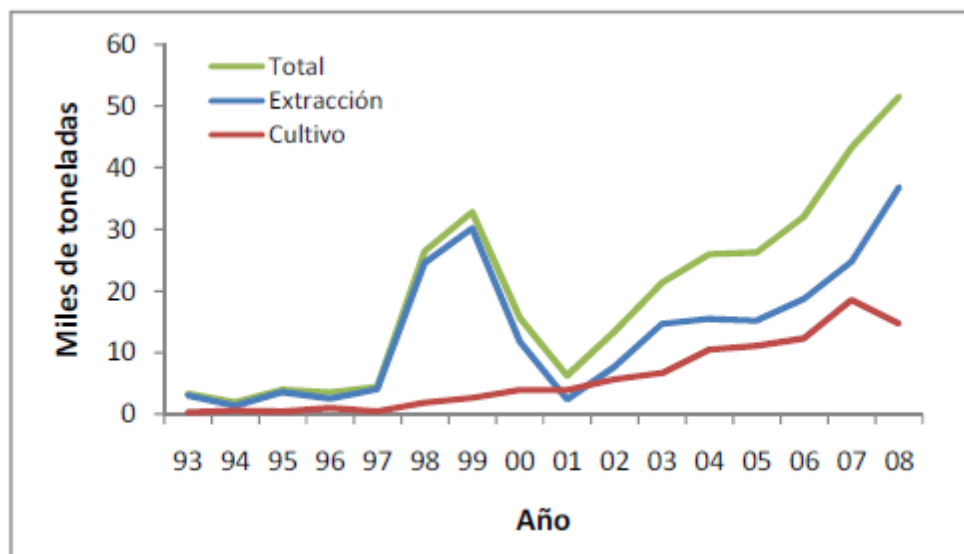


Figura 12 Producción de concha de abanico en el Perú de acuerdo a su origen. Imagen tomada de (Mendo 2009).

El éxito de asentamiento de muchas especies marinas (para este caso en concreto, la concha de abanico), están bajo la influencia de procesos físicos (como la advección y dispersión), el comportamiento larval (como la migración vertical), las relaciones inter-específicas (competencia por alimento y relaciones predador-presa), la disponibilidad de hábitat y sobrevivencia larval después del asentamiento sobre el sustrato. La integración biofísica de los términos antes mencionados, asegura una correcta evaluación del transporte larval (Pineda 2000; Cowen and Sponaugle 2009).

La evaluación del éxito de transporte y la retención de larvas entre las poblaciones de bahía de Sechura e isla Lobos de Tierra, mediada por el promedio del flujo de corrientes oceánicas, aseguraría la sostenibilidad a largo plazo de este recurso en la zona norte del país. Realizar un trabajo de evaluación de transporte de larvas de esta especie tendría un alto costo económico-logístico y de tiempo debido a que es necesaria una evaluación en periodos de tiempo de por lo menos un año para poder observar la estacionalidad de la abundancia larval y un estudio de varios años para evaluar la variabilidad interanual.

Sin embargo, existen herramientas que facilitan este tipo de estudios, como el uso de modelos, en este caso un modelo de transporte, capaz de simular la trayectoria de partículas (larvas virtuales) y seguir su trayectoria en tiempo y espacio, ayudará a identificar áreas de protección del recurso y posibles zonas donde colocar captadores de larvas para maximizar la captación y luego asegurar el suministro de semilla para ambas áreas.

Hasta ahora no existen referencias sobre estudios similares con enfoque de modelado en el transporte de larvas en esta especie de alto valor económico en la zona norte del país. Esto genera la necesidad de estudiar, desde un punto de vista diferente al que se suele utilizar para evaluar la densidad de larvas de concha de abanico en diferentes puntos mediante captadores, que sólo muestran una cantidad de individuos capturados, pero que no permiten definir su procedencia ni tampoco el destino que tendrán los individuos.

La sostenibilidad o incremento de las exportaciones dependen de la producción sostenida de este recurso, por lo que es necesario realizar un estudio que permita evaluar el potencial productivo de los bancos. Por otro lado, Mendo (2009) argumentó la conexión entre la isla Lobos de Tierra y bahía de Sechura no sólo de tipo socio-económico, sino también de tipo ecosistémico, con comunidades de especies y hábitats en ambos lugares muy parecidas que lo llevó a pensar en una tele conexión larval de recursos como la concha de abanico.

En el contexto de manejo de áreas marinas, la dispersión larval (y los mecanismos que la hacen posible) han sido un área de estudio muy importante, porque las especies marinas producen pequeñas larvas que son transportadas por las corrientes por largos periodos. La dispersión larval ha sido considerada una “caja negra” en la ecología marina, debido a la dificultad en el seguimiento de la trayectoria de numerosas larvas microscópicas. Se han hecho pobres estimaciones de la escala de dispersión larval basadas en la duración del periodo larval combinado con las características de las corrientes oceánicas y datos del comportamiento larval (Kaplan et al. 2010).

Además el enfoque de modelado facilita hacer varias pruebas con variaciones del ambiente que permite visualizar distintos escenarios y la modificación de los parámetros más importantes del crecimiento de estadios tempranos de vida de concha de abanico. El control de los parámetros ambientales es otra ventaja del uso de modelos para la evaluación del transporte de larvas, de esta forma podemos conocer la velocidad de las corrientes y la dirección de las partículas advectadas por estas, la temperatura y la salinidad del medio en el que se desplaza la partícula.

Por último, en 2014, en la clausura de la Mesa Técnica de Sechura e isla Lobos de Tierra, que contó con la presencia del entonces ministro de PRODUCE Piero Ghezzi, como parte de las discusiones surgieron propuestas para la creación de un centro de investigaciones marino costeras en Sechura, que dentro de otros puntos de investigación, plantea el estudio de la conexión entre los dos bancos.

2.5. OBJETIVOS

2.5.1. Objetivo general

- ✓ Simular el transporte y la retención de larvas entre la bahía de Sechura y la isla Lobos de Tierra con un enfoque climatológico.

2.5.2. Objetivos específicos

- ✓ Realizar las simulaciones del transporte larval de concha de abanico usando el modelo lagrangiano ICHTHYOP con forzantes del modelo ROMS a una resolución espacial de 2.2 km.
- ✓ Evaluar el efecto del mes de desove, profundidad de desove y edad mínima de asentamiento sobre la simulación de retención y transporte larval entre ambas áreas.

2.6. HIPÓTESIS

La bahía de Sechura y la isla Lobos de Tierra son dos de los principales bancos de concha de abanico en el norte de Perú, por lo que es necesario evaluar el transporte y la retención de larvas entre ambas áreas. Se conoce que ocurre una disminución de la intensidad de la Corriente Costera Peruana (CPP) entre los meses de noviembre a febrero (Echevin et al. 2011), y un aumento de la retención en los meses de mayo a julio (Brochier et al. 2008a); por lo que se hipotetiza que:

- ✓ El éxito de transporte de larvas de concha de abanico desde la isla hacia la bahía disminuye en primavera - verano.
- ✓ La retención de larvas de concha de abanico en ambas áreas aumenta en otoño.

3. METODOLOGÍA

La metodología del estudio se realizó siguiendo el protocolo para la descripción de modelos basados en individuos (IBM) de Grimm et al. (2006, 2010). La Figura 13 muestra un esquema de cómo se trabajó con el modelo ICHTHYOP usando como forzante el modelo hidrodinámico ROMS.

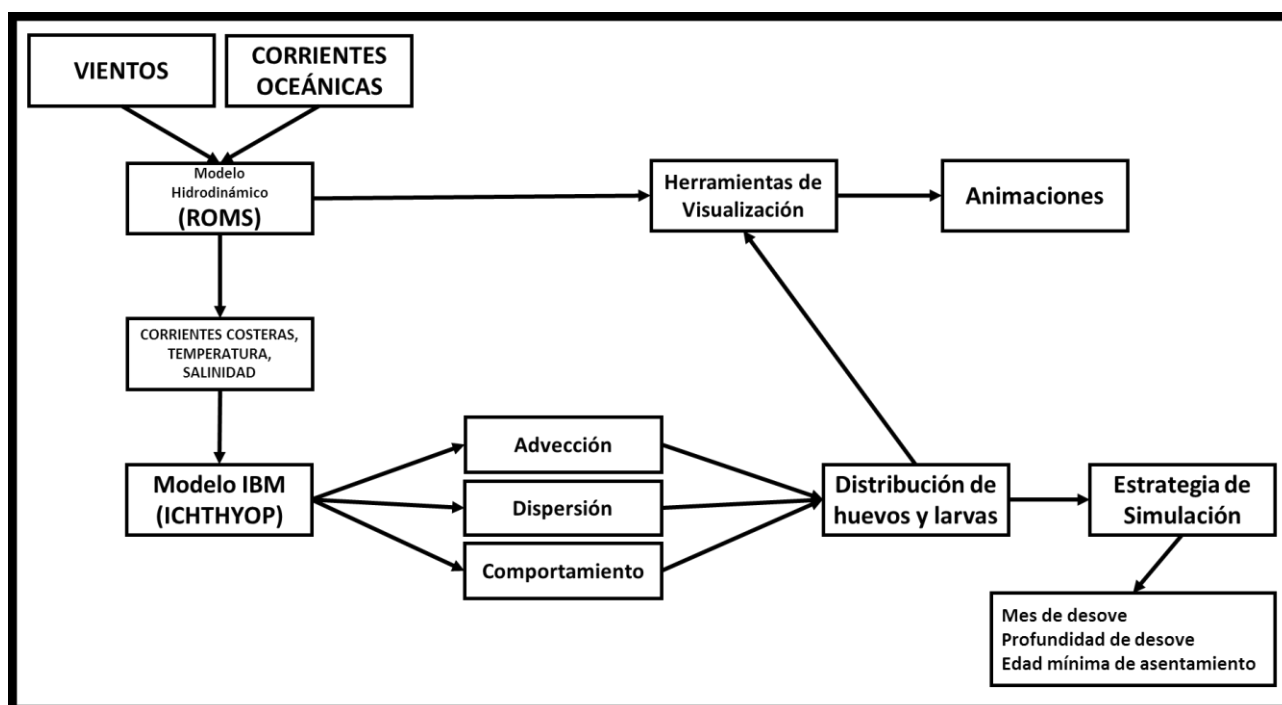


Figura 13 Diagrama de flujo del Modelo Basado en Individuos (ICHTHYOP), que utiliza como forzantes las salidas del Modelo Hidrodinámico (ROMS).

3.1. MODELO HIDRODINÁMICO (ROMS)

Para simular la circulación oceánica de la zona norte de la corriente de Humboldt, usamos una versión de ROMS (Regional Oceanic Modelling System) desarrollada por investigadores de IRD (<http://www.romsagrif.org/>). Esta versión del modelo ROMS logra resolver las ecuaciones primitivas hidrostáticas usando coordenadas verticales curvilíneas para el seguimiento de la batimetría. Se siguió un enfoque de *quasi-equilibrium*; por ejemplo,

el modelo fue forzado por promedios climatológicos mensuales para los forzantes atmosféricos y las fronteras de océano abierto del modelo. Este enfoque ha sido utilizado satisfactoriamente en estudios previos para simular el promedio de circulación y la dinámica espacio-temporal de meso-escala de sistemas de afloramiento de borde oriental (Penven et al. 2005).

El dominio del modelo se extiende entre 4.5 °S - 16 °S a lo largo de la costa hasta 880 kilómetros de distancia a la costa con una resolución horizontal de 2.2 kilómetros y 42 niveles verticales (coordenadas sigma). El modelo fue anidado dentro de un modelo Perú - Chile con una resolución horizontal de 7.5 kilómetros descrito por Colas et al. (2012). El modelo fue forzado con una climatología de vientos mensuales de SCOW (Scatterometer Climatology of Ocean Winds) (Risien and Chelton 2008) y por flujos de superficie de COADS (Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set). (Shchepetkin and McWilliams 2005, 2009) detallan la parametrización del modelo ROMS.

3.2. MODELO IBM (ICHTHYOP)

3.2.1. Propósito

Se utilizó un modelo lagrangiano para investigar la retención y el éxito de transporte de las etapas de vida temprana (huevos y larvas) de *Argopecten purpuratus* en la bahía de Sechura y la isla Lobos de Tierra. Adicionalmente también usamos el modelo para investigar el efecto del mes de desove, profundidad de desove y la edad mínima de asentamiento sobre la retención y el éxito de transporte de larvas de concha de abanico entre la bahía de Sechura y la isla Lobos de Tierra. La Figura 14 esquematiza el diagrama de flujo del modelo ICHTHYOP.

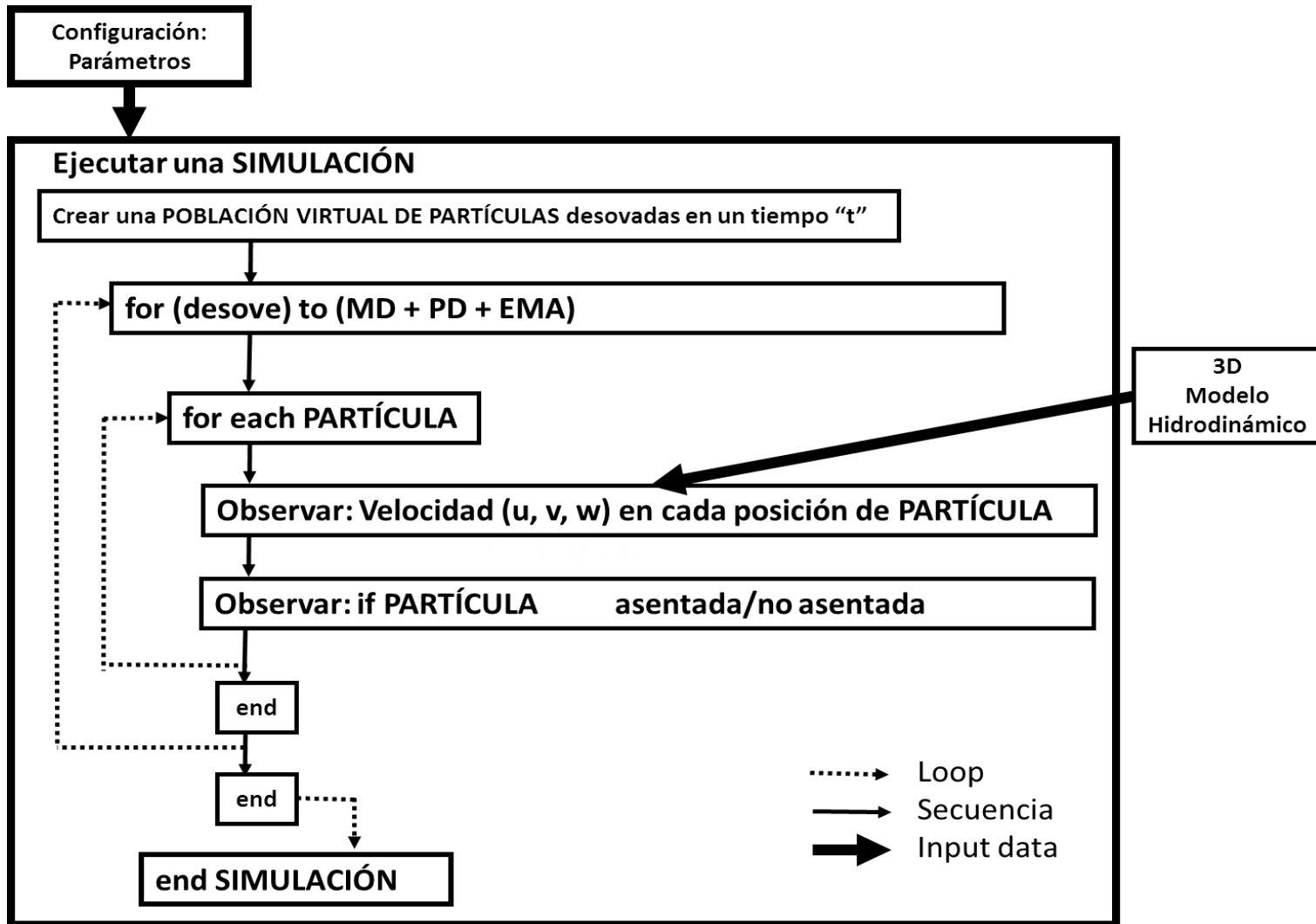


Figura 14 Diagrama de flujo del modelo ICHTHYOP, donde MD = mes de desove, PD = profundidad de desove, EMA = edad mínima de asentamiento.

3.2.2. Variables de estado

El modelo estará compuesto de individuos virtuales y de factores físicos que caracterizarán el ambiente marino. Los individuos serán caracterizados por variables estado como: edad (en días), la ubicación (en tres dimensiones, longitud, latitud y profundidad), etapa de vida (huevo o larva) y su estatus (asentado/no asentado). El ambiente marino será caracterizado por tres variables estado: velocidad de corrientes zonal y meridional (en m/s), temperatura (en °C) y salinidad (PSU). Las condiciones ambientales fueron simuladas por el modelo ROMS (Regional Oceanic Modeling System).

El paso de tiempo del IBM fue de 600 segundos, con la finalidad de conservar la estabilidad numérica del modelo (Courant et al. 1967). Además se hizo registro de las variables cada 6 horas.

3.2.3. Visión general y planificación de procesos

Los individuos virtuales fueron liberados al ambiente siguiendo una determinada estrategia de desove espacial (de área y profundidad) y temporal (mensual) detallada más adelante, que constituyeron las condiciones iniciales. Una vez liberadas las partículas, cada huevo o larva en cada paso de tiempo será movilizado y testado para la mortalidad y finalmente para su estatus (asentado/no asentado).

3.2.4. Diseño de conceptos

Una vez definidas de las zonas de desove, la ubicación de cada partícula a ser liberada al ambiente se realizará de manera aleatoria dentro de las áreas de desove. El número de

partículas liberadas fue de 5000, para evitar los efectos de la condición inicial. Por lo tanto será suficiente una sola simulación para cada set de experimentos.

3.3. SUB-MODELOS

3.3.1. Estrategia de desove

La estrategia de desove se define por el área virtual de desove (bahía de Sechura o isla Lobos de Tierra según sea el caso), mes y profundidad de desove. Se probó tres profundidades de desove: 0 - 10 m, 10 - 20 m y 20 - 30 m para la bahía de Sechura, mientras que para la isla Lobos de Tierra se probó profundidades entre 0 - 15 m, 15 - 30 m y 30 - 45m. La frecuencia de desove fue de una vez al mes. De esta manera se estableció el tiempo y el espacio de distribución de las partículas liberadas.

3.3.2. Proceso de advección

El proceso de advección se trata del transporte pasivo de las partículas, generado por las corrientes (m/s). El esquema numérico permitió simular la advección horizontal y vertical de las partículas descrito en las siguientes 3 ecuaciones:

$$\begin{aligned}x(t + \Delta t) &= x(t) + Vu. \Delta t \\y(t + \Delta t) &= y(t) + Vv. \Delta t \\z(t + \Delta t) &= z(t) + Vw. \Delta t\end{aligned}$$

3.3.3. Proceso de dispersión horizontal

Se definió un coeficiente de difusión horizontal de $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}^3$ sugerido por (Peliz et al. 2007).

3.4. EXPERIMENTOS DE SIMULACIÓN

3.4.1. Simulación I y II

Estas dos simulaciones fueron diseñadas para evaluar el éxito de transporte de larvas entre la bahía de Sechura y la isla Lobos de Tierra. En la simulación I la zona de liberación de partículas fue la bahía de Sechura y la zona de asentamiento fue la isla Lobos de Tierra. En la simulación II la isla Lobos de Tierra fue la zona de liberación y la bahía de Sechura fue la zona de asentamiento. Un total de 5000 individuos virtuales fueron liberados cada mes (por un periodo de un año) a tres diferentes profundidades (0-10 m, 10-20 m y 20-30 m). Además se probó el efecto diferentes edades mínimas de asentamiento (10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25 y 30 días).

3.4.2. Simulación III y IV

Estas dos simulaciones fueron diseñadas para evaluar la retención de larvas de la bahía de Sechura y la isla Lobos de Tierra. En estas simulaciones la zona de liberación de partículas y la zona de asentamiento fueron las mismas. Para el caso de la simulación III se evaluará la retención en la bahía de Sechura y para la simulación IV la retención para la isla Lobos de Tierra. Un total de 5000 individuos virtuales fueron liberados cada mes (por un periodo de un año) a tres diferentes profundidades (0-15 m, 15-30 m y 30-45 m). Además se probó el efecto diferentes edades mínimas de asentamiento (10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25 y 30 días).

Simulaciones previas mostraron que no existe una diferencia interanual ni para la retención, ni para el éxito de transporte larval, cuando el IBM era ejecutado durante un

período de cinco años. La Tabla 6 muestra el detalle de las cuatro simulaciones diseñadas para esta investigación.

Tabla 6 Resumen de los experimentos realizados con el modelo ICHTHYOP

	Simulación I	Simulación II	Simulación III	Simulación IV
Objetivo	Éxito de Transporte	Éxito de Transporte	Retención Larval	Retención Larval
Zona de desove	Sechura (~5 °S)	Lobos (~6.3 °S)	Sechura (~5 °S)	Lobos (~6.3 °S)
Zona de asentamiento	Lobos (~6.3 °S)	Sechura (~5 °S)	Sechura (~5 °S)	Lobos (~6.3 °S)
Época de Desove	Todos los meses	Todos los meses	Todos los meses	Todos los meses
Profundidad de Desove	0-10m, 10-20m, 20-30m	0-15m, 15-30m, 30-45m	0-10m, 10-20m, 20-30m	0-15m, 15-30m, 30-45m
Edad Mínima de Asentamiento	10,12,14,16, 18,20,22,25,30	10,12,14,16, 18,20,22,25,30	10,12,14,16, 18,20,22,25,30	10,12,14,16, 18,20,22,25,30

3.5. DE PARTÍCULAS A INDIVIDUOS

Para estimar la representatividad del súper-individuo, descrito en la página 25, se calculó la población promedio anual expresada en millones de individuos de cada zona, dicha información se recopiló de los informes sobre la población y biomasa publicados por IMARPE (Tabla 7). Estudios previos de fecundidad en concha de abanico, indican diferentes rangos de número de huevos liberados de acuerdo a la edad y talla de desove (Avendaño et al. 2001b). Se asumió que cada individuo es capaz de liberar 4 millones de huevos, y el número de individuos se multiplicó por el número de huevos que puede liberar, y por último, se dividió entre 5000 (número de partículas usadas en el modelo), para poder obtener el número de larvas que representa cada partícula en el modelo con la siguiente fórmula:

$$\text{Súper individuo} = \frac{\text{adultos} * (\text{fecundidad})}{\text{partículas}} \text{ individuos}$$

Tabla 7 Resumen de la biomasa (expresada en toneladas) y la población (expresada en millones de individuos) de la isla Lobos de Tierra y la bahía de Sechura entre los años 1995 -2010. Los datos fueron recopilados de los reporte de IMARPE.

Año	Población en la isla Lobos de Tierra (millones de ind)	Biomasa en la isla Lobos de Tierra (toneladas)	Población en la bahía de Sechura (millones de ind)	Biomasa en la bahía de Sechura (toneladas)
1995	81.3	4319	58.3	1548
1996	34.2	325.8	34	1060.2
1997	281.8	7522.6	276.8	12328.8
1998	--	--	--	--
1999	--	--	371.3	11088.9
2000	200	2811.7	122.4	2846.4
2001	24.5	135	3.7	442.1
2002	297.4	2460.7	--	--
2003	409.8	7909.1	--	--
2004	132.9	4486.05	166	8429.6
2005	110.26	1524.26	105.5	3832.15
2006	70.5	683.025	88.9	3750.35
2007	--	--	345.95	17761
2008	--	--	1090.55	23637.85
2009	--	--	3348.2	52566.8
2010	--	--	467.3	35824

3.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

- ✓ Éxito de transporte larval: Individuos que logran llegar de una zona de desove (A) hasta una zona de asentamiento (B) cuando A y B son diferentes.
- ✓ Retención larval: Individuos que logran llegar de una zona de desove (A) hasta una zona de asentamiento (B) cuando A y B son iguales.
- ✓ Ubicación de partícula: Ubicación en latitud, longitud y profundidad (x, y, z) de cada partícula en cada paso de tiempo.

- ✓ Zonas de desove y asentamiento: Áreas donde cada partícula será liberada y a donde deberá llegar para ser considerada como retenida o transportada. Dependiendo del tipo de simulación, la bahía de Sechura y la isla Lobos de Tierra se comportarán como zona de desove o asentamiento.
- ✓ Profundidad de desove: Se definieron profundidades diferentes para cada área. En Sechura las partículas fueron liberadas entre 00 - 10, 10 - 20 y 20 - 30 metros de profundidad. Mientras que en Lobos de Tierra las partículas fueron liberadas entre 00 - 15, 15 - 30 y 30 - 45 metros de profundidad.
- ✓ Edad mínima de asentamiento: 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25 y 30 días.
- ✓ Estatus de partícula: En cada paso de tiempo el modelo hizo un test para verificar si la partícula está asentada o no asentada.
- ✓ Velocidad meridional (v): Velocidad de corriente oceánica (along-shore) expresada en m/s.
- ✓ Velocidad zonal (u): Velocidad de corriente oceánica (cross-shore) expresada en m/s.

3.7. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Todos los datos fueron procesados con el software R versión 3.2.0 (actualizado al 16/04/2015) y disponible en <https://www.r-project.org/>. Fue necesario el uso de paquetes especializados para la lectura de los archivos de salida (outputs) del modelo ICHTHYOP. Los archivos de salida netCDF (.nc) requirieron el uso los paquetes “ncdf” y “XML”. Para poder extraer la información de las salidas de ICHTHOP se utilizó rutinas en R descargadas de la web del modelo (<http://www.Ichthyop.org/>) y posteriormente modificadas para cumplir los objetivos de la investigación.

Se generaron gráficos para representar los porcentajes de éxito de transporte y retención de larvas (promediados para cada factor: mes de desove, profundidad desove y edad mínima de asentamiento) con barras de error que representaron la desviación estándar (Cumming et al. 2007). Luego se aplicó un ANOVA para evaluar el efecto de cada factor sobre la variable respuesta (éxito de transporte larval y retención larval) obtenido de cada simulación.

Para describir el transporte larval se promedió la trayectoria en profundidad y latitud de cada partícula que logró tener éxito de transporte y se representó los límites de confianza al 95 % (Cumming et al. 2007). Por último, para comparar el éxito de transporte y retención entre una zona y otra, se evaluó la homocedasticidad de los datos de transporte y retención con el test de Shapiro. El resultado del test indicó que la distribución de los datos no fue de tipo Gaussiana. Por lo que se decidió aplicar pruebas no paramétricas a los datos. Se aplicó un test no paramétrico de diferencia de grupos en R (Wilcox-test). Los resultados arrojaron diferencias significativas al 95% para el éxito de transporte y la retención larval.

4. RESULTADOS

4.1. PERFIL DE CORRIENTES MERIDIONALES (V) Y ZONALES (U)

La Figura 15 muestra el perfil mensual de corriente meridional (v) ubicado en el punto latitud 6.32°S y longitud 80.83°O . Los valores positivos (expresados en m/s) indican que en general el flujo de corrientes entre la sección comprendida entre la isla Lobos de Tierra y la costa tiene dirección norte. Se puede identificar que la corriente que predomina en esta sección es la Corriente Costera Peruana (CCP). La Figura 18 esquematiza el flujo de corriente zonal (u) en el mismo punto, pudiendo describirse como un flujo tipo offshore hasta una profundidad de 15 metros para luego cambiar de sentido a tipo on-shore hasta los 20 metros de profundidad. La Figura 16 muestra el flujo de corrientes meridional (v) de la sección comprendida entre la isla Lobos de Tierra y la bahía de Sechura. En general, el flujo de corriente ubicado en el punto latitud 6.19°S y longitud 81.07°O , tiene dirección norte entre los 0-60 metros de profundidad; esto indica la presencia de la Corriente Costera Peruana (CCP). Por debajo de los 60 metros de profundidad el flujo toma un sentido hacia sur, lo que indica la presencia de la Corriente Sub-superficial Peruano Chilena (CSSPCH). Además la Figura 19, muestra el perfil de corriente zonal (u) de tipo off-shore hasta una profundidad de 80 metros. Por debajo de los 80 metros la profundidad el flujo general es de tipo on-shore. La Figura 17 permitió identificar un flujo de corriente meridional (v) hacia el norte en el punto 5.51°S y 81.30°O hasta los 150 metros. Debajo de esa profundidad el flujo toma sentido hacia el sur (evidencia de la presencia de la CSSPCH). Dicho punto está ubicado en las afueras de la bahía. La Figura 20 muestra el comportamiento de la corriente zonal (u) de tipo off-shore en los meses de verano (enero-abril) entre los 0 - 150 metros de profundidad, mientras que el resto del año el flujo es on-shore.

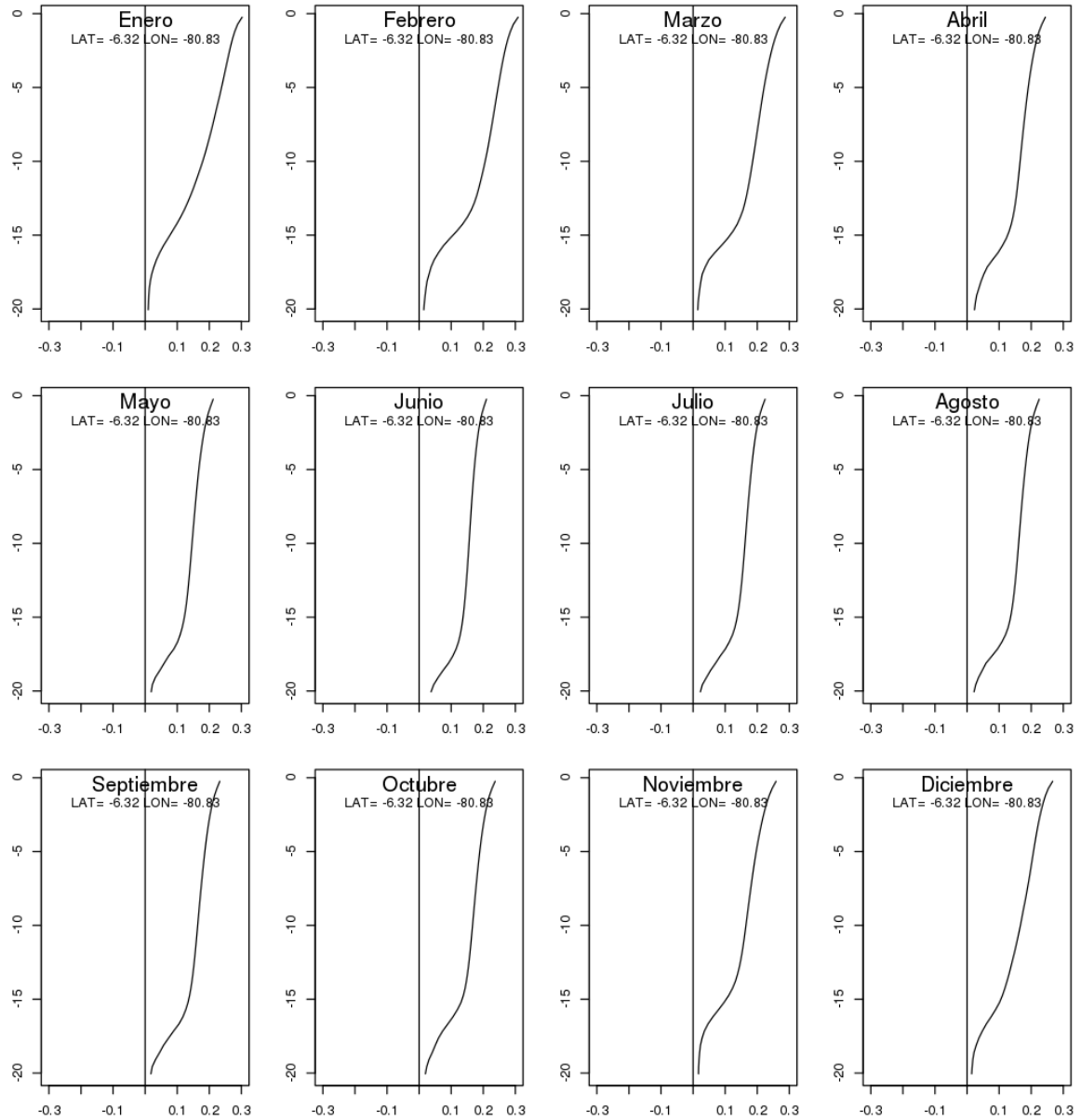


Figura 15 Perfil mensual de corriente meridional (v). Latitud 6.32 °S y longitud 80.83 °O. Este punto está ubicado entre la línea de costa y la isla Lobos de Tierra. Los valores positivos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el norte y los valores negativos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el sur.

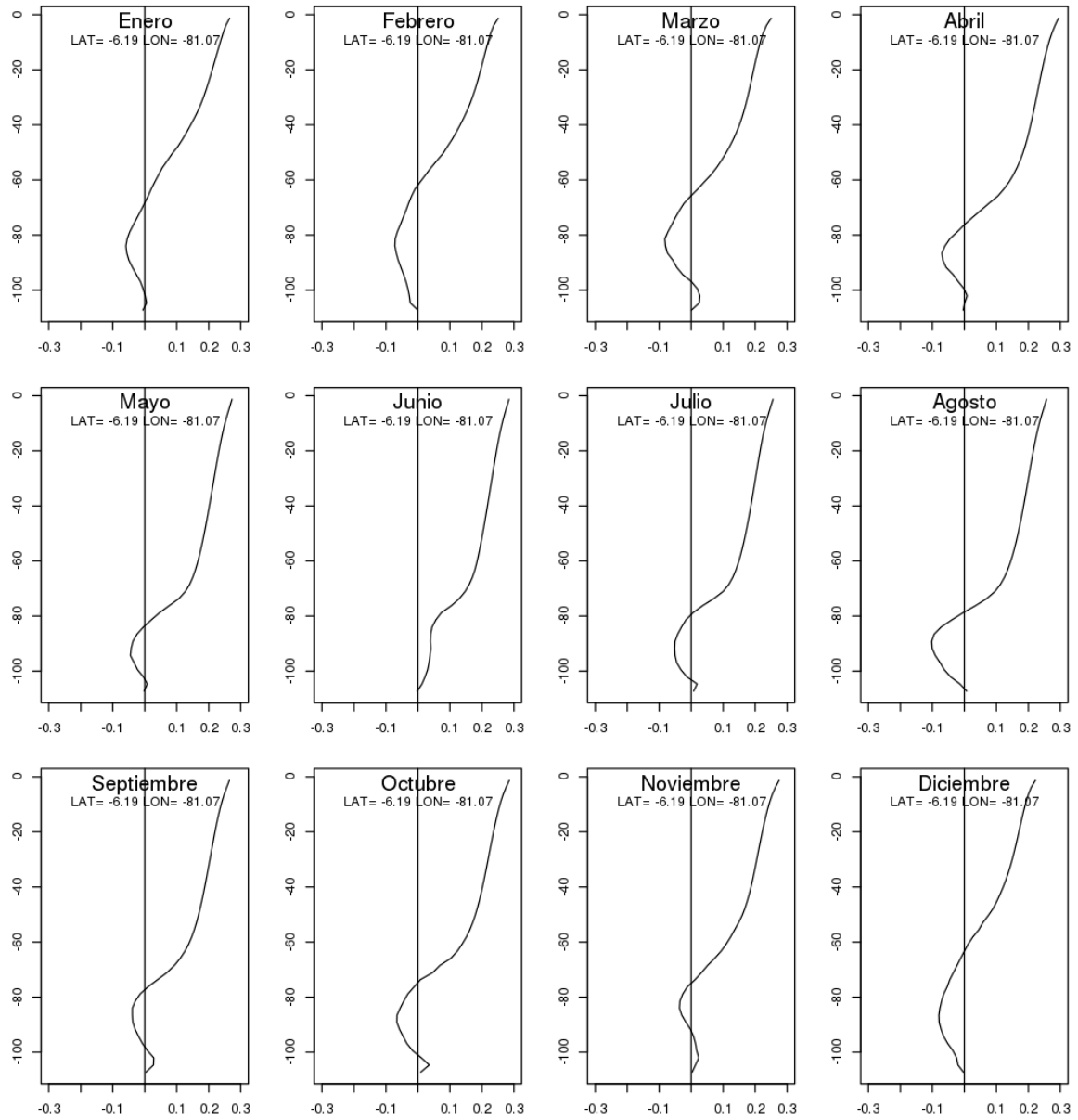


Figura 16 Perfil mensual de corriente meridional (v). Latitud 6.19 °S y longitud 81.07 °O. Los valores positivos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el norte y los valores negativos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el sur.

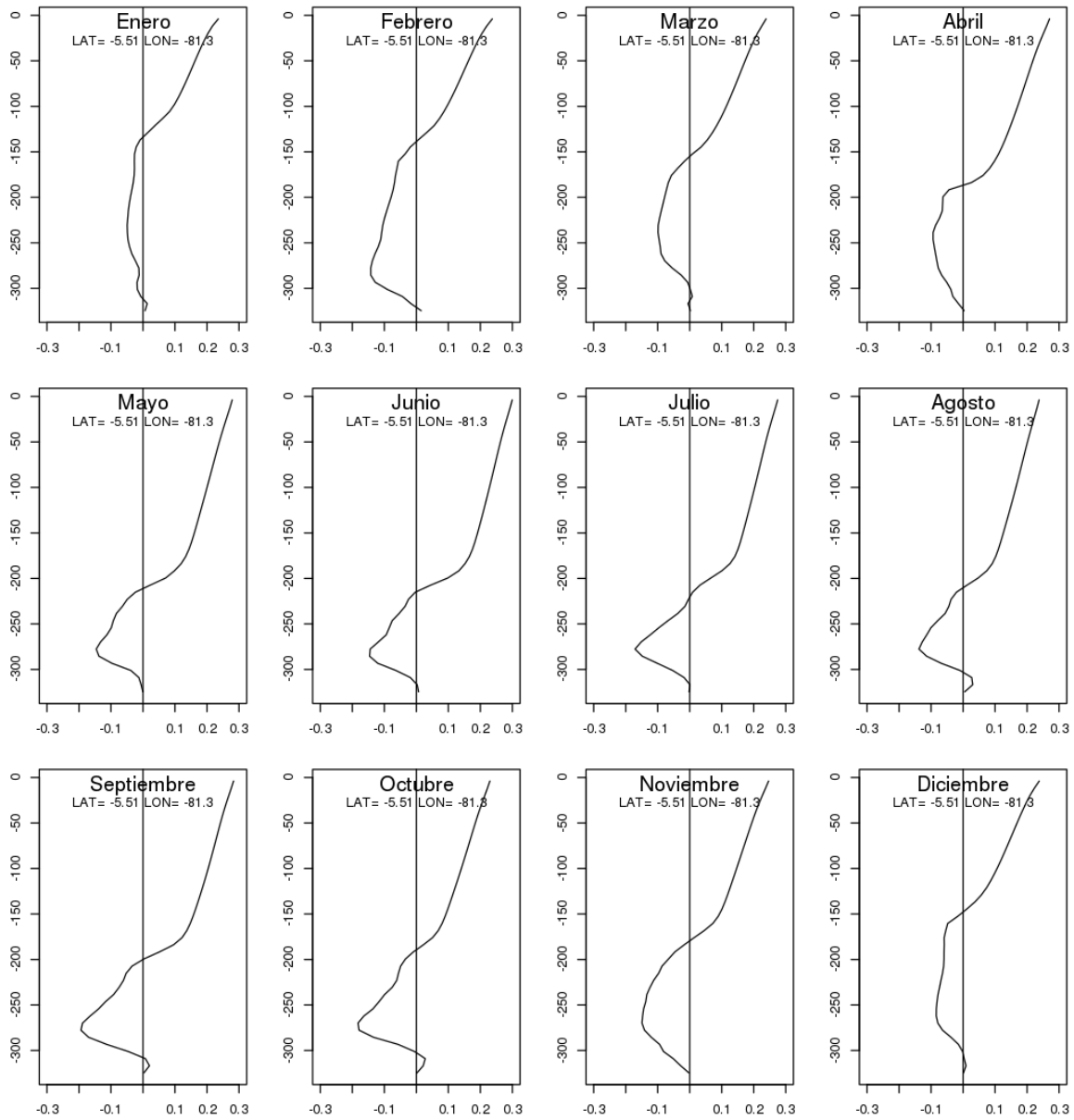


Figura 17 Perfil mensual de corriente meridional (v). Latitud 5.51 °S y longitud 81.30 °O. Los valores positivos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el norte y los valores negativos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el sur.

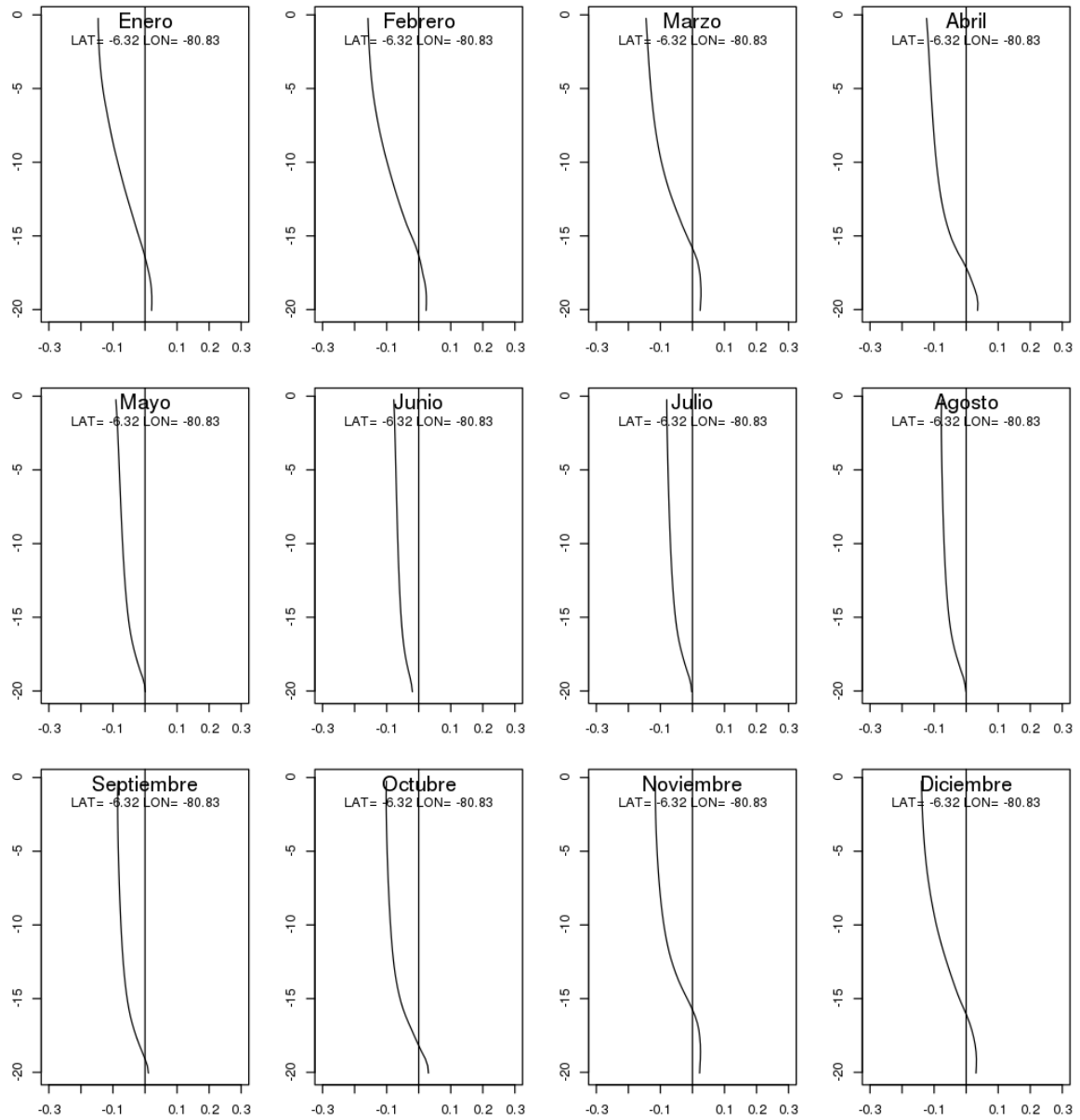


Figura 18 Perfil mensual de corriente zonal (u). Latitud 6.32°S y longitud 80.83°O . Este punto está ubicado entre la línea de costa y la isla Lobos de Tierra. Los valores positivos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el norte y los valores negativos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia el sur.

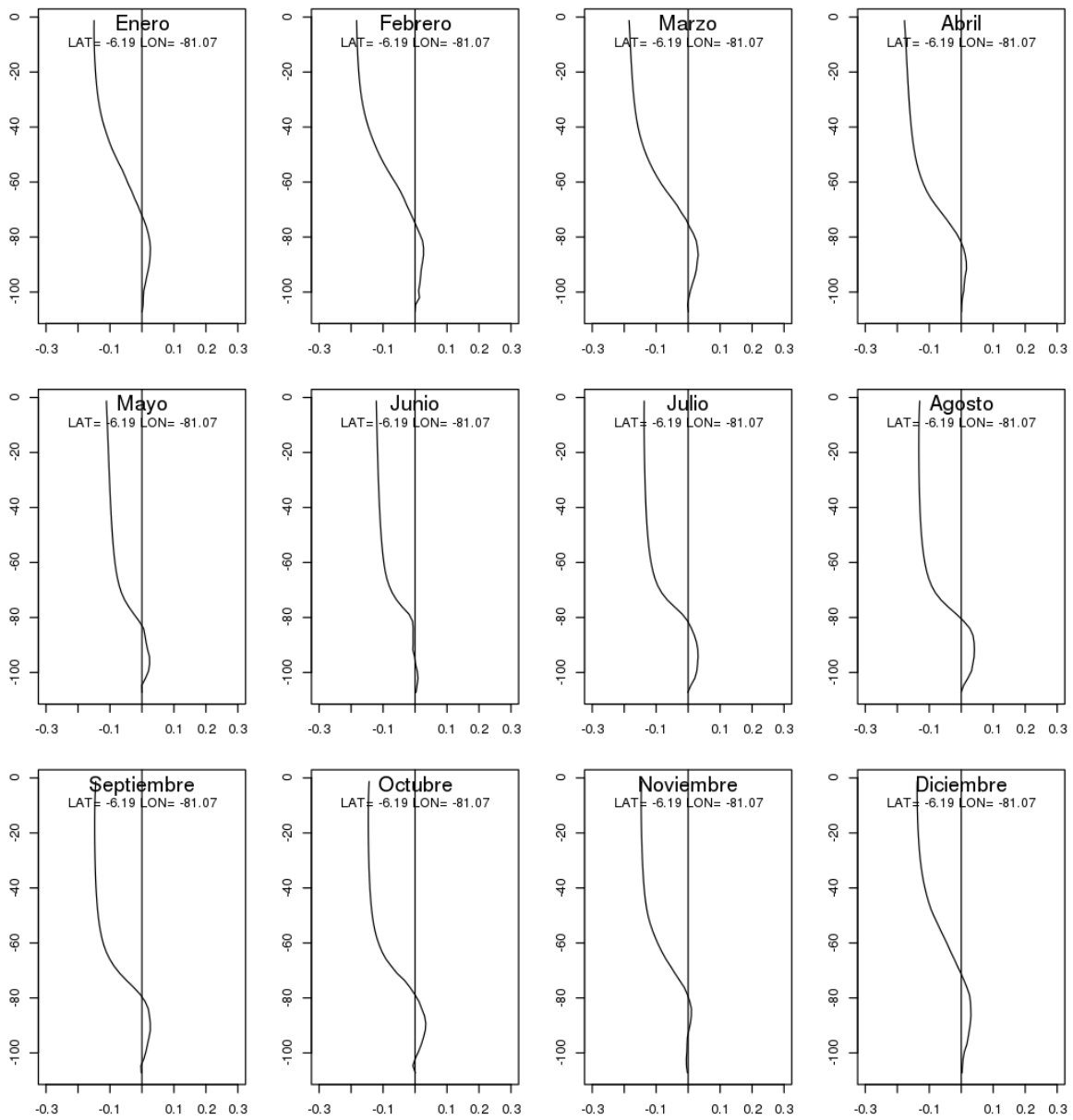


Figura 19 Perfil mensual de corriente zonal (u). Latitud 6.19°S y longitud 81.07°O . Los valores positivos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia la costa (onshore) y los valores negativos indican un flujo de corriente (en m/s) off-shore.

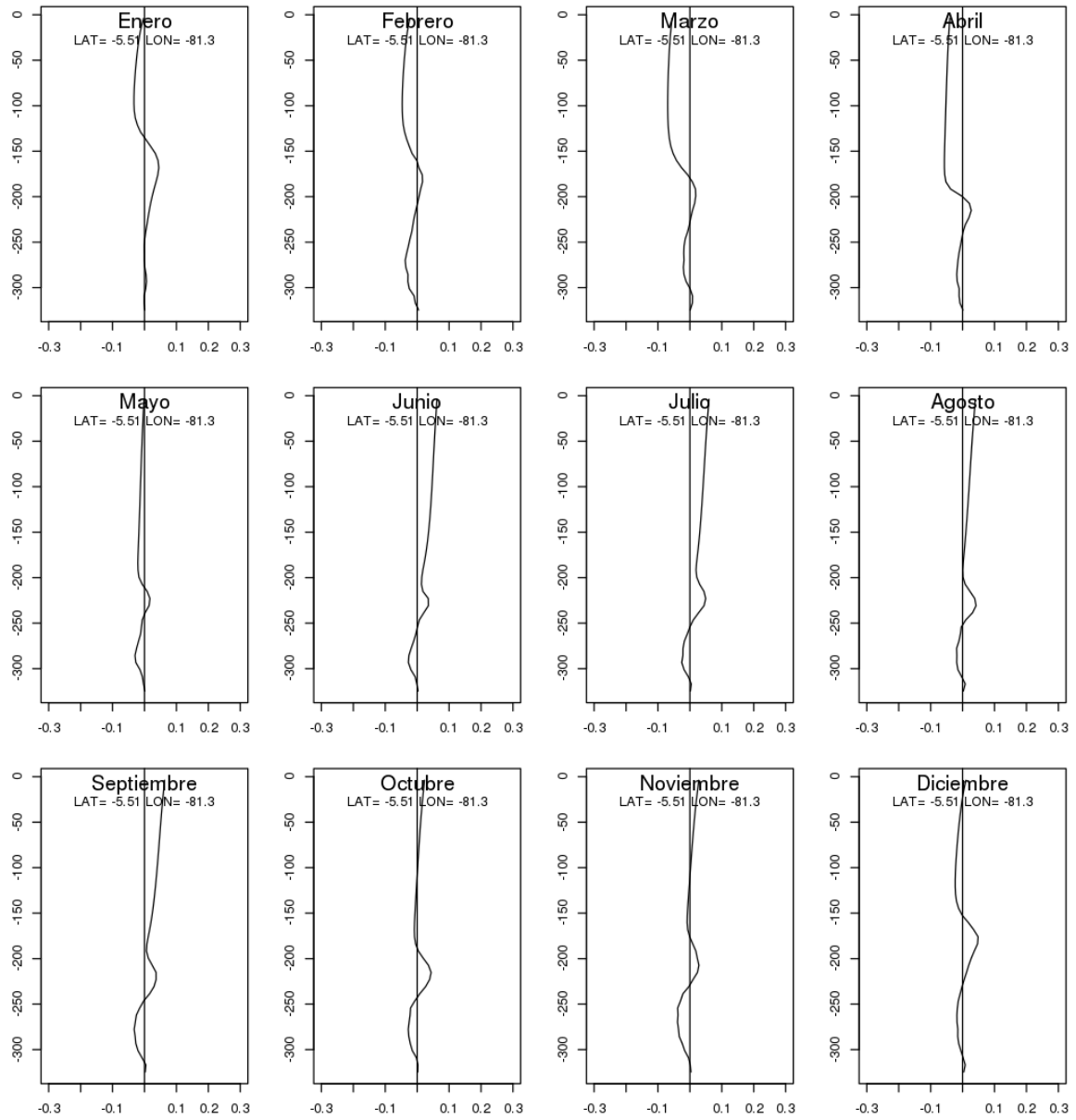


Figura 20 Perfil mensual de corriente zonal (u). Latitud 5.51 °S y longitud 81.30 °O. Los valores positivos indican un flujo de corriente (en m/s) hacia la costa (onshore) y los valores negativos indican un flujo de corriente (en m/s) off-shore.

4.2. ÉXITO DE TRANSPORTE LARVAL

4.2.1. Éxito de transporte desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra

4.2.1.1. Efecto del mes de desove sobre el éxito de transporte

Se encontró que el éxito de transporte de larvas desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra fue mayor en los meses de verano con un máximo en Enero (0.1000 %) y menor éxito de transporte en Febrero (0.0313 %), Marzo (0.0118 %) y Abril (0.0038 %). Durante los meses de Mayo a Julio no se observó un flujo de larvas hacia la isla Lobos de Tierra (0 %). Además durante el periodo de otoño-primavera (Agosto, Septiembre, Octubre) el éxito de transporte fue mínimo (~0.0006 %) para después incrementar en los meses de Noviembre (0.0276 %) y Diciembre (0.0022 %). El factor mes de desove explicó significativamente en un 24.60 % la varianza del éxito de transporte.

4.2.1.2. Efecto de la profundidad de desove sobre el éxito de transporte

Se encontró que los individuos liberados a mayor profundidad (20 – 30 m) lograron un mayor éxito de transporte (0.0387 %). Los individuos que fueron liberados a profundidades entre 0 – 10 m y 10 – 20 m mostraron valores de 0.0003 % y 0.0056 % respectivamente. Se encontró que a mayor profundidad de desove el éxito de transporte desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra fue mayor. El factor profundidad de desove explicó de manera significativa un 9.22 % de la varianza.

4.2.1.3. Efecto de la edad mínima de asentamiento sobre el éxito de transporte

Se encontró que a menor edad mínima de asentamiento (10 días), el éxito de transporte fue mayor (0.0328 %). El éxito de transporte disminuyó al incrementarse el tiempo que los

individuos permanecieron en el ambiente bajo la acción de la advección de las corrientes y la deriva hacia el océano), mostrando que el éxito de transporte fue menor (0.0033 %) cuando los individuos permanecieron 30 días en el ambiente antes de ser asentados. El factor edad mínima de asentamiento explicó de manera significativa un 2.81 % de la varianza.

La Figura 21 muestra el éxito de transporte larval desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra en función del mes de desove, la profundidad de desove y la edad mínima de asentamiento. La Figura 22 muestra el detalle del éxito de transporte para cada edad mínima de asentamiento. Se observó que a una menor edad mínima de asentamiento, el éxito de transporte fue mayor.

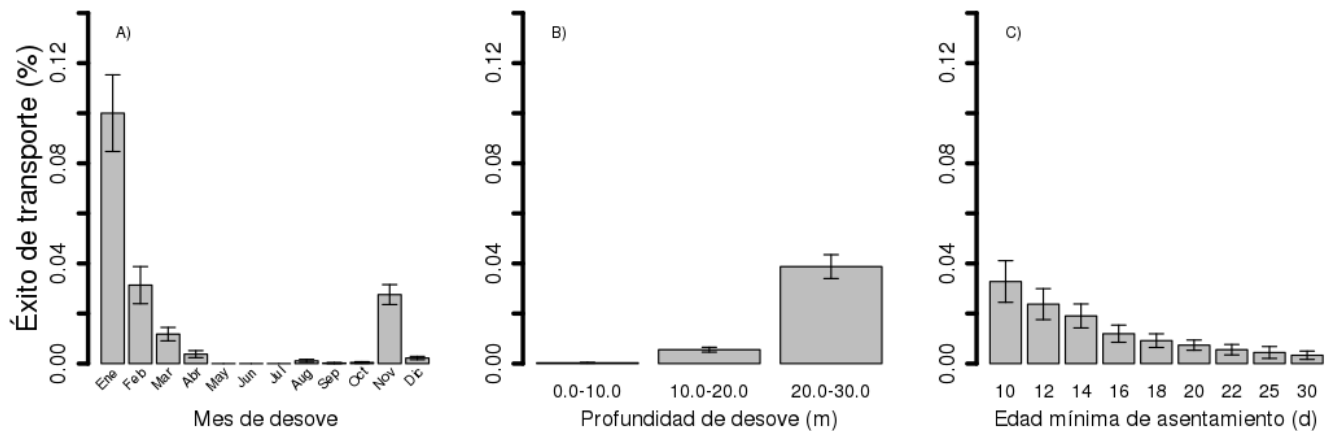


Figura 21 Éxito de transporte larval desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra en función de a) el mes de desove, b) la profundidad de desove y c) la edad mínima de asentamiento.

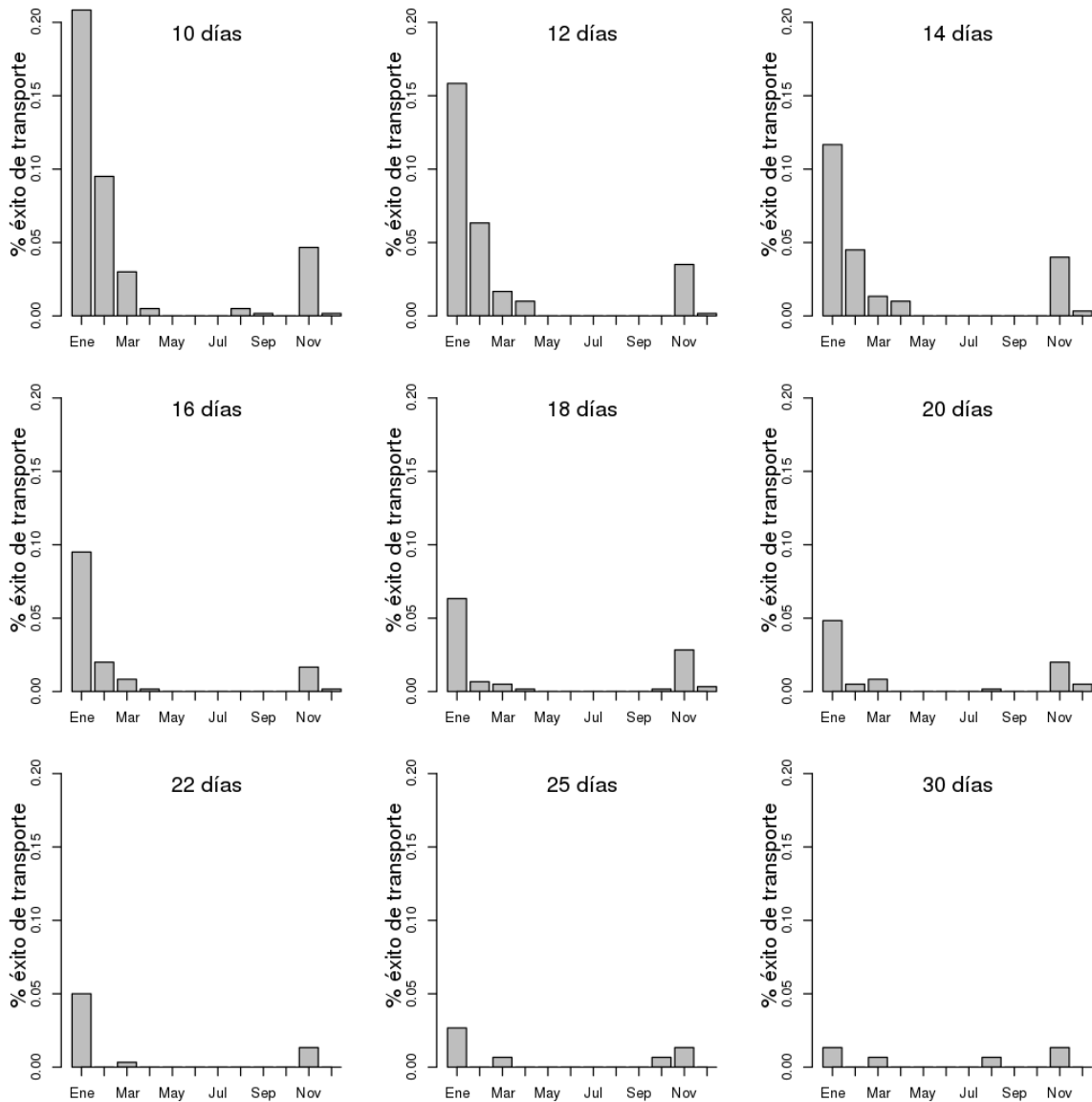


Figura 22 Gráfico de barras del éxito de transporte larval (%) desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra para cada edad mínima de asentamiento.

4.2.1.4. Interacción de los factores sobre el éxito de transporte

Se encontró que la interacción del mes de desove y profundidad de desove afectaron de manera significativa en un 31.23 % a la varianza del éxito de transporte desde la bahía hacia la isla, de manera que a mayor profundidad de desove y en los meses de verano se logró mayor éxito de transporte de larvas. Además se encontró que la interacción del mes de desove

con la edad mínima de asentamiento, explicaron de manera significativa un 9.63 % de la varianza, mientras que la interacción de la profundidad de desove con la edad mínima de asentamiento explicaron de manera significativa un 3.89 % de la varianza. La Tabla 8 muestra un resumen del efecto de cada factor y sus interacciones sobre el éxito de transporte de larvas desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra. La significancia de los factores y sus combinaciones estuvo dada por un $p < 0.05$.

Tabla 8 ANOVA para la salida de la Simulación I mostrando la importancia relativa de cada factor y sus interacciones, sobre el éxito de transporte larval desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra. (***) altamente significativo).

	DF	SUM-SQ	MEAN-SQ	F-VALUE	%EXPL.	PR(>F)
Mes	11	0.8325	0.0756	112.1452	24.60	<2e-16***
Profundidad	2	0.3122	0.1561	231.3261	9.22	<2e-16***
Edad	8	0.0952	0.0119	17.6497	2.81	<2e-16***
Mes x Profundidad	22	1.0567	0.0480	71.1727	31.23	<2e-16***
Mes x Edad	88	0.3260	0.0037	5.4901	9.63	<2e-16***
Profundidad x Edad	16	0.1318	0.0082	12.2053	3.89	<2e-16***
Residuales	932	0.6290	0.0006		18.58	

4.2.2. Éxito de transporte desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura

4.2.2.1. Efecto del mes de desove sobre el éxito de transporte

Se encontró que el éxito de transporte de larvas desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura fue mayor en el mes de Junio (0.0500 %) y menor éxito de transporte en Mayo (0.0084 %), Septiembre (0.0076 %) y Noviembre (0.0120 %). Durante los meses de Marzo, Abril, Agosto y Octubre no se observó flujo de transporte hacia la bahía (0 %). Además durante los meses de Enero, Febrero, Julio y Diciembre el éxito de transporte fue mínimo (~0.0004 %). El factor mes de desove explicó significativamente en un 11.50 % la varianza del éxito de transporte.

4.2.2.2. Efecto de la profundidad de desove sobre el éxito de transporte

Se encontró que los individuos liberados a mayor profundidad (30 – 45 m) lograron un mayor éxito de transporte (0.0172 %). Los individuos que fueron liberados a profundidades entre 0 – 15 m y 15 – 30 m mostraron valores de 0.0010 % y 0.0017 % respectivamente. Se encontró que a mayor profundidad de desove se obtuvo mayor éxito de transporte desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura. El factor profundidad de desove explicó de manera significativa un 3.44 % de la varianza.

4.2.2.3. Efecto de la edad mínima de asentamiento sobre el éxito de transporte

Se encontró que a menor edad mínima de asentamiento (10 días), el éxito de transporte fue mayor (0.0225 %). El éxito de transporte disminuyó al incrementarse el tiempo que los individuos permanecieron en el ambiente bajo la acción de la advección de las corrientes y la deriva hacia el océano), mostrando que el éxito de transporte fue menor (0.0004 %) cuando los individuos permanecieron 22 días en el ambiente antes de ser asentados pero se encontró

que en 20 y 25 días el transporte aumentó (0.0013 % y 0.0011% respectivamente). El factor edad mínima de asentamiento explicó de manera significativa un 3.79 % de la varianza.

La Figura 23 muestra el éxito de transporte larval desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura en función del mes de desove, la profundidad de desove y la edad mínima de asentamiento. La Figura 24 muestra el detalle del éxito de transporte para cada edad mínima de asentamiento. Se observó que a una menor edad mínima de asentamiento, el éxito de transporte fue mayor.

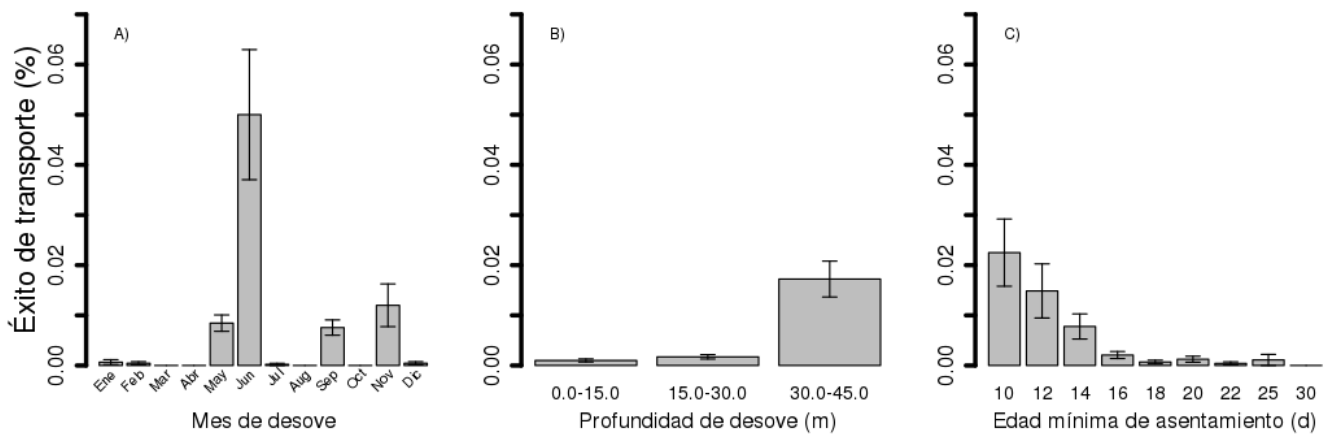


Figura 23 Éxito de transporte larval desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura en función de a) el mes de desove, b) la profundidad de desove y c) la edad mínima de asentamiento.

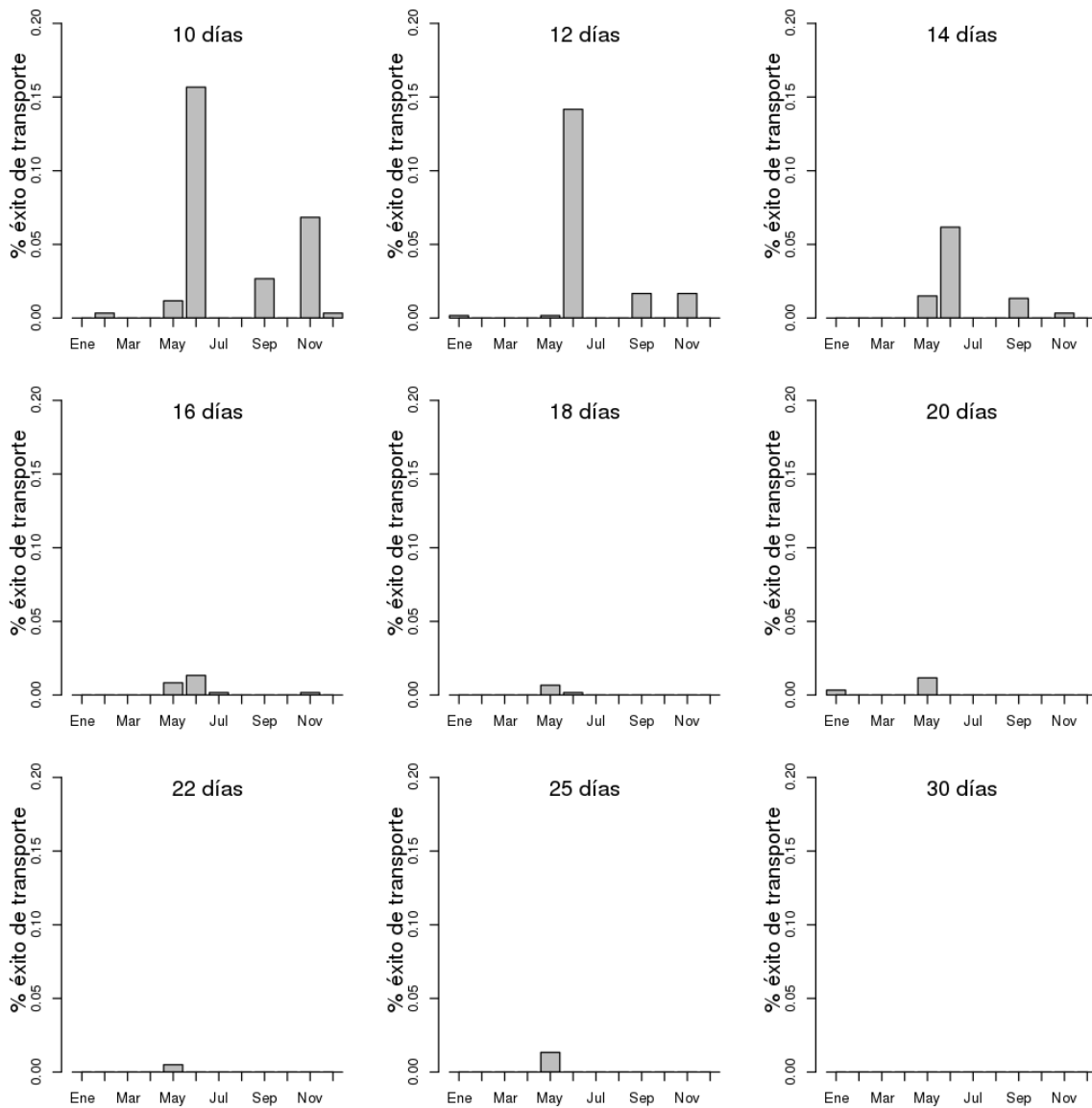


Figura 24 Gráfico de barras del éxito de transporte larval (%) desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura para cada edad mínima de asentamiento.

4.2.2.4. Interacción de los factores sobre el éxito de transporte

Se encontró que la interacción del mes de desove y profundidad de desove afectaron de forma significativa un 18.65 % a la varianza del éxito de transporte desde la isla hacia la bahía, de manera que a mayor profundidad de desove y en los meses de otoño (Mayo, Junio) se logró mayor éxito de transporte de larvas. Además se encontró que la interacción del mes

de desove con la edad mínima de asentamiento, explicaron de manera significativa un 19.89 % de la varianza, mientras que la interacción de la profundidad de desove con la edad mínima de asentamiento explicaron de manera significativa un 4.78 % de la varianza. La Tabla 9 muestra un resumen del efecto de cada factor y sus interacciones sobre el éxito de transporte de larvas desde isla Lobos de Tierra la hacia la bahía de Sechura. La significancia de los factores y sus combinaciones estuvo dada por un $p < 0.05$.

Tabla 9 ANOVA para la salida de la Simulación II mostrando la importancia relativa de cada factor y sus interacciones, sobre el éxito de transporte larval desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura. (***) altamente significativo)

	DF	SUM-SQ	MEAN-SQ	F-VALUE	%EXPL.	PR(>F)
Mes	11	0.2019	0.0183	25.7000	11.50	<2e-16***
Profundidad	2	0.0606	0.0302	42.3442	3.44	<2e-16***
Edad	8	0.0667	0.0083	11.6709	3.79	4.37e-16***
Mes x Profundidad	22	0.3276	0.0148	20.8456	18.65	<2e-16***
Mes x Edad	88	0.3492	0.0039	5.5557	19.89	<2e-16***
Profundidad x Edad	16	0.0840	0.0052	7.3525	4.78	<2e-16***
Residuales	932	0.6657	0.0007		37.91	

4.2.3. Retención larval en la bahía de Sechura

4.2.3.1. Efecto del mes de desove sobre la retención larval

Se encontró que la retención larval en la bahía de Sechura tuvo un pico máximo en el mes de Enero (5.0812 %) y un pico mínimo en el mes de Abril (0.0196 %). El factor mes de desove explicó significativamente en un 14.39 % la varianza la retención en la bahía de Sechura.

4.2.3.2. Efecto de la profundidad de desove sobre la retención larval

Se encontró que los individuos liberados a mayor profundidad (20 – 30 m) lograron una mayor retención (1.5263 %). Los individuos que fueron liberados a profundidades entre 0 – 10 m y 10 – 20 m mostraron valores de 0.1123 % y 0.2252 % respectivamente. Se encontró que a mayor profundidad de desove se obtuvo mayor retención en la bahía de Sechura. El factor profundidad de desove explicó de manera significativa un 3.24 % de la varianza.

4.2.3.3. Efecto de la edad mínima de asentamiento sobre la retención larval

Se encontró que a menor edad mínima de asentamiento (10 días), la retención larval fue mayor (2.3559 %). La retención disminuyó al incrementarse el tiempo que los individuos permanecieron en el ambiente bajo la acción de la advección de las corrientes y la deriva hacia el océano), mostrando que el éxito de transporte fue menor (0.0122 %) cuando los individuos permanecieron 30 días en el ambiente antes de ser asentados. El factor edad mínima de asentamiento explicó de manera significativa un 4.53 % de la varianza.

4.2.3.4. Interacción de los factores sobre la retención larval

Se encontró que la interacción del mes de desove y profundidad de desove afectaron de manera significativa en un 24.68 % a la varianza de la retención en la bahía de Sechura, de manera que a mayor profundidad de desove y en el mes de Enero se logró mayor retención larval. Además se encontró que la interacción del mes de desove con la edad mínima de asentamiento, explicaron de manera significativa un 18.56 % de la varianza, mientras que la interacción de la profundidad de desove con la edad mínima de asentamiento explicaron de manera significativa un 3.98 % de la varianza

La Figura 25 muestra la retención larval en la bahía de Sechura en función del mes de desove, la profundidad de desove y la edad mínima de asentamiento. La Figura 26 muestra el detalle del éxito de transporte para cada edad mínima de asentamiento. Se observó que a una menor edad mínima de asentamiento, el éxito de transporte fue mayor.

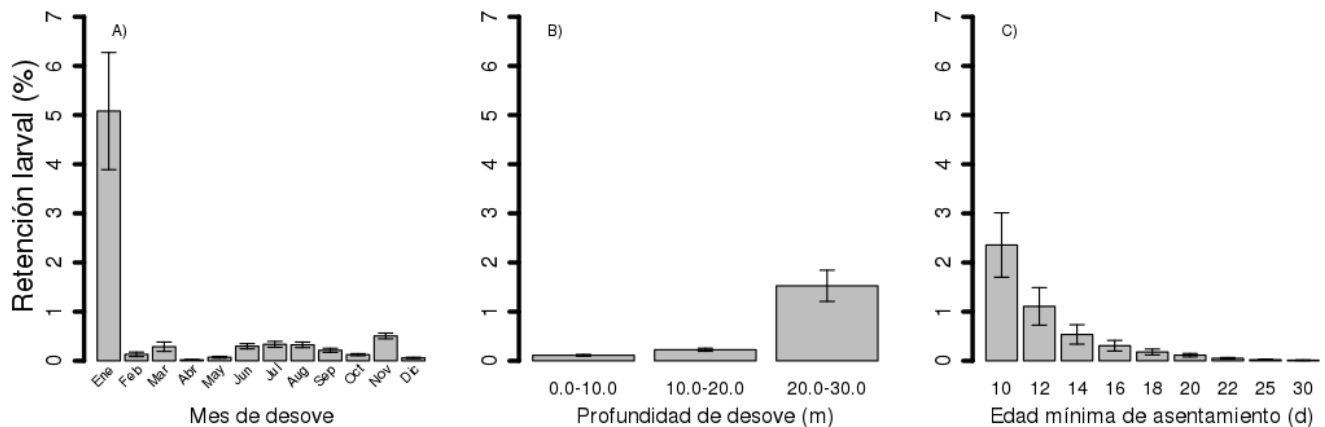


Figura 25 Retención larval en la bahía de Sechura en función de a) el mes de desove, b) la profundidad de desove y c) la edad mínima de asentamiento.

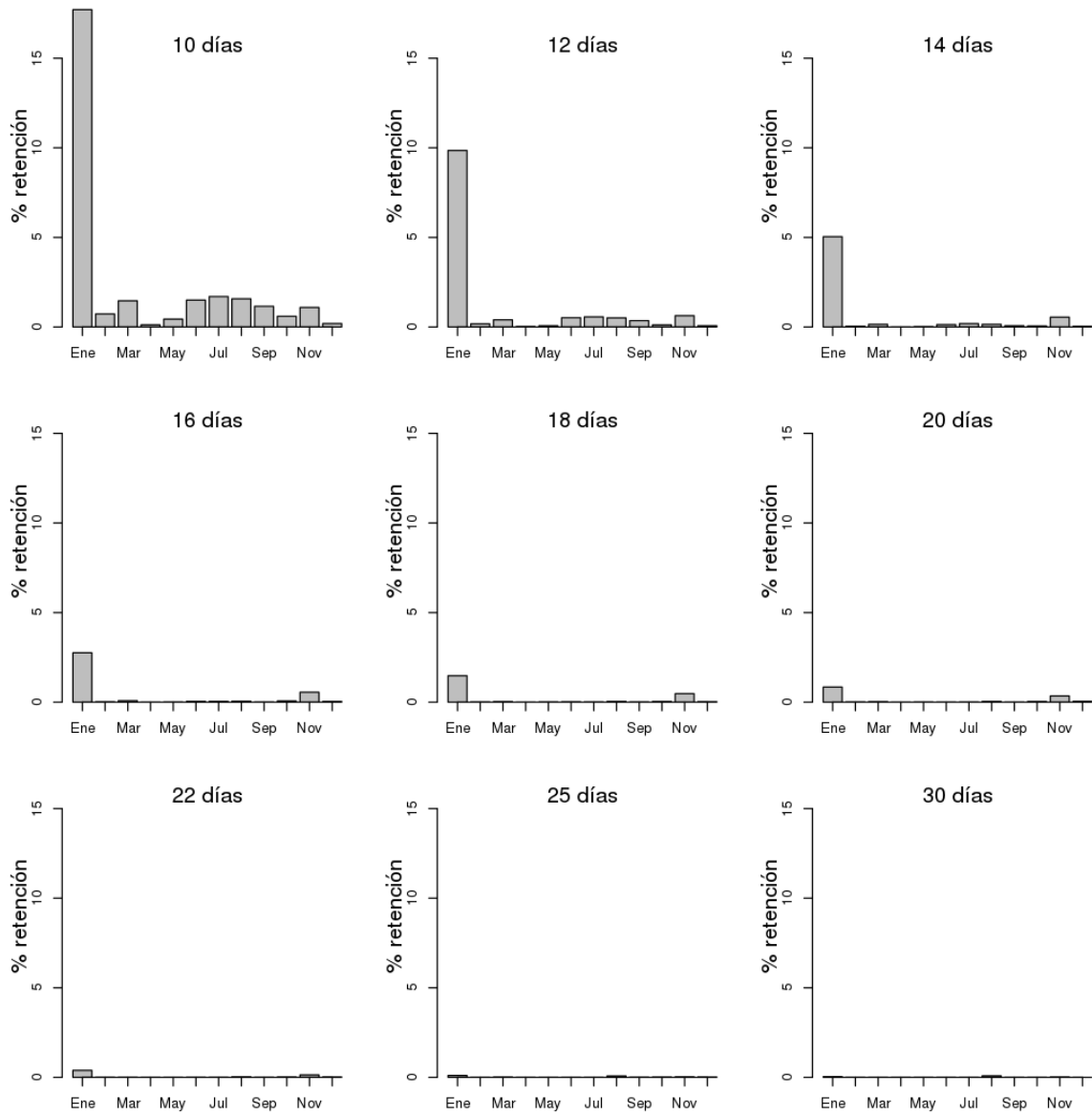


Figura 26 Gráfico de barras de la retención larval (%) en la bahía de Sechura para cada edad mínima de asentamiento.

La Tabla 10 muestra un resumen del efecto de cada factor y sus interacciones sobre la retención larval en la bahía de Sechura. La significancia de los factores y sus combinaciones estuvo dada por un $p < 0.05$.

Tabla 10 ANOVA para la salida de la Simulación III mostrando la importancia relativa de cada factor y sus interacciones, sobre la retención en la bahía de Sechura. (***) altamente significativo)

	DF	SUM-SQ	MEAN-SQ	F-VALUE	%EXPL.	PR(>F)
Mes	11	1972.8	179.348	39.8646	14.39	<2e-16***
Profundidad	2	444.6	222.308	49.4135	3.24	<2e-16***
Edad	8	620.9	77.608	17.2504	4.53	<2e-16***
Mes x Profundidad	22	3382.5	153.749	34.1745	24.68	<2e-16***
Mes x Edad	88	2543.8	28.907	6.4252	18.56	<2e-16***
Profundidad x Edad	16	546.4	34.149	7.5904	3.98	<2e-16***
Residuales	932	4193.0	4.499		30.59	

4.2.4. Retención larval en la isla Lobos de Tierra

4.2.4.1. Efecto del mes de desove sobre la retención larval

Se encontró que la retención larval en la isla Lobos de Tierra fue mayor en los meses de Enero (6.6324 %) y Marzo (6.0759 %). En los meses de Abril (2.8290 %), Julio (1.9671 %) y Noviembre (3.2871 %) la retención se disminuyó, mientras que el resto de meses la retención en promedio fue de ~0.5539 %. El factor mes de desove explicó significativamente en un 22.62 % la varianza la retención en la isla Lobos de Tierra.

4.2.4.2. Efecto de la profundidad de desove sobre la retención larval

Se encontró que los individuos liberados a mayor profundidad (30 – 45 m) lograron una mayor retención (4.8497 %). Los individuos que fueron liberados a profundidades entre 0 – 15 m y 15 – 30 m mostraron valores de 0.0367 % y 1.2210 % respectivamente. Se encontró que a mayor profundidad de desove se obtuvo mayor retención en la isla Lobos de Tierra. El factor profundidad de desove explicó de manera significativa un 20.35 % de la varianza.

4.2.4.3. Efecto de la edad mínima de asentamiento sobre la retención larval

Se encontró que a menor edad mínima de asentamiento (10 días), la retención larval fue mayor (5.0368 %). La retención disminuyó al incrementarse el tiempo que los individuos permanecieron en el ambiente bajo la acción de la advección de las corrientes y la deriva hacia el océano), mostrando que el éxito de transporte fue menor (0.1962 %) cuando los individuos permanecieron 30 días en el ambiente antes de ser

asentados. El factor edad mínima de asentamiento explicó de manera significativa un 10.78 % de la varianza.

4.2.4.4. Interacción de los factores sobre la retención larval

Se encontró que la interacción del mes de desove y profundidad de desove afectaron de manera significativa en un 19.22 % a la varianza de la retención en la isla Lobos de Tierra. Además, la interacción del mes de desove con la edad mínima de asentamiento, explicaron de manera significativa un 9.30 % de la varianza, mientras que la interacción de la profundidad de desove con la edad mínima de asentamiento explicaron de manera significativa un 9.98 % de la varianza.

La Figura 27 muestra la retención larval en la bahía de Sechura en función del mes de desove, la profundidad de desove y la edad mínima de asentamiento. La Figura 28 muestra el detalle del éxito de transporte para cada edad mínima de asentamiento. Se observó que a una menor edad mínima de asentamiento, el éxito de transporte fue mayor.

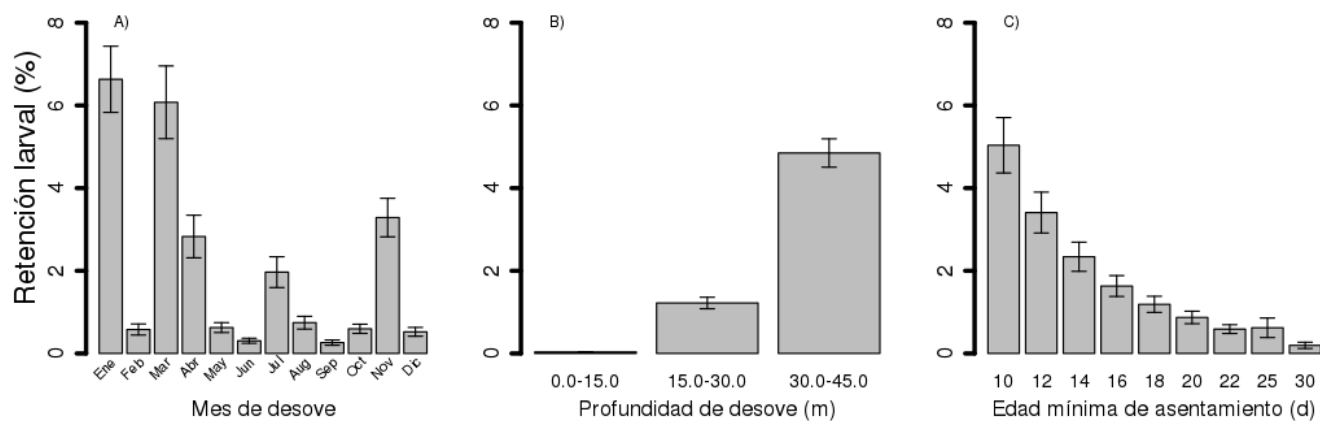


Figura 27 Retención larval en la isla Lobos de Tierra en función de a) el mes de desove, b) la profundidad de desove y c) la edad mínima de asentamiento.

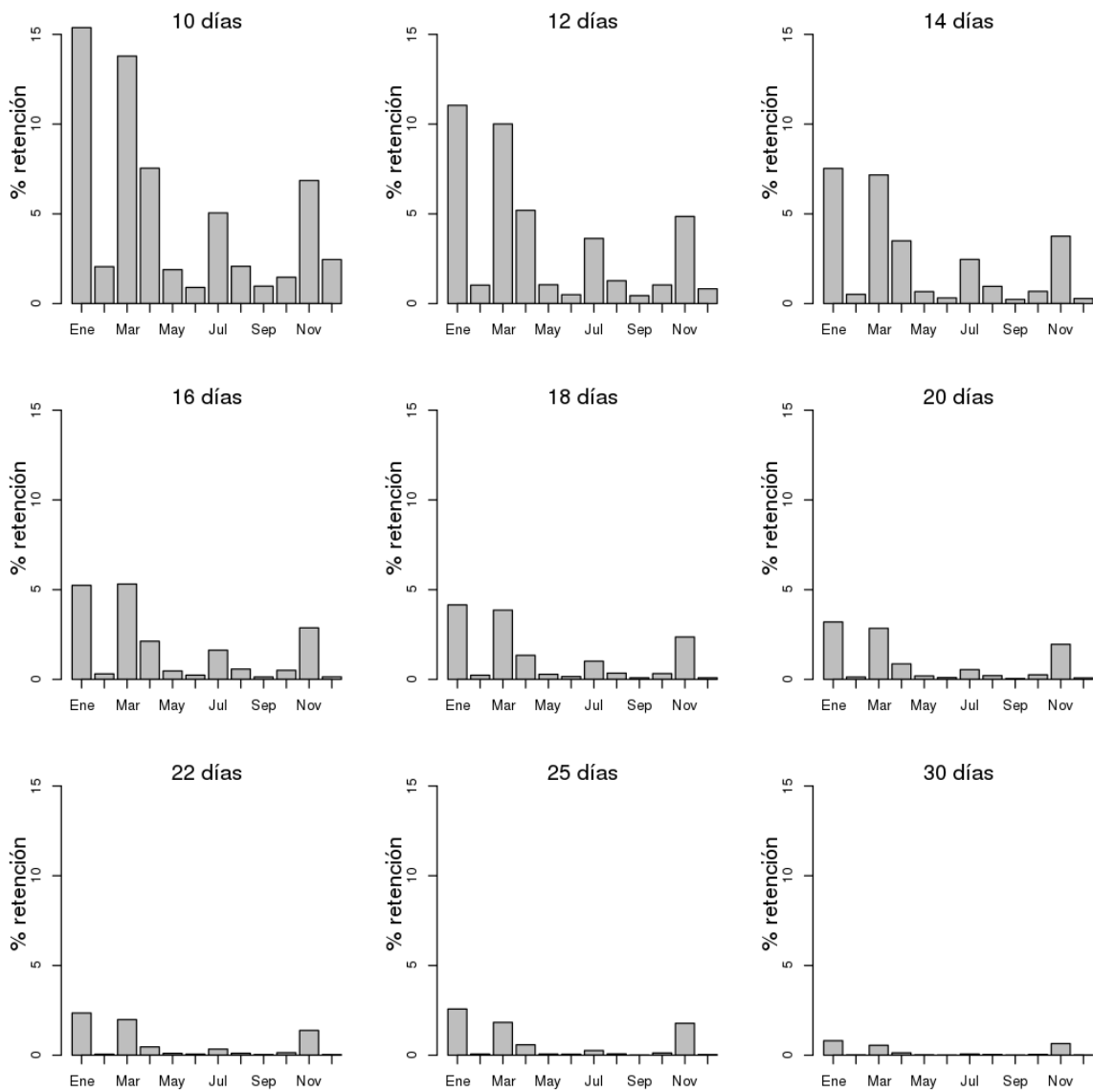


Figura 28 Gráfico de barras de la retención larval (%) en la isla Lobos de Tierra para cada edad mínima de asentamiento.

La Tabla 11 muestra un resumen del efecto de cada factor y sus interacciones sobre la retención larval en la bahía de Sechura. La significancia de los factores y sus combinaciones estuvo dada por un $p < 0.05$.

Tabla 11 ANOVA para la salida de la Simulación IV mostrando la importancia relativa de cada factor y sus interacciones, sobre la retención en la isla Lobos de Tierra. (***) altamente significativo)

	DF	SUM-SQ	MEAN-SQ	F-VALUE	%EXPL.	PR(>F)
Mes	11	5033.1	457.56	248.276	22.62	<2e-16***
Profundidad	2	4528.4	2264.18	1228.569	20.35	<2e-16***
Edad	8	2399.2	299.90	162.729	10.78	<2e-16***
Mes x Profundidad	22	4277.4	194.43	105.498	19.22	<2e-16***
Mes x Edad	88	2070.9	23.53	12.769	9.30	<2e-16***
Profundidad x Edad	16	2220.6	138.79	75.307	9.98	<2e-16***
Residuales	923	1717.6	1.84		7.72	

4.3. TRAYECTORIA DE PARTÍCULAS

4.3.1. Trayectoria de partículas desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra

La Figura 29 muestra la trayectoria del total de partículas transportadas (la suma de las partículas liberadas entre 0-10, 10-20 y 20-30 metros).

El éxito de transporte hacia la isla fue mayor en el mes de Enero respecto a los demás meses. Se observó que las partículas son transportadas principalmente entre la capa de 20-50 metros de profundidad iniciando su recorrido aproximadamente en $\sim 5.7^{\circ}\text{S}$ (parte sur de la bahía) para luego profundizarse y subir en la latitud $\sim 6.4^{\circ}\text{S}$ donde la mayoría de partículas termina su recorrido.

La trayectoria del total de partículas transportadas (la suma de las partículas liberadas entre 0-10, 10-20 y 20-30 metros) en el mes de febrero. Se observó que las partículas son transportadas principalmente entre 20 y 45 metros de profundidad iniciando su recorrido aproximadamente en $\sim 5.7^{\circ}\text{S}$ (parte sur de la bahía) para luego profundizarse. Posterior a eso, las partículas suben hasta la capa entre 10-20 metros en la latitud $\sim 6.3^{\circ}\text{S}$ donde inicia la isla Lobos de Tierra. Algunas partículas continúan su recorrido profundizándose hacia el sur para luego subir y retornar a la isla por las capas superficiales.

Algo similar sucedió en el mes de marzo, pero el mayor transporte se realizó entre la capa de 20-55 metros. Mientras que en el mes de abril las partículas iniciaron su recorrido en la latitud $\sim 5.8^{\circ}\text{S}$ aproximadamente siguiendo un patrón similar al del mes de marzo. En los meses de mayo, junio y julio no se observó transporte larval.

En noviembre, las partículas tienden a avanzar hacia el norte por superficie para luego profundizarse y ser advectadas hacia el sur en dirección a la isla Lobos de Tierra principalmente entre la capa 30-60 metros para luego subir y llegar aproximadamente

a la latitud $\sim 6.4^\circ\text{S}$. Algo similar sucede en los meses de septiembre y octubre, pero con un número de partículas en menor proporción (porcentaje de éxito de transporte bajo). El mes de diciembre tiene un comportamiento similar al de marzo y abril.

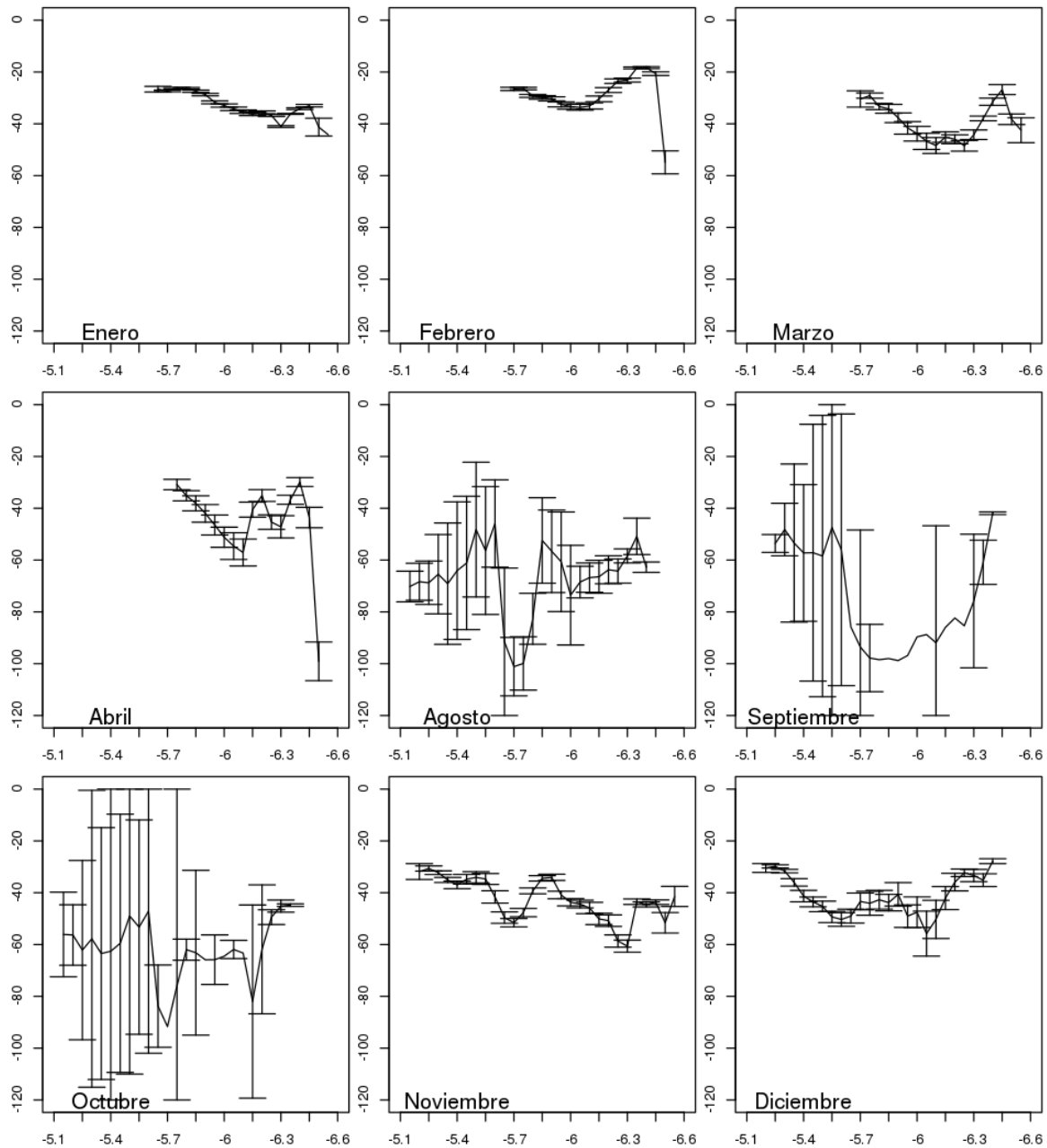


Figura 29 Trayectoria del total de partículas transportadas desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra. Los bigotes indican los límites de confianza al 95%. El sentido del transporte es de izquierda a derecha.

De la figura anterior podemos observar que entre los meses de diciembre a abril, la distancia recorrida es menor respecto a los demás meses, además de que en verano, el transporte se realizó a menor profundidad en comparación al resto de estaciones. De acuerdo a las trayectorias de las partículas, la Corriente Sub-superficial Peruano Chilena (CSSPCH) es la que llevaría las partículas desde la bahía hacia la isla.

4.3.2. Trayectoria de partículas desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura

La Figura 30 muestra la trayectoria del total de partículas transportadas (la suma de las partículas liberadas entre 0-15, 15-30 y 30-45 metros) desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura. En el mes enero se observó que las partículas transportadas tienen una trayectoria en la que primero se profundizan hasta 50-60 metros y luego suben para ser transportadas por las capas superficiales hasta la zona sur de la bahía de Sechura donde hacen su ingreso a la zona de asentamiento.

En el mes de febrero, las larvas suben hacia la capa superficial al salir de la isla en dirección norte y luego son transportadas superficialmente hacia la bahía de Sechura para entrar por la parte sur de la misma. En los meses de marzo y abril no se observó transporte larval desde la isla hacia la bahía.

En el mes de mayo las partículas son transportadas primero profundizándose en dirección sur para luego ascender y ser llevadas en dirección norte hacia la bahía. Entre la latitud $\sim 6.1^{\circ}\text{S}$ y $\sim 6.4^{\circ}\text{S}$ las partículas tuvieron un recorrido circular, avanzando primero al norte por superficie, luego siendo llevadas al sur por debajo de

los 40 metros, para luego ascender y seguir su recorrido hacia la bahía por las capas superficiales.

El transporte desde la isla hacia la bahía en el mes de junio fue el mayor respecto a los demás meses. Las partículas se profundizaron al salir de la bahía y luego ascendieron para continuar su recorrido rumbo norte por las capas superficiales. El mes de julio, las trayectorias de las partículas tienen un comportamiento similar, mientras que en agosto y octubre no se observó transporte larval hacia la bahía.

En el mes de septiembre, el transporte larval presentó dos características diferentes. Las partículas que fueron liberadas entre 0-15 metros de profundidad fueron transportadas por las capas superficiales hacia la bahía de Sechura, mientras que las partículas que fueron liberadas por debajo de los 15 metros de profundidad primero se profundizaron y luego ascendieron hacia las capas superficiales para continuar su recorrido hacia la bahía, realizando un descenso en latitud $\sim 5.95^\circ\text{S}$, para luego volver a las capas superficiales.

El transporte larval en el mes de noviembre y diciembre tienen un comportamiento similar al del mes de febrero. En ambos casos las corrientes superficiales son las que transportan las partículas hacia la bahía en dirección norte.

Se observó que la distancia recorrida es similar en todos los meses, y que el punto de entrada de las larvas a la bahía, es por la zona sur de la misma.

De acuerdo a las trayectorias de las partículas, es la Corriente Costera Peruana (CCP) la que facilitaría el transporte larval desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura.

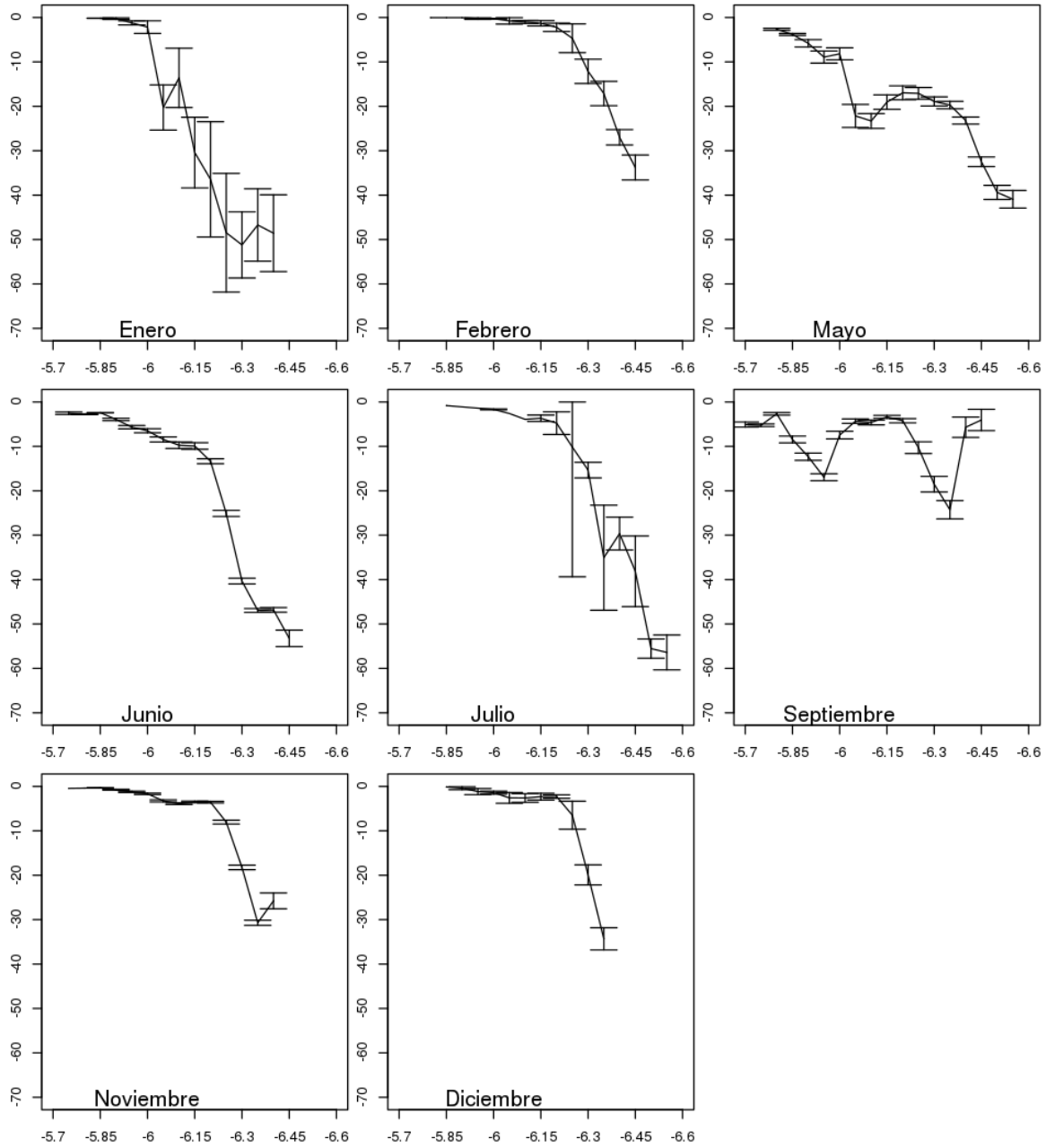


Figura 30 Trayectoria del total de partículas transportadas desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura. Los bigotes indican los límites de confianza al 95%. El sentido del transporte es de derecha a izquierda.

4.4. DE PARTÍCULAS A INDIVIDUOS

Basados en los informes poblacionales de IMARPE, el número de individuos adultos promedio fue de 498 millones en la bahía de Sechura (entre 1995-2010) y 164 millones de individuos en la isla Lobos de Tierra (entre 1995-2010). Con la información anterior y bajo el enfoque de súper-individuo, en la bahía de Sechura cada partícula liberada en el modelo representa 398 700 millones de larvas, mientras que en la isla Lobos de Tierra, cada partícula representa 131 410 millones de larvas.

Así, el transporte de larvas desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra (0.0149 %), representaría aproximadamente $297.03 * 10^9$ larvas transportadas en promedio entre 10 y 30 días. Por otro lado, el aporte de larvas desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura (0.0066 %) representaría aproximadamente $43.36 * 10^9$ larvas transportadas en promedio entre 10 y 30 días. Por otro lado, la retención de larvas en la bahía de Sechura (0.6213 %) representaría aproximadamente $12\ 385.61 * 10^9$ larvas retenidas en promedio entre 10 y 30 días. Mientras que la retención de larvas en la isla Lobos de Tierra (2.0358 %), representaría aproximadamente $13\ 376.22 * 10^9$ millones de larvas retenidas en promedio entre 10 y 30 días.

5. DISCUSIÓN

5.1. MODELO HIDRODINÁMICO (ROMS)

El modelo hidrodinámico (ROMS) utilizado en esta investigación tuvo una resolución horizontal de 2.2 kilómetros y fue forzado por promedios mensuales de vientos y flujos de superficie también mensuales. Esto permitió representar la variabilidad estacional de la dinámica de corrientes oceánicas en el norte de la corriente de Humboldt. El patrón general de circulación de superficie y sub-superficie cumple con lo descrito en la literatura (Montes et al. 2010).

La circulación dentro de la bahía de Sechura es similar a lo descrito por Morón et al. (2013) con un flujo superficial en dirección norte y un flujo de salida de sub-superficie por la parte sur de la bahía, lo que haría posible el transporte larval desde la bahía hacia la isla.

Sin embargo, para trabajos futuros sería recomendable aumentar la resolución del modelo para conocer con más detalle la circulación interna de la bahía de Sechura, además de representar mejor la batimetría, la línea de costa y los efectos de la topografía sobre la circulación de sub-mesoescala y representar mejor el “efecto de la masa de isla” sobre la circulación, que podrían generar remolinos y mezcla vertical en zonas insulares como lo menciona (Borgne et al. 1985) y su efecto positivo sobre la producción primaria (variable biótica que no fue representada en esta versión de ROMS) (Palacios 2002). Boehlert and Mundy (1993) describieron la importancia de los factores abióticos sobre la formación, mantenimiento y distribución de ensambles de ictioplancton (y por lo tanto también en larvas pelágicas de bivalvos) alrededor de islas, efectos que no fueron simulados en esta ocasión y que podrían incrementar los porcentajes de retención larval en la isla debido a la formación de remolinos. Se espera mejorar la representatividad del modelo de circulación haciendo uso

de forzantes de viento diarios para simular mejor la variabilidad de las corrientes que podrían tener un efecto significativo sobre el éxito de transporte o la retención en bahías protegidas como Sechura o en islas como Lobos de Tierra. Además, un área como la bahía de Sechura que interacciona con ríos y manglares, tendría una dinámica de corrientes variable a pequeña escala que podría ser incluida en posteriores investigaciones, ofreciendo oportunidad de incluir la variabilidad en la salinidad y temperatura causada por un evento El Niño, como factores importantes en la sobrevivencia de larvas de *Argopecten purpuratus*. Tettelbach and Rhodes (1981) mostraron evidencia empírica del efecto combinado de estos factores sobre la sobrevivencia de larvas de *Argopecten irradians*.

5.2. TRANSPORTE Y RETENCIÓN DE LARVAS

El criterio de éxito de transporte del presente estudio y los picos de éxito de transporte en función del área de desove (0.0149 % desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra y de 0.0066 % para el transporte en sentido opuesto), son similares a los encontrados por Aiken et al. (2007), quienes realizaron un estudio de dispersión larval con un modelo numérico en la costa central de Chile, con la finalidad de evaluar la dispersión de organismos planctónicos simulada por la advección pasiva de partículas sin modelar ningún comportamiento biológico del plancton. Los núcleos de dispersión que encontraron fueron no-Gaussianos, conclusión que refuerza la utilización de modelos de dispersión lagrangianos y estocásticos en lugar de los determinísticos.

Se encontró que la profundidad de desove tiene un efecto significativo sobre la retención larval, observándose tasas mayores a mayor profundidad de desove (20 - 30 metros en Sechura y 30 - 45 metros en Lobos de Tierra), conclusión que concuerda con la

investigación hecha por Brochier et al. (2008b) en retención larval de anchoveta peruana (*Engraulis ringens*) quienes determinan una alta sensibilidad a la distribución espacial inicial de las partículas.

El éxito de transporte de larvas desde la bahía hacia la isla (0.0149 %) mostró un comportamiento estacional similar a las tasas de retención de Brochier et al. (2008b), con mayores tasas de éxito de transporte en los meses de primavera y verano, asociada a la intensificación de la Corriente Sub-superficial Peruano Chilena (CSSPCH). Por otro lado, el éxito de transporte de larvas desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura mostró mayores tasas de los meses de Mayo, Junio, Septiembre y Noviembre asociado la profundidad de transporte de partículas a la Corriente Costera Peruana (CCP).

Brochier et al. (2008b) indicaron que el efecto combinado del mes de desove y la profundidad de desove explicaron un 5.8 % de la retención larval, mientras que los resultados de esta investigación mostraron que los mismos factores combinados explicaron el éxito de transporte de larvas desde la bahía hacia la isla en un 31.23 % y en un 18.65 % para el éxito de transporte en sentido opuesto, mientras que la retención se pudo explicar en un 24.68 % en la bahía de Sechura y en un 19.22 % en la isla Lobos de Tierra. En esta investigación, el efecto combinado de los factores favoreció más a la explicación de la variable respuesta que cada factor por separado.

El ciclo de vida de muchos organismos bentónicos incluye estadios larvales pelágicos, los cuales pueden actuar como agentes de dispersión o de flujo genético (Paris and Cowen 2004). Estudios previos, sugieren que la dispersión a larga distancia de larvas marinas es un evento común cuando se trata de escalas de tiempo evolutivas, lo que permite una considerable conexión genética entre poblaciones distantes (Scheltema 1986), conclusión que es reforzada por (Ysla 2009) quien hizo un estudio de variabilidad genética entre

poblaciones de *Argopecten purpuratus* de Perú y Chile (tres poblaciones de Perú: Bahía Sechura (6° S), Tortugas (10° S) y Bahía Independencia (13° S) y tres poblaciones de Chile: Iquique (20° S), Caldera (27° S) y Bahía Tongoy (30° S)), y concluye que entre las poblaciones existiría un cierto flujo génico entre ellas reforzando la hipótesis del flujo larval entre la bahía de Sechura y la isla Lobos de Tierra y que estaría apoyado por el flujo de corrientes como mecanismo de transporte larval.

(Paris and Cowen 2004) encontraron evidencia de un mecanismo biofísico para la retención de larvas de peces de arrecife (*Stegastes partitus*), además concluyeron que existe influencia en la dispersión y retención en sus arrecifes de origen. Sus resultados proveen evidencia empírica de que la migración vertical de estadios tempranos de peces tiene influencia sobre el transporte y retención larval de peces. Brochier et al. (2008b), en un trabajo de modelado, encontraron que el comportamiento vertical de larvas de anchoveta tiene un efecto significativo en la retención larval; dicho efecto no fue evaluado en la presente investigación, pero se estima que podría incrementar las tasas de retención de concha de abanico en la bahía de Sechura, sin embargo para tal propósito sería necesario investigaciones en laboratorio o meso-cosmos, sobre el comportamiento vertical de larvas de *Argopecten purpuratus*, así como una estimación de la velocidad de nado en columna de agua y podría ser aplicable a estudios de modelado de retención en bahías cerradas y protegidas, donde la velocidad de nado de vertical de *Argopecten purpuratus* podría superar la turbulencia en columna de agua en ciertas horas del día, como lo describe (Bandin (1994), quien además descarta a la luz como factor participante en la migración vertical diaria.

Garavelli et al. (2014) investigaron la dispersión larval de *Concholepas concholepas* (“loco”), sin implementar un algoritmo de migración vertical, pero discutiendo que este comportamiento expondría a las larvas a diferentes direcciones e intensidades de corrientes.

Sin embargo, dada la complejidad del efecto neto del comportamiento de “loco” sobre el transporte larval, y siendo sus objetivos evaluar patrones de dispersión mayor escala, decidieron no incorporar este factor en su investigación. Para investigaciones futuras en larvas de concha de abanico, se discute la implementación de la migración vertical para la evaluación de la retención larval dentro de bahías o zonas protegidas como sugiere Bandin (1994), además de investigar el comportamiento larval en zonas lejanas a la fuente de larvas.

D’Agostini et al. (2015) investigaron la conectividad de áreas marinas protegidas en arrecifes en la plataforma continental de Brasil usando un IBM (ICHTHYOP) con forzantes del modelo ROMS, y como grupo funcional al género de peces *Mycteroperca*, encontrando alta variabilidad en el transporte larval, correlacionando procesos de advección con el transporte a zonas fuera de la costa. El presente estudio asoció la advección de corrientes con el transporte larval a lo largo de la costa en sentido sur-norte favorecido por corrientes superficiales, mientras que en sentido norte-sur, el transporte sería favorecido por corrientes sub-superficiales; sin embargo, en un futuro, podría evaluarse la mortalidad de larvas de *Argopecten purpuratus* asociada al transporte fuera de la costa. Para catalogar las áreas como fuente y sumidero, D’Agostini et al. (2015) calcularon en cada área el total de reclutamiento (partículas retenidas que no son propias del área), el propio reclutamiento (partículas retenidas que son propias del área) y la contribución al reclutamiento (la cantidad de partículas que un área aporta a un área vecina, éxito de transporte en nuestro caso). De esta manera, identificaron algunas áreas marinas protegidas como fuentes y otras como sumideros. Analizando los porcentajes de retención y éxito de transporte en el presente trabajo, la bahía de Sechura aportó una mayor cantidad de larvas a la isla Lobos de Tierra (0.0149 %), pero con un porcentaje de éxito de transporte bajo, según los puntos de referencia formulados en la Tabla 3, con una baja tasa de retención (0.6213 %) según los

puntos de referencia de la Tabla 4. Por otro lado, la isla Lobos de Tierra mostró un bajo porcentaje de éxito de transporte de larvas a la bahía (0.0066 %) según los puntos de referencia, sin embargo su porcentaje de retención fue medio (2.0358 %). De este modo, usando la tipología de escenarios de la Tabla 5, en vista de que el transporte de Bahía de Sechura a Isla Lobos de Tierra fue bajo, mientras que la retención en la Isla Lobos de Tierra fue media, entonces el Sistema “Bahía Sechura-Isla Lobos de Tierra” podría considerarse como un escenario “Fuente débil - Sumidero Fuerte”.

6. CONCLUSIONES

6.1. SOBRE EL ÉXITO DE TRANSPORTE LARVAL

- ✓ El éxito de transporte de larvas desde la isla Lobos de Tierra hacia la bahía de Sechura fue menor en los meses de primavera-verano y mayor en los meses de invierno (Junio con 0.0500 %), posiblemente debido a la estacionalidad de la corriente costera peruana, lo cual apoya la primera hipótesis planteada.
- ✓ Por otro lado, el éxito de transporte desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra fue nulo en los meses de invierno (desde Mayo hasta Julio), y mayor en primavera-verano (Enero con 0.1000 %; Noviembre con 0.0276 % y Diciembre con 0.0022 %), igualmente en concordancia con la estacionalidad de la corriente costera peruana.
- ✓ El éxito de transporte de larvas fue significativamente mayor ($p < 0.001$) desde la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra (0.0149 %), que desde la isla hacia la bahía (0.0066 %).
- ✓ En el transporte de larvas desde la bahía hacia la isla, la mayor contribución a la varianza es explicada por la interacción del mes de desove y la profundidad de desove (31.23 %), seguida mes de desove (24.60 %) y la profundidad de desove (9.22 %), por la ocurrencia de máximos de transporte en algunos meses, y al mayor transporte a mayores profundidades de desove.
- ✓ En el transporte de larvas desde la isla hacia la bahía, la mayor contribución a la varianza del éxito de transporte fue explicada por la interacción del mes de desove y la edad mínima de reclutamiento (19.89 %), seguida de la interacción del mes de desove y la profundidad de desove (18.65 %), por la ocurrencia de máximos de transporte en algunos meses, y al mayor transporte a mayores profundidades de desove.

- ✓ El transporte larval desde la isla hacia la bahía está asociado a la Corriente Costera Peruana (CCP), en contraste, el transporte desde la bahía hacia la isla está asociado a la Corriente Sub-superficial Peruano Chilena (CSSPCH).

6.2. SOBRE LA RETENCIÓN LARVAL

- ✓ La retención larval en la isla Lobos de Tierra no presentó ningún patrón estacional, tuvo valores similares en las diferentes estaciones del año, mientras que en la bahía de Sechura, la retención larval sólo tuvo un pico en el mes de verano, lo cual no apoya la segunda hipótesis planteada.
- ✓ En la isla Lobos de Tierra la retención (2.0358 %) fue significativamente mayor ($p < 0.001$), que en la bahía de Sechura (0.6213 %), pero sin distinguirse ningún patrón estacional.
- ✓ En la bahía de Sechura la mayor contribución a la varianza de la retención fue explicada por la interacción del mes de desove y la profundidad de desove (24.68 %), seguida de la interacción del mes de desove y la edad mínima de reclutamiento (18.56 %), por la ocurrencia de máximos de transporte en algunos meses, y al mayor transporte a mayores profundidades de desove. Otros factores que contribuyeron significativamente a la varianza fueron: el mes de desove (14.39 %), la edad mínima de reclutamiento (4.53 %) y la profundidad de desove (3.24 %).
- ✓ En la isla Lobos de Tierra la mayor contribución a la varianza de la retención fue explicada por el mes de desove (22.62 %), seguida de la profundidad de desove (20.35 %) y la interacción del mes de desove y la profundidad de desove (19.22 %), por la ocurrencia de máximos de transporte en algunos meses, y al mayor transporte a mayores profundidades de

desove. Otro factor que contribuyó significativamente a la varianza fue la edad mínima de reclutamiento (10.78 %).

- ✓ De acuerdo a los porcentajes de retención larval y transporte larval, se puede considerar al sistema “Sechura-Lobos de Tierra” como un sistema “fuente débil - sumidero fuerte”

7. RECOMENDACIONES

En vista de que el éxito de transporte de larvas fue mayor de la bahía de Sechura hacia la isla Lobos de Tierra, sería recomendable contar con bancos permanentes y saludables en la bahía de Sechura, como lo estipula la delimitación de bancos naturales propuesta por IMARPE (PRODUCE 2009).

Se recomienda realizar estudios de monitoreo de larvas para validar las trayectorias simuladas con el modelo. También son necesarios estudios de migración vertical de larvas desde su fase velígera hasta disconcha, y estimar su velocidad vertical, además de la evaluación del comportamiento vertical fuera de las fuentes de larvas. También se recomienda realizar estudios para establecer rangos de tolerancia larval frente a la temperatura, salinidad y oxígeno, para determinar los límites superior e inferior de sobrevivencia de larvas de *Argopecten purpuratus*.

Se sugiere usar modelos anidados para simular la circulación y la biogeoquímica a una alta resolución espacial, para investigar el transporte de larvas dentro de la bahía y proponer zonas óptimas de captación de larvas.

Finalmente, se debe desarrollar un modelo más complejo que acople el modelo de transporte de larvas (ICHTHYOP) con un modelo de balance energético dinámico (DEB), forzados por campos de temperatura, oxígeno y clorofila.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aiken CM, Navarrete SA, Castillo MI, Castilla JC. Along-shore larval dispersal kernels in a numerical ocean model of the central Chilean coast. *Mar Ecol Prog Ser*. 2007;339:13–24.
- Albert A, Echevin V, Lévy M, Aumont O. Impact of nearshore wind stress curl on coastal circulation and primary productivity in the Peru upwelling system. *J Geophys Res Ocean*. 2010;115(12):1–13.
- Alfaro C, Gil P, Mendo J. Consumo de concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) por el pulpo de Gould (*Octopus mimus*) en relación a la talla y el sexo en la Bahía de Sechura. *Libr. Resúmenes del Semin. 'Bases científicas y tecnológicas para incrementar la Product. del Cultiv. conch. Piura*; 2011.
- Avendaño M, Cantillán M, Le Pennec M, Lodeiros C, Freitas L. Cultivo de pectínidos iberoamericanos en suspensión. In: *Los Moluscos Pectínidos de Iberoamérica: Ciencia y Acuicultura*. 2001a. p. 1–20.
- Avendaño M, Le Pennec M, Cantillán M. Anormalidades en larvas de *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819) (Mollusca:Pectinidae), uno de los problemas en la producción artificial de semilla. *Estud Ocean*. 2001b;20:33–42.
- Bandín R. Bandín R. Abundancia y distribución vertical de larvas de concha de abanico (*Argopecten purpuratus* Lamarck) y su relación con parámetros ambientales en El Queso, bahía Independencia, Pisco. *Universidad Nacional Agraria La Molina*; 1994.
- Bandín R, Mendo J. Asentamiento larval de la concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) en colectores artificiales en la Bahía Independencia, Pisco, Perú. *Investig Mar*. 1999;27:3–13.
- Barber BJ, Blake NJ. Reproductive Physiology. In: Shumway S, Parsons J, editors. *Scallops: Biology, Ecology, Aquaculture, and Fisheries*. 2006. p. 357–416.
- Boehlert G, Mundy B. Ichthyoplankton assemblages at seamounts and oceanic islands. *Bull Mar Sci*. 1993;53(2):336–61.
- Borgne RL, Dandonneau Y, Lemasson L. The problem of the island mass effect on chlorophyll and zooplankton standing crops around Mare (Loyalty Islands) and New Caledonia. *Bull Mar Sci*. 1985;37(2):450–9.
- Brochier E, Echevin V, Tam J, Chaigneau A. Climate change scenarios experiments predict a future reduction in small pelagic fish recruitment in the Humboldt Current system. 2013;1841–53.
- Brochier E, Ramzi A, Lett C, Machu E, Berraho A, Fre P. Modelling sardine and anchovy ichthyoplankton transport in the Canary Current System. 2008a;30.

- Brochier T, Colas F, Lett C, Echevin V, Cubillos LA, Tam J, et al. Small pelagic fish reproductive strategies in upwelling systems : A natal homing evolutionary model to study environmental constraints. *Prog Oceanogr* [Internet]. 2009;83(1–4):261–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.044>
- Brochier T, Lett C, Fréon P. Investigating the “northern Humboldt paradox” from model comparisons of small pelagic fish reproductive strategies in eastern boundary upwelling ecosystems. *Fish Fish*. 2011a;12:94–109.
- Brochier T, Lett C, Tam J, Fréon P, Colas F, Ayón P. An individual-based model study of anchovy early life history in the northern Humboldt Current system. *Prog Oceanogr* [Internet]. 2008b;79(2–4):313–25. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.004>
- Brochier T, Mason E, Moyano M, Berraho A, Colas F, Sangrà P, et al. Ichthyoplankton transport from the African coast to the Canary Islands. *J Mar Syst* [Internet]. 2011b;87(2):109–22. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.02.025>
- Butler IV MJ, Paris CB, Goldstein JS, Matsuda H, Cowen RK. Behavior constrains the dispersal of long-lived spiny lobster larvae. *Mar Ecol Prog Ser*. 2011;422(Clarke 1933):223–37.
- Carbajal W, Taipe A, De la Cruz J, Castro J, Ramírez P, Galán J, et al. Delimitación y prospección de los bancos naturales de concha de abanico, pulpo y percebes en la isla Lobos de Tierra (7-14 de Marzo 2003). *IMARPE*. 2003;36.
- Chaigneau A, Dominguez N, Eldin G, Vasquez L, Flores R, Grados C, et al. Near-coastal circulation in the Northern Humboldt Current System from shipboard ADCP data. *J Geophys Res Ocean*. 2013;118(10):5251–66.
- Chavez G, Ishiyama V. Reproduccion en *Argopecten purpuratus* en la bahia de independencia (Pisco-Peru). *Memorias del Simp Int Recur vivos y las Pesq en el Pacifico Sudeste Rev Pacifico Sur*. 1988;295–300.
- Coan E, Valentich Scott P. Bivalve Seashells of Tropical West America: Marine Bivalve Mollusks from Baja California to Northern Peru. *Nat Hist Monogr*. 2012;(6):1258.
- Colas F, McWilliams JC, Capet X, Kurian J. Heat balance and eddies in the Peru-Chile current system. *Clim Dyn*. 2012;39(1–2):509–29.
- Courant R, Friedrichs K, Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics. *Math Ann*. 1967;(March):215–34.
- Cowen R, Sponaugle S. Larval Dispersal and Marine Population Connectivity. *Annu Rev Mar Sci* [Internet]. 2009;1:443–66. Available from: www.annualreviews.org
- Cragg SM. Swimming behaviour of the larvae of *Pecten maximus* (L.) (Bivalvia). *J Mar Biol Assoc United Kingdom* [Internet]. 1980;60:551–64. Available from:

http://www.journals.cambridge.org/abstract_S002531540004025X

- Cragg SM. Development, physiology, behaviour and ecology of scallop larvae. In: Shumway S, Parsons J, editors. *Scallops: Biology, Ecology, Aquaculture, and Fisheries*. 2006. p. 45–122.
- Cumming G, Fidler F, Vaux DL. Error bars in experimental biology. *J Cell Biol*. 2007;177(1):7–11.
- D'Agostini A, Francisco D, Gherardi M, Pezzi LP. Connectivity of Marine Protected Areas Using Biophysical Modelling. An XVII Simpósio Bras Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Bras 25 a 29 abril 2015, INPE Connect. 2015;4628–35.
- Disalvo LH, Alarcon E, Martinez E, Uribe E. Progress in mass culture of *Chlamys* (*Argopecten*) *purpurata* Lamarck (1819) with notes on its natural history. *Rev Chil Hist Nat*. 1984;57:35–45.
- Garavelli L, Kaplan DM, Colas F, Stotz W, Yannicelli B, Lett C. Identifying appropriate spatial scales for marine conservation and management using a larval dispersal model: The case of *Concholepas concholepas* (loco) in Chile. *Prog Oceanogr* [Internet]. 2014;124:42–53. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2014.03.011>
- Gobierno de Lambayeque R, Gobierno de Piura R. Plan de manejo integral biregional de la isla Lobos de Tierra. Lambayeque - Piura; 2004.
- González R. Auge y crisis : La pesquería de la concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) en la región Pisco-Paracas, costa sur del Perú. *Espac y Desarro*. 2010;22:25–51.
- Gosling E. *Bivalve Molluscs: Biology, Ecology*. Wiley-Blackwell. 2003.
- Grimm V, Berger U, Bastiansen F, Eliassen S, Ginot V, Giske J, et al. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecol Modell*. 2006;198(1–2):115–26.
- Grimm V, Berger U, DeAngelis DL, Polhill JG, Giske J, Railsback SF. The ODD protocol: A review and first update. *Ecol Modell* [Internet]. 2010;221(23):2760–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019>
- Grimm V, Railsback S. *Individual-based Modeling and Ecology*. Princeton; 2004.
- Hanski I, Gaggiotti OE. *Ecology, genetics, and evolution of metapopulations* [Internet]. Recherche. 2004. Available from: <http://www.lavoisier.fr/livre/notice.asp?id=OR3W23A2KKSOWB>
- Hoyer AB, Wittmann ME, Chandra S, Schladow SG, Rueda FJ. A 3D individual-based aquatic transport model for the assessment of the potential dispersal of planktonic larvae of an invasive bivalve. *J Environ Manage* [Internet]. 2014;145:330–40. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.011>

- Huston M, DeAngelis D, Post W. New computer models unify ecological theory. *Bioscience* [Internet]. 1988;38(10):682–91. Available from: <http://www.jstor.org/stable/1310870>
- Illanes J. Situación actual del cultivo del ostión (*Chlamys* (*Argopecten*) *purpurata*) y ostra (*Crassostrea gigas*) en el norte de Chile. *Esc Ciencias del Mar, Valparaiso*. 1986;305–14.
- IMARPE. Estudio de línea base del ámbito marino de la bahía de Sechura (14 - 28 Enero 2007). Piura; 2007.
- IMARPE. Acondicionamiento de reproductores y obtención de semillas de concha de abanico *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819), en un sistema controlado experimental en el puerto de Ilo. Ilo; 2008.
- Kaplan DM, Planes S, Fauvelot C, Brochier T, Lett C, Bodin N, et al. New tools for the spatial management of living marine resources. *Curr Opin Environ Sustain*. 2010;2(1–2):88–93.
- Kawecki T. Ecological and evolutionary consequences of source-sink population dynamics. In 2004. p. 387–414.
- Lett C, Nguyen-Huu T, Cuif M, Saenz-Agudelo P, Kaplan DM. Linking local retention, self-recruitment, and persistence in marine metapopulations. *Ecology*. 2015;96(8):2236–44.
- Lett C, Verley P, Mullon C, Parada C, Brochier T, Penven P, et al. A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics. *Environ Model Softw*. 2008;23(9):1210–4.
- Lipcius RN, Stockhausen WT, Eggleston DB, Jr LSM, Hickey B. Hydrodynamic decoupling of recruitment, habitat quality and adult abundance in the Caribbean spiny lobster: source–sink dynamics? *Mar Freshw Res*. 1997;48:807.
- Marincovich L. Intertidal mollusks of Iquique, Chile. Los Angeles; 1973.
- Mbaye BC, Brochier T, Echevin V, Lazar A, Lévy M, Mason E, et al. Do *Sardinella aurita* spawning seasons match local retention patterns in the Senegalese-Mauritanian upwelling region? *Fish Oceanogr*. 2015;24(1):69–89.
- Mendo J. Asistencia técnica para la evaluación del potencial de stocks de conchas de abanico. Lima; 2009.
- Mendo J, Wolff M. El impacto de el Niño sobre la producción de concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) en la bahía Independencia, Pisco, Perú. *Ecol Apl*. 2003;2(1):51–7.
- Mendo J, Wolff M, Carbajal W, Gonzáles I, Badjeck M. Manejo y explotación de los principales bancos naturales de concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) en la costa

- Peruana. Cultivo y manejo de moluscos bivalvos en América Latina. 2008.
- Mendo J, Wolff M, Mendo T, Ysla L. Scallop Fishery and Culture in Peru. In: Shumway S, Parsons J, editors. *Scallops: Biology, Ecology, Aquaculture, and Fisheries*. Third Edit. 2016. p. 1089–109.
- Montes I, Colas F, Capet X, Schneider W. On the pathways of the equatorial subsurface currents in the eastern equatorial Pacific and their contributions to the Peru-Chile Undercurrent. *J Geophys Res Ocean*. 2010;115(9):1–16.
- Morón O, Velazco F, Beltran L. Características hidrográficas y sedimentológicas de la Bahía de Sechura. *Inst del Mar del Perú - Inf*. 2013;40(3–4):150–9.
- Mottet MG. A review of the fishery biology and culture of scallops. Washington; 1979.
- Palacios DM. Factors influencing the island-mass effect of the Galápagos Archipelago. *Geophys Res Lett*. 2002;29(2):1–4.
- Paris CB, Cowen RK. Direct evidence of a biophysical retention mechanism for coral reef fish larvae. *Limnol Oceanogr*. 2004;49(6):1964–79.
- Peliz A, Marchesiello P, Dubert J, Marta-Almeida M, Roy C, Queiroga H. A study of crab larvae dispersal on the Western Iberian Shelf: Physical processes. *J Mar Syst*. 2007;68(1–2):215–36.
- Penven P, Echevin V, Pasapera J, Colas F, Tam J. Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics of the Peru Current System: A modeling approach. *J Geophys Res C Ocean*. 2005;110(10):1–21.
- Pineda J. Linking larval settlement to larval transport: Assumptions, potentials, and pitfalls. *Oceanogr East Pacific*. 2000;1:84–105.
- Pineda J, Hare J, Sponaugle S. Larval Transport and Dispersal in the Coastal Ocean and Consequences for Population Connectivity. *Oceanography*. 2007;20(3):22–39.
- Pulliam DW. Sources, Sinks, and Population Regulation. Vol. 132, *American Society of Naturalists*. 1998. p. 652–61.
- Risien CM, Chelton DB. A Global Climatology of Surface Wind and Wind Stress Fields from Eight Years of QuikSCAT Scatterometer Data. *J Phys Oceanogr [Internet]*. 2008;38(11):2379–413. Available from: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2008JPO3881.1>
- Rouillon G, Guerra-Rivas J, Ochoa N, Navarro E, Rivas JG, Ochoa N, et al. Phytoplankton composition of the stomach contents of the mussel *Mytilus edulis* L. from two populations: Comparison with its food supply. *J Shellfish Res*. 2005;24(1):5–14.
- Ruidías M. Islas norteñas fascinantes y enigmáticas Lobos de Tierra y Lobos de Afuera.

- Bitácora Hidrográfica. 2009;38–9.
- Scheffer M, Baveco JM, Deangelis DL, Rose KA, Vannes EH. Super-individuals a simple solution for modeling large populations on an individual basis. *Ecol Modell.* 1995;80(2–3):161–70.
- Scheltema R. On dispersal and planktonic larvae of benthic invertebrates: an eclectic overview and summary of problems. *Bull Mar Sci.* 1986;39(2):290–322.
- Schultz ET, Cowen RK. Recruitment of coral-reef fishes to Bermuda - Local retention or long-distance transport. *Mar Ecol Prog Ser.* 1994;109(1):15–28.
- Shchepetkin AF, McWilliams JC. The regional oceanic modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Model.* 2005;9(4):347–404.
- Shchepetkin AF, McWilliams JC. Correction and commentary for “Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the regional ocean modeling system” by Haidvogel et al., *J. Comp. Phys.* 227, pp. 3595–3624. *J Comput Phys [Internet].* 2009;228(24):8985–9000. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcp.2009.09.002>
- Stotz W. When aquaculture restores and replaces an overfished stock: Is the conservation of the Species assured? The case of the scallop *Argopecten purpuratus* in Northern Chile. *Aquac Int [Internet].* 2000;8(2):237–47. Available from: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1009215119051>
- Takahashi D, Mendo J. Efecto de la talla en la predación del «caracol» *Thais* (*Stramonita*) *chocolata* sobre la concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) en bahía Independencia. *Pisco*; 2002. p. 28–31.
- Tapia C, Dupre E, Bellolio G. Descripción del comportamiento de asentamiento larval de pediveligeras de *Argopecten purpuratus* Lamarck, 1819. *Rev Biol Mar Valparaíso.* 1993;28(1):75–84.
- Tarazona J, Arntz W. The Peruvian Coastal Upwelling System. *Ecol Stud.* 2001;144:229–44.
- Taylor M, Wolff M, Vadas F, Yamashiro C. Trophic and environmental drivers of the sechura bay ecosystem (Peru) over an ENSO cycle. *Helgol Mar Res.* 2008;62(2 SUPPL.1):15–32.
- Tettelbach ST, Rhodes EW. Combined effects of temperature and salinity on embryos and larvae of the northern bay scallop *Argopecten irradians irradians*. *Mar Biol.* 1981;63(3):249–56.
- Tremblay MJ, Loder J, Werner F, Naimie C, Page F, Sinclair MM. Drift of sea scallop larvae *Placopecten magellanicus* on Georges Bank: a model study of the roles of mean

- advection, larval behavior and larval origin. *Deep Reseach*. 1994;41(1):7–49.
- Tremblay MJ, Sinclair MM. The Vertical and Horizontal Distribution of Sea Scallop (*Placopecten magellanicus*) Larvae in the Bay of Fundy in 1984 and 1985. *J Northw Atl Fish Sci*. 1988;8:43–53.
- Wolff M. Population dynamics of the Peruvian scalop *Argopecten purpuratus* during the El Niño Phenomenon of 1983. *Can J Fish Aquat Sci*. 1987;44:1684–91.
- Wolff M. Spawning and recruitment in the Peruvian scallop *Argopecten purpuratus*. *Mar Ecol Prog Ser*. 1988;42:213–7.
- Wolff M, Mendo J. Management of the Peruvian bay scallop (*Argopecten purpuratus*) metapopulation with regard to environmental change. *Aquat Conserv Mar Freshw Ecosyst*. 2000;10:117–26.
- Wolff M, Taylor M, Mendo J, Yamashiro C. A catch forecast model for the Peruvian scallop (*Argopecten purpuratus*) based on estimators of spawning stock and settlement rate. *Ecol Modell*. 2007;209(2–4):333–41.
- Ysla L. Estudio de la variabilidad genética en poblaciones de *Argopecten purpuratus* de Chile y Perú. *An Científicos UNAML*. 2009;70:60–5.