Nº 24 / 2005

**INFORME FINAL** 

# "ANÁLISIS INTEGRADO HISTÓRICO AMBIENTE – RECURSOS, I – II REGIONES"

# PROYECTO FIP N° 2003 – 33

Valparaíso, Junio de 2005



Título:	"Análisis Integrado Histórico Ambiente – Recursos, I – II Regiones" Proyecto FIP N° 2003 - 33
Requirente:	Fondo de Investigación Pesquera
Contraparte: Subcontrato:	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso Universidad de Concepción
Unidad Ejecutora:	Escuela de Ciencias del Mar Av. Altamirano 1480 Casilla 1020 Valparaíso
Investigador	•
Responsable:	Dr. Eleuterio Yáñez Rodríguez Escuela de Ciencias del Mar Pontificia Universidad Católica de Valparaíso Fono : 56 – 32 – 274250 Fax : 56 – 32 – 274208
	E-mail: eyanez@ucv.cl

### **EQUIPO DE TRABAJO**

#### JEFE DE PROYECTO

Eleuterio Yáñez Rodríguez

#### AUTORES

### PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO

Eleuterio Yáñez - Biología y Oceanografía Pesquera Claudio Silva - Oceanografía Satelital y Pesquerías Alejandra Órdenes - Biología Pesquera Fabián Gómez - Biología Pesquera Alexander Valdenegro - Oceanografía Física Nelson Silva – Oceanografía Química

#### UNIVERSIDAD DE CONCEPCION

Samuel Hormazábal - Oceanografía Bio-Física Satelital Aldo Montecinos - Oceanografía Física Luis Cubillos - Biología Pesquera Fernando Espíndola - Biología Pesquera Oscar Pizarro - Oceanografía Física

### CONSULTOR INDEPENDIENTE

José Raúl Cañón Canales-Oceanografía

Distribución de ejemplares:

5	Fondo de Investigación Pesquera
---	---------------------------------

1 Dirección Escuela de Ciencias del Mar - UCV

1 Investigador responsable

Solicitud de datos ambientales, biológicos, pesqueros al FIP . Carta ECM/ 2004.

Autoriza entrega de información FIP. Carta FIP.

Entrega de información solicitada por parte del FIP.

Solicitud de datos biológicos, pesqueros a SubPesca. Carta ECM / 2004.

Autoriza entrega de información SubPesca. Carta SubPesca.

Entrega de información solicitada por parte de SubPesca.

Solicitud de datos cruceros oceanográficos a SHOA-CENDOC. Carta ECM / 2004.

Autoriza entrega de información SubPesca. Carta SHOA-CENDOC.

Entrega de información solicitada por parte de SHOA-CENDOC.

Taller de trabajo 1 en UDEC

Taller de trabajo 2 en PUCV

Taller de trabajo 3 en UDEC

Taller de trabajo 4 en PUCV

Taller de trabajo 5 en PUCV

Taller de difusión y discusión de resultados en auditórium de IFOP.

# **INDICE GENERAL**

RESUMEN EJECUTIVO	
1. INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVO ESPECÍFICOS	4
2. ANTECEDENTES	5
2.1. Antecedentes generales	5
2.2. Antecedentes específicos	8
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO	12
3.1. Zona de estudio	12
3.2. Base de datos	13
3.2.1. Datos ambientales	13
3.2.2. Datos biológicos	15
3.2.3. Datos pesqueros	16
3.3. Objetivo específico 1	17
3.3.1. Fluctuaciones temporales y espaciales de variables ambientales	17
3.3.2. Fluctuaciones temporales y espaciales de variables bio-pesqueras	19
3.3.3. Relaciones entre la variabilidad ambiental y los recursos pesqueros	20
3.3.3.1. Modelos de excedentes producción incluyendo variables ambientales	21
3.3.3.2. Modelos aditivos generalizados (MAG)	21
3.3.3.3. Modelos lineales generalizados (MLG)	22
3.3.3.4. Funciones ortogonales empíricas (FOE)	22
3.3.3.5. Análisis espectral de Fourier	
3.3.3.6. Correlaciones cruzadas	
3.3.3.7. Análisis de wavelets	
3.4. Objetivo específico 2	
3.5. Objetivo específico 3	27
3.5.1. Variabilidad del reclutamiento, densidad-dependencia, densidad-indepen	ndencia y
procesos estocásticos	27
3.5.2. Predicción del reclutamiento utilizando relaciones funcionales	ambiente-
reclutamiento	31
3.5.3. Caracterización espacio-temporal del reclutamiento	33
3.5.4. Análisis de sincronía de tres poblaciones de anchoveta	34
3.6. Objetivo específico 4	36
3.7. Objetivo específico 5	39
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1. Descripción y análisis de la dinámica del ambiente oceánico y su relaci	ón con la
abundancia de los recursos pelágicos y/o de sus estadios tempranos de desarrollo	en la zona
norte de Chile (objetivo específico 1)	44
4.1.1. Fluctuaciones temporales de variables bio-pesqueras y ambientales	44
4.1.1.1. Fluctuaciones temporales de variables bio-pesqueras	45
4.1.1.2. Fluctuaciones temporales de variables ambientales	54
4.1.1.3. Relaciones entre variables bio-pesqueras y ambientales	60
4.1.2. Fluctuaciones espacio-temporales de variables bio-pesqueras y ambientales	68
4.1.2.1. Fluctuaciones espacio-temporales de variables bio-pesqueras	68

4.1.2.2. Fluctuaciones espacio-temporales de variables ambientales	79
4.1.2.3. Relaciones entre variables bio-pesqueras y ambientales	92
4.2. Caracterizar los patrones espacio-temporales del reclutamiento de los	s recursos
pelágicos en relación con los parámetros del hábitat que han definido su éxito	o fracaso
(Objetivo específico 3)	110
4.2.1. Índices de abundancia	110
4.2.2. Modelos de dinámica poblacional	112
4.2.3. Modelos de reclutamiento	112
4.2.4. Sobrevivencia densidad-dependiente	114
4.2.5. Análisis de sincronía de tres stock de anchoveta	116
4.3. Desarrollar un modelo conceptual explicativo que permita integrar la varial	bilidad del
ambiente marino y la dinámica de poblaciones de recursos pelágicos de la zon	a norte de
Chile (Objetivo específico 4)	121
4.3.1. Antecedentes bibliográficos	124
4.3.2. Modelo conceptual	124
4.4. Identificar variables proxies en el medio ambiente marino y biológico para la	i detección
temprana de posibles cambios en el ecosistema debido a fluctuaciones an	mbientales
(Objetivo específico 2)	132
4.4.1. Antecedentes bibliográficos	132
4.4.2. Identificación de variables proxies	133
4.5. Diseñar indicadores que integren las componentes oceanográficas, bio	ológicas y
pesqueras orientadas a apoyar la toma de decisiones de administración pesqu	era de los
recursos pelágicos en la zona norte de Chile (Objetivo específico 5)	141
4.5.1. Antecedentes bibliográficos	141
4.5.2. Diseño de indicadores ecosistémicos	142
4.5.2.1. SRDS para las pesquerías pelágicas de la zona norte de Chile	143
4.4.2.2. Indicadores ecosistémicos en la escala interdecadal	145
4.4.2.3. Indicadores ecosistémicos en la escala interanual	149
4.4.2.4. Indicadores ecosistémicos en la escala estacional	152
5. CONCLUSIONES	155
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	164
ANEXOS	

### LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Área de estudio (en el cuadro azul) y batimetría (en colores).
- Figura 2. Modelo conceptual sobre cambios en el ecosistema de California asociados a eventos El Niño y en condiciones normales (Chávez *et al.*, 2002).
- **Figura 3.** Modelo conceptual sobre la variabilidad de indicadores ecosistémicos y cambios de régimen en una escala de largo plazo o multidecadal (Chavez *et al.*, 2003).
- Figura 4. Desembarques anuales de a) anchoveta y b) sardina en Perú y norte de Chile (1950-2002). Las flechas indican eventos El Niño, los números la intensidad y los signos de interrogación grandes cambios en las pesquerías.
- Figura 5. Desembarques anuales de a) anchoveta, b) sardina y c) jurel en el norte de Chile (1951-2002).
- Figura 6. Desembarques mensuales de a) anchoveta, b) sardina y c) jurel en el norte de Chile, suavizados con un promedio móvil de 12 meses centrados.
- **Figura 7**. CPUE anual de anchoveta en 1987-2002: CPUE1 (t/vcp) estandarizada con MLG; CPUE2 (t/vcp) estandarizada con el método de Robson; y CPUE3 (t/m<sup>3</sup>) estandarizada con la capacidad de bodega (m<sup>3</sup>).
- Figura 8. CPUE mensuales de anchoveta en 1963-76 (Yáñez, 1989), suavizadas con un promedio móvil de 12 meses centrados.
- Figura 9. CPUE mensuales en 1973-2002 de a) anchoveta (referida a barcos de 290-390 m<sup>3</sup>), b) sardina (referida a barcos de 290-390 m<sup>3</sup>) y c) jurel (referida a barcos de 240-400 m<sup>3</sup>) en el norte de Chile, suavizadas con un promedio móvil de 12 meses centrados.
- **Figura 10**. Biomasa estimada por APV y CPUE estándar de a) anchoveta (1984-2002) y b) sardina (1974-2002).
- Figura 11. Esfuerzo de pesca en viajes con pesca estándar (VCPE) de a) anchoveta (1973-2002) y b) sardina (1976-2002), suavizados con un promedio de 12 meses.
- Figura 12. Relación entre la CPUE y la biomasa de anchoveta estimada por el método de producción de huevos (BMPH) (escalados a un máximo de 1). CPUE 1: ton/vt (MLG; GTE IMARPE-IFOP, 2004); CPUE 2: ton/vcp (MLG); CPUE 3: ton/vcp (Robson); CPUE 4: ton/CB.
- **Figura 13**. Estacionalidad de la CPUE y del desembarque de anchoveta, sardina y jurel. Los periodos seleccionando no consideran vedas extractivas.
- Figura 14. Espectros Wavelet de las series mensuales normalizadas del desembarque de anchoveta (panel superior) en el periodo 1963-2002 y de la CPUE de anchoveta

(panel inferior) en el periodo 1973-2002. Las líneas horizontales segmentadas corresponden a 2, 4, 8, 16, 32 y 64 años. La línea negra continua y curvada, en la derecha e izquierda de cada panel, indica el cono de influencia de cada serie. Los tonos rojos (azules) indican mayor (menor) varianza.

- Figura 15. Análisis de correlación y diagramas de dispersión entre las series anuales de variables bio-pesqueras: DESANC = desembarque de anchoveta (1950-2002); DESSAR = desembarque de sardina (1950-2002); DESJUR = desembarque de jurel (1950-2002); CPUANC = CPUE de anchoveta (1957-2002); CPUSAR = CPUE de sardina (1973-2002); CPUJUR = CPUE de jurel (1973-2002); BANC = biomasa de anchoveta (1984-2002); RANC = reclutamiento de anchoveta (1984-2002); y BSAR = biomasa de anchoveta (1974-2002).
- Figura 16. Variación mensual de: a) índice de turbulencia (IT); b) transporte de Ekman (TE); c) temperatura superficial del mar (TSM); d) temperatura del aire (TA); y e) nivel medio del mar (NMM) (estimada con datos de estaciones costeras de Antofagasta).
- Figura 17. Anomalías mensuales de variables ambientales medidas en estaciones costeras de Antofagasta en el periodo 1950-2002. En rojo los promedios móviles de 13 meses centrados.
- Figura 18. Anomalías mensuales de los índices ambientales IOS, PDO, Niño 1+2 y Niño3.4 en el periodo 1950-2002. En rojo los promedios móviles de 13 meses centrados.
- **Figura 19**. Espectros de Wavelet de las series mensuales normalizadas del IOS (panel superior), del CTI (panel central-superior), del Teq (panel central-inferior) y de la TA en Antofagasta (panel inferior), en el período 1919-2002. Las líneas horizontales segmentadas corresponden a 2, 4, 8, 16, 32 y 64 años. La línea negra continua y curvada, en la derecha e izquierda de cada panel indica el cono de influencia de cada serie. Los tonos rojos (azules) indican mayor (menor) varianza.
- Figura 20. Variabilidad interdecadal de la TA en Antofagasta comparada con el IOS (panel superior), Teq (panel central) y CTI (panel inferior). A las series anuales se les extrajo la tendencia lineal del periodo y se filtraron con un promedio móvil de 5 años pasado dos veces.
- Figura 21. Espectro de Wavelet de las series mensuales normalizadas de la TA (panel superior), la TSM (panel central-superior), el NMM (panel central-inferior) y el TE (panel inferior), en el período 1950-2002. Las líneas horizontales segmentadas corresponden a 2, 4, 8, 16, 32 y 64 años. La línea negra continua y curvada, en la derecha e izquierda de cada panel indica el cono de influencia de cada serie. Los tonos rojos (azules) indican mayor (menor) varianza.
- **Figura 22**. Variabilidad interdecadal de la TA y la TSM en Antofagasta (panel superior), del NMM en Antofagasta y de la Zb (panel central), y del TE y el IT en Antofagasta (panel inferior). A las series anuales se les extrajo la tendencia lineal del periodo y se filtraron con un promedio móvil de 5 años pasado dos veces.

- Figura 23 . Ciclo estacional del desembarque de anchoveta y profundidad de la capa de mezcla (PCM) frente a Antofagasta, obtenida a partir del criterio 0,5°C. La PCM es estimada a partir de data histórica de cruceros oceanográficos.
- **Figura 24.** Desembarque de sardina en función del esfuerzo de pesca y del transporte de Ekman en el norte de Chile (1973-2002).
- **Figura 25**. CPUE de sardina en función del esfuerzo de pesca y del transporte de Ekman en el norte de Chile (1973-2002).
- **Figura 26**. Esfuerzo de pesca de sardina (1973-2002) y turbulencia (1950-2002) en función del transporte de Ekman en el norte de Chile.
- **Figura 27**. Reclutamiento de anchoveta en función de la biomasa y del transporte de Ekman en el norte de Chile (1984-2002).
- Figura 28. Biomasa de anchoveta y esfuerzo de pesca en función del transporte de Ekman en el norte de Chile (1984-2002).
- Figura 29. Desembarque de anchoveta en función del esfuerzo de pesca en el norte de Chile (1957-2002).
- **Figura 30**. EOF de series de tiempo: captura, esfuerzo, transporte de Ekman y turbulencia para anchoveta (arriba); y reclutamiento, biomasa, TSM y transporte de Ekman para sardina (abajo).
- Figura 31. Fase temporal de la primera componente principal compleja (panel superior) de las series suavizadas y normalizadas (por la desviación estándar) del desembarque de anchoveta y sardina, TSM, NMM, Zb, TA, TE e IT en el periodo 1960-98. Los paneles inferiores muestran la comparación entre las series observadas (línea azulsólida) y las reconstruidas a partir de primer modo complejo (línea rojasegmentada). Ambas se muestran como anomalías normalizadas.
- Figura 32. Desembarques anuales (en millones de toneladas) de anchoveta y sardina en el norte de Chile (panel superior). Las líneas finas indican lo valores anuales, mientras que las líneas gruesas indican las series filtradas con un promedio móvil de 5 años pasado dos veces. En el panel inferior se muestra el diagrama de las series suavizadas de anchoveta y sardina entre 1968 y 1998.
- Figura 33. Primera componente principal (panel superior) de las series suavizadas y normalizadas (por la desviación estándar) de TSM, NMM, Zb y TA en el periodo 1960-98. En el panel inferior se muestra el primer vector propio como la correlación de la primera componente principal y las series respectivas.
- Figura 34. Primera componente principal (panel superior) y segunda componente principal (panel central) de las series suavizadas y normalizadas (por la desviación estándar) del índice ambiental (ver Fig. 32), y los desembarques de anchoveta y sardina en el periodo 1960-98. En el panel inferior se muestra el diagrama de dispersión entre el primer y segundo vector propio, como la correlación de las respectivas componentes principales y las series respectivas.

- Figura 35. Esfuerzos anuales de pesca de anchoveta y sardina (panel superior) y esfuerzo total aplicado a ambas especies (panel inferior).
- Figura 36. Comparación entre la segunda componente principal (línea azul) de las series suavizadas y normalizadas (por la desviación estándar) del índice ambiental (ver Fig. 32), y los desembarques de anchoveta y sardina en el periodo 1960-98 (ver Fig. 33) y el esfuerzo anual total suavizado (línea roja).
- **Figura 37**. Esquema conceptual de la relación entre los desembarques de anchoveta y sardina, y las fluctuaciones del ambiente y el esfuerzo total de pesca en el norte de Chile.
- Figura 38. Cartografías anuales de CPUE de anchoveta y sardina del período 1987-02, con sus respectivos Índices V de Cramer (IVC).
- Figura 39. Área de distribución espacial para a) anchoveta, b) sardina y c) jurel en grados<sup>2</sup>.
- Figura 40. Latitud de los CG anuales de anchoveta, sardina y jurel entre 1987 y 2002.
- Figura 41. Latitud y longitud de los CG anuales de a) anchoveta, b) sardina y c) jurel (1987 y 2002).
- **Figura 42**. Modos espacial y temporal del primer componente principal de la CPUE anual de anchoveta, sardina y jurel.
- Figura 43. Modos espacial y temporal del segundo componente principal de la CPUE anual de anchoveta, sardina y jurel.
- Figura 44. Señal anual de las cartografías de CPUE de a) anchoveta, b) sardina y c) jurel del período 1987-02.
- Figura 45. Gráfico anual y mensual de Sa de anchoveta en la zona norte de Chile.
- **Figura 46**. Cartografía de la Sa de anchoveta en la zona norte de Chile en el periodo 1994-01.
- Figura 47. Sa y CPUE anual de anchoveta en el periodo 1994-01.
- Figura 48. Sa y CPUE diario de anchoveta en septiembre de 1994
- Figura 49. Número de estaciones de muestreo de huevos de anchoveta (a), número promedio de huevos en ET y  $E^+(b)$ .
- Figura 50. Variación anual de la CPUE de anchoveta y el PET. La líneas punteadas señalan tendencia.
- Figura 51. Distribución espacial y temporal de estaciones positivas de huevos de anchoveta en el período 1995–2002.

- **Figura 52**. Distribución espacial y temporal de los huevos de anchoveta, interpolada con kriging, en el período 1995-2002.
- Figura 53. Imágenes promedios anuales de la TSM satelital en la zona norte de Chile (1987-2002).
- Figura 54. TSM satelital promedio del área de estudio (1987-2002).
- **Figura 55**. Latitud/tiempo de las imágenes de la ATSM mensual, centradas 6 mn frente a la costa (1987 2002).
- Figura 56. Latitud/tiempo de las imágenes de la ATSM mensual, centradas 80 mn frente a la costa (1987 2002).
- Figura 57. Modos espacial y temporal de los a) PC1 y b) PC2 de la TSM anual.
- Figura 58. Climatología mensual de las imágenes de TSM satelital de la zona norte de Chile (1987-2002).
- **Figura 59**. Climatología estacional de las imágenes de TSM satelital de la zona norte de Chile (1987-2002).
- **Figura 60**. Estacionalidad de la TSM mensual en la zona costera (6 mn) durante: a) 1987-1994 y b) 1995 2002.
- Figura 61. Localización de los perfiles costero y oceánico.
- **Figura 62**. Hovmoller de las imágenes de TSM semanales centrado 6 mn frente a la costa y en el período 1987 2002.
- **Figura 63**. Hovmoller de las imágenes de GRT semanal centrado 6 mn frente a la costa y en el período 1987 2002.
- **Figura 64**. Hovmoller de las imágenes de TSM semanal centrado 80 mn frente a la costa y en el período 1987 2002.
- **Figura 65**. Hovmoller de las imágenes de ATSM mensual centrado 6 mn frente a la costa y en el período 1987 2002.
- **Figura 66**. Hovmoller o de las imágenes de TSM mensual centrado 6 mn frente a la costa y en el período 1987 2002.
- **Figura 67**. Hovmoller de las imágenes de ATSM mensual centrado 80 mn frente a la costa y en el período 1987 2002.
- **Figura 68**. Hovmoller de las imágenes de TSM mensual centrado 80 mn frente a la costa y en el período 1987 2002.

- Figura 69. Modos espacial y temporal de los componentes a) PC1, b) PC2 y c) PC3 de la ATSM mensual.
- Figura 70. Clorofila satelital promedio para el área de estudio. El promedio se obtuvo con datos satelitales de clorofila con una resolución temporal de un día y una resolución espacial nominal de 9 km, para el periodo enero-junio de 1997 (OCTS) y septiembre de 1997 diciembre de 2003 (SeaWIFS). Los datos diarios grillados fueron interpolados previamente mediante una interpolación en tres dimensiones (latitud, tiempo y espacio), mediante el método de inverso a la distancia.
- Figura 71. Series de tiempo de clorofila satelital diaria correspondiente a la zona costera (entre la costa y 60 km) para la zona de Arica (18-19°S), Iquique (20-21.5°S) y Antofagasta (22.5-24°S).
- **Figura 72**. Series de tiempo de clorofila satelital diaria correspondiente a la zona oceánica (entre 100 y 200 km de la costa) para la zona de Arica (18-19°S), Iquique (20-21.5°S) y Antofagasta (22.5-24°S).
- Figura 73. Espectro de wavelet de las series de tiempo de clorofila satelital diaria correspondiente a la zona costera (a y b) y oceánica (c y d) frente a Iquique y Antofagasta respectivamente. Las líneas horizontales segmentadas indican periodos de 64, 90, 128, 182.5, 365 y 730 días. La línea negra, continua y curvada, en la derecha e izquierda de cada panel, indica el cono de influencia de los extremos de la serie. Las series fueron previamente normalizadas de tal forma de mantener una misma escala de color.
- Figura 74. Distribución superficial de la clorofila\_a satelital, correspondiente al promedio del trimestre enero-marzo, abril-junio, julio-septiembre y octubre–diciembre del periodo 1997-2003.
- Figura 75. Ciclo anual característico de la clorofila\_a satelital (OCTS, SeaWIFS), correspondiente a la serie de tiempo costera (entre la costa y 60 km; línea continua) y oceánica (entre 100 y 200 km de la costa; línea segmentada ) para la zona de Arica (18-19°S), Iquique (20-21.5°S) y Antofagasta (22.5-24°S). El ciclo anual característico fue obtenido mediante el ajuste de los armónicos de 365, 365/2, 365/3 y 365/4 días. La escala del ciclo anual para la zona costera (oceánica) se encuentra a izquierda (derecha).
- Figura 76. Series de tiempo del esfuerzo del viento satelital (ERS1/2 y QuickSCAT), correspondiente al píxel de 1x1 mas cercano a la costa, frente a Arica, Iquique y Antofagasta.
- Figura 77. Espectro de wavelet del esfuerzo del viento satelital (ERS1/2 y QuickSCAT), para el píxel mas cercano a la costa en la zona de Arica (panel superior), Iquique (panel del medio) y Antofagasta (panel inferior). Las líneas horizontales segmentadas indican periodos de 64, 90, 128, 182.5, 365 y 730 días. La línea negra,

continua y curvada, en la derecha e izquierda de cada panel, indica el cono de influencia de los extremos de la serie.

- **Figura 78**. Ciclo anual característico del esfuerzo del viento satelital (ERS1/2 y QuickSCAT), correspondiente a la serie de tiempo del píxel más cercano a la costa en la zona de Arica, Iquique y Antofagasta. El ciclo anual característico fue obtenido mediante el ajuste de los armónicos de 365, 365/2, 365/3 y 365/4 días.
- **Figura 79**. Mapa de la máxima correlación para la banda intraestacional (30-90 días) en el periodo de invierno, obtenida desde la correlación compleja entre las series de tiempo del esfuerzo del viento sobre la superficie del mar frente a Chile (esfuerzo promedio de los datos presentes en la caja limitada entre 28.5°-35.5°S y 70.5-74.5°W) y el esfuerzo del viento sobre el resto del océano Pacifico tropical y Pacifico sur. Solo se presentan resultados significativos sobre un 99% (correlación sobre 0.3), donde la longitud del vector y su dirección dan la magnitud de la correlación y el ángulo de fase. La flecha sobre el sur de Sudamérica entrega la escala de la correlación igual a 1.0 (figura adaptada de Hormazabal *et al.*, 2002).
- **Figura 80**. a) Campo superficial de corrientes geostroficas (flechas negras) y clorofila\_a (en colores) satelital, correspondientes al 16 de mayo del 2003. b) campo superficial de clorofila\_a, c) temperatura superficial del mar, y d) campo superficial de la anomalía geopotencial referida a 500 db, obtenidas durante la campaña de mediciones del FIP 2003-01, realizada en la época de otoño del 2003 (figuras adaptadas del informe de avance del proyecto FIP 2003-01). El campo superficial de corrientes geostroficas fue obtenido mediante datos satelitales (ERS2 y TOPEX Poseidón) siguiendo la metodología descrita en Hormazabal et al., 2004.
- Figura 81. Diagrama esquemático del modelo SIG aplicado para generar las bases datos espacio-temporal ambiente recursos.
- **Figura 82**. Series de tiempo de la pesquería de anchoveta (desembarques, esfuerzo y CPUE) y variables ambientales (ATSM, GRT, DC, Clorofila, PCM), correspondientes a los promedios de las cuadrículas de 10\*10 mn extraídas.
- Figura 83. Huevos y larvas de anchoveta y variables ambientales (ATSM, GRT, DC, Clorofila), correspondientes a los promedios de las cuadrículas de 10\*10 mn extraídas.
- Figura 84. Sa de anchoveta y variables ambientales (ATSM, GRT, DC, Clorofila), correspondientes a los promedios de las cuadrículas de 10\*10 mn extraídas.
- **Figura 85**. Series de tiempo de la pesquería de sardina (desembarques, esfuerzo y CPUE) y variables ambientales (ATSM, GRT, DC, Clorofila, PCM), correspondientes a los promedios de las cuadrículas de 10\*10 mn extraídas.
- Figura 86. Sa de sardina y variables ambientales (ATSM, GRT, DC, Clorofila), correspondientes a los promedios de las cuadrículas de 10\*10 mn extraídas.
- Figura 87. Series de tiempo de la pesquería de jurel (desembarques, esfuerzo y CPUE) y

variables ambientales (ATSM, GRT, DC, Clorofila), correspondientes a los promedios de las cuadrículas de 10\*10 mn extraídas.

- Figura 88. Ciclos anuales característicos de la CPUE de anchoveta, sardina y jurel y variables ambientales (TSM, GRT, DC y clorofila) asociadas a las capturas. Los ciclos anuales fueron obtenidos considerando dos escenarios ambientales, durante eventos El Niño (1987, 1992 y 1997-98) y años Normal/La Niña (1988-1991, 1993-1996, 1999-2002).
- Figura 89. Primeros dos ejes del ACP, basado en los datos oceanográficos del periodo 19987-02. Las variables continuas activas en negro, las nominales ilustrativas que corresponden a las especies en rojo y en azul las nominales ilustrativas que corresponden a la estación.
- **Figura 90**. Cartografía de la distribución espacial de las cuadrículas más visitadas y de la CPUE de anchoveta de la clase 1 en el periodo 1997-98.
- **Figura 91**. Cartografía de la distribución espacial de las cuadrículas más visitadas y de la CPUE de anchoveta de la clase 1 en el periodo 1999-02.
- Figura 92. Distribución de las clases encontradas con el análisis jerárquico en el plano factorial. Las variables activas en color negro, clase: verde; clase 2: rojo; clase 3: amarillo; clase 4: azul.
- Figura 93. Cartografía de las clases 1 y 4 encontradas con el análisis jerárquico y los respectivos promedios de los parámetros que las componen.
- Figura 94. Cartografía de las clases 1 y 4 encontradas con el análisis jerárquico y los respectivos promedios de los parámetros que las componen.
- **Figura 95**. a) Indice de la oscilación del sur y anomalía de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4; b) espectro de potencias de wavelets correspondiente a la componente a lo largo de la costa de la corriente subsuperficial Perú-Chile, medida frente a Coquimbo (30°S); y c) diferencia de fase obtenida del espectro cruzado de wavelets entre la componente paralela a la costa de la corriente subsuperficial Peru-Chile (flujo hacia el polo) y el nivel del mar en Caldera. Solo la fase de coherencias significativas han sido graficadas. Figuras modificadas de Hormazabal *et al.* (2003).
- Figura 96. Componente paralela a la costa de la corriente subsuperficial Perú-Chile observada frente a Coquimbo (línea continua) y modelada (línea segmentada). Las corrientes corresponden a la banda de 140-520 días. Figuras modificadas de Hormazábal *et al.* (2003).
- **Figura 97**. Fluctuaciones diarias del nivel del mar en Arica y Antofagasta (panel superior). Evolución temporal de los perfiles verticales de temperatura y su anomalía frente a la zona de iquique. Figura adaptada de Thomas *et al.* (2001).
- Figura 98. Series de tiempo de la profundidad de la isoterma de 20°C a 110°W en el Ecuador (valores diarios) y de la isoterma de 15°C frente a Iquique (cruceros aproximadamente mensuales). Series de tiempo del promedio de la distribución

vertical de anchoveta, su índice de determinación (ID en  $t/mn^2$ ) e índice de cobertura (IC en %), obtenidos de cruceros hidroacústicos de prospección de anchoveta en la zona norte de Chile.

- Figura 99. Series de tiempo de los índices de abundancia de anchoveta disponibles en la literatura comparadas con las capturas (línea contínua). Ver Tabla 12 para la descripción y fuente.
- Figura 100. Series de tiempo de la abundancia de anchoveta disponibles en la literatura comparadas con las capturas (línea continua). Ver Tabla 14 para la descripción y fuente.
- Figura 101. Indices de abundancia de anchoveta en el periodo más reciente. El asterisco se refiere al índice deducido en este proyecto.
- Figura 102. Tasa de incremento per cápita en función de la abundancia del año anterior (estructura de retroalimentación de dimensión 1). Se utiliza el índice CPUE (t/vt) del GTE (2002).
- Figura 103. Función R basada en la CPUE (t/vt) en función de la CPUE del año anterior (estructura de retroalimentación de dimensión 1).
- **Figura 104**. Relación stock-recluta del stock sur de Perú-Norte de Chile de anchoveta en el periodo 1984-2002. Fuente: datos del GTE (2002).
- Figura 105. Relación stock-recluta del stock Sur de Perú-Norte de Chile de anchoveta incorporando el índice de oscilación del sur.
- Figura 106. Relación stock-recluta del stock Sur de Perú-Norte de Chile de anchoveta incorporando el índice de surgencia primaveral (fase prerrecluta).
- Figura 107. Relación stock-recluta del stock Sur de Perú-Norte de Chile de anchoveta incorporando el índice de turbulencia primaveral (fase prerrecluta).
- **Figura 108**. Efecto parcial de la abundancia de reclutas (Rindex) y del stock adulto (N1) sobre la tasa de sobrevivencia del grupo de edad 1.
- Figura 109. Fluctuaciones de las capturas en tres stocks de anchoveta a lo largo del sistema de corrientes de Humboldt.
- Figura 110. Componente de fluctuación de baja frecuencia en las capturas en tres stocks de anchoveta a lo largo del sistema de corrientes de Humboldt. La línea de tendencia lineal se
- utiliza para comparar el componente de baja frecuencia contenido en las series (Figura 12).
- Figura 111. Componentes de cambio de baja frecuencia (arriba) y de alta frecuencia (abajo) para tres stocks de anchoveta en el sistema de corrientes de Humboldt.

- **Figura 112.** Relación entre el componente de fluctuación de baja frecuencia entre los stocks Sur de Perú-Norte de Chile (SP-NCh), centro-sur de Chile (CSCh) y el stock centro-norte de Perú.
- Figura 113. Relación entre el componente de fluctuación de alta frecuencia entre los stocks Sur de Perú-Norte de Chile (SP-NCh), centro-sur de Chile (CSCh) y el stock centronorte de Perú.
- Figura 114. Componente de variación de alta frecuencia relacionado con las anomalías del índice Niño 1+2 durante la primavera del año anterior.
- **Figura 115**. Modelo conceptual integrador de los fenómenos locales y de gran escala que afectan la zona norte de Chile y sus principales recursos pesqueros. Las flechas indican el sentido y magnitud de los efectos.
- **Figura 116.** Características ambientales y biopesqueras de tres periodos deducidos del análisis temporal interdecadal. El sentido de las flechas indica si los valores de la variable son altas, bajas, tendientes al alza o a la baja y que se mantienen.
- Figura 117. Característica ambiental durante eventos El Niño y periodos normales-fríos.
- Figura 118. Características ambientales teóricas en la escala días- semanas.

# LISTADO DE TABLAS

Tabla	1. Representatividad de la base de datos de anchoveta, sardina y jurel. BASE: captura (t) registrada en la base de datos; DESEM: desembarque (t) zona norte (SERNAPESCA); %: representatividad de	46
Tabla	2. Vedas extractivas de anchoveta, sardina y jurel (abajo) en la zona norte de Chile. BASE con respecto a D	48
Tabla	3. Información acústica faltante de proyectos FIP (1994-02).ESEM.	70
Tabla	<b>4.</b> Varianza explicada por modos FOE de la CPUE de anchoveta, sardina y jurel.	74
Tabla	5. Estadísticas de los cruceros MPH de anchoveta en la zona norte de Chile.	28
Tabla	6. Varianza explicada (%) por los tres primeros modos del FOE de la ATSM satelital.	84
Tabla	7. Numero de registros por año de la base de datos CPUE-ambiente por recurso.	94
Tabla	8. Numero de registros por año de la base datos Sa-ambiente.	94
Tabla	9. Numero de registros por año de la base datos ambiente	94
Tabla	<b>10</b> . Correlación de las variables activas e ilustrativas con los 4 primeros ejes principales – Huevos y larvas de anchoveta.	102
Tabla	11. Promedio de las variables oceanográficas y pesqueras por clase.	102
Tabla	<b>12</b> . Ïndices de abundancia para el stock de anchoveta de la zona norte de Chile.	110
Tabla	<b>13.</b> Correlaciones (coeficiente de correlación de Pearson) entre los índices de abundancia disponibles para el periodo 1984-2002. El asterisco en la cpue (t/vcp) se refiere al índice calculado en el presente proyecto. Valores subrayados son estadísticamente significativos (p=0,05).	111
Tabla	<ul> <li>14. Comparación preliminar de modelos de dinámica poblacional de anchoveta utilizando el índice CPUE (t/vt) del GTE (2002). Los modelos alternativos se comparan con el primer modelo utilizando el Criterio de Información de Akaike y el Criterio Bayesiano de Schwartz (SBC, S-plus 2000). Los parámetros de los modelos fueron estimados mediante Modelos Aditivos Generalizados con suavizadores de dispersión natural spline. Nt-1 = abundancia del año anterior, SSTw = temperatura superficial del mar invernal, SST = temperatura superficial del mar anual, SOI = índice de</li> </ul>	113

oscilación del sur, Pr = probabilidad del modelo en relación con el primero. Tabla 15. Capturas, biomasa total, adulta, desovante y reclutas de edad 0 de anchoveta en el stock sur de Perú – Norte de Chile. Fuente: GTE (2002). 114 Tabla 16. Modelos stock-recluta de anchoveta incorporando factores ambientales. Los modelos alternativos se comparan con el primer modelo utilizando el Criterio de Información de Akaike y el Criterio Bayesiano de Schwartz (SBC, S-plus 2000). Los parámetros de los modelos fueron estimados mediante Modelos Aditivos Generalizados con suavizadores de dispersión natural spline. Rt = reclutamiento, SSBt = biomasa desovante, SSTw = temperatura superficial del mar invernal, SST = temperatura superficial del mar anual, SOI = índice de oscilación del sur, IS = índice de surgencia primaveral (septiembre-diciembre), IT = índice de turbulencia primaveral (septiembre-diciembre; Pr = probabilidad del modelo en relación con el primero. 115 
**Tabla 17**. Indice de abundancia relativa de anchoveta por grupos de edad basado
 en la captura en número por edad (nº/vt), aplicando el método de Hayman et al. (1980). Período: 1986-2001. 115 
 Tabla 18. Selección de modelos que describen efectos densidad-dependientes
 sobre la tasa de sobrevivencia de anchoveta ( $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\mu$ ). Se utilizan dos formas funcionales: lineal y log-lineal, en una escala logit con estructura de error binomial (enlace logit). 117 Tabla 19. Características ambientales y bio-pesqueras en la escala estacional durante años normales/fríos y El Niño, para anchoveta y sardina en el período 1987 - 2002. 128 **Tabla 20.** Identificación de variables proxies para la abundancia de anchoveta en sus distintas etapas de madurez. Los resultados de la columna de relaciones entre variables ambientales y bio-pesqueras se obtienen de los análisis multivariados en escala interdecadal ( $FOE^1 y FOE^2$ ), y espacial-interanual (Análisis de Componentes Principal (ACP)) y las series de tiempo en escala interdecadal. 140 Tabla 21. Identificación de variables proxies para la abundancia de sardina en sus distintas etapas de madurez. Los resultados de la columna de relaciones entre variables ambientales y bio-pesqueras se obtienen de los análisis multivariados en escala interdecadal ( $FOE^1 y FOE^2$ ), y espacial-interanual (Análisis de Componentes Principal (ACP)) y las series de tiempo en escala interdecadal. 141 Tabla 22. Objetivos de los criterios del SRDS. 144 Tabla 23. Criterios, indicadores y puntos de referencia bio-pesqueros de anchoveta y del ambiente en la escala interdecadal. 146

Tabla 24. Criterios, indicadores y puntos de referencia bio-pesqueros de sardina y del ambiente en la escala decadal.	148
<b>Tabla 25.</b> Criterios, indicadores y puntos de referencia bio-pesqueros de anchovetay del ambiente en la escala interanual.	150
<b>Tabla 26.</b> Criterios, indicadores y puntos de referencia bio-pesqueros de sardina y del ambiente en la escala interanual.	152
<b>Tabla 27.</b> Criterios, indicadores y puntos de referencia bio-pesqueros de anchoveta y del ambiente en la escala estacional.	154
<b>Tabla 28.</b> Criterios, indicadores y puntos de referencia bio-pesqueros de sardina y del ambiente en la escala estacional.	154

### LISTADO DE ANEXOS

- ANEXO 1. Plan de trabajo para desarrollar el objetivo especifico 1.
- ANEXO 2. Estado del arte sobre investigación en la temática.
- **ANEXO 3.** Estandarización de las tasas de captura de las pesquerías pelágicas de la zona norte de Chile.
- **ANEXO 4.** Cartografía mensual de CPUE de anchoveta, sardina y jurel del periodo 1987-02 en la zona norte de Chile.
- **ANEXO 5.** Distribución espacio temporal de la TSM satelital promedio mensual durante el período 1987 2002.
- ANEXO 6. Análisis de cruceros oceanográficos.
- **ANEXO 7.** Distribución Espacio-temporal de Clorofila Satelital Durante los Cruceros MPH 1999-2002.
- ANEXO 8. Gráficos de plano fatcorial del análisis de ACP . 1) basado en los datos oceanográficos del periodo 1987-02. 2) basado en los datos 1997-98 de anchoveta. 3) basado en los datos del periodo 1999-02 de anchoveta.
- **ANEXO 9.** Equipo profesional y técnico que ha participado en las actividades realizadas en el proyecto.
- ANEXO 10. Taller de difusión y discusión de resultados, proyecto FIP 2003-33.

### **RESUMEN EJECUTIVO**

En el presente informe se entregan los resultados relacionados con la descripción y análisis de la dinámica ambiental de la zona norte de Chile (I y II Región), identificando cambios interdecadales, interanuales, estacionales e intra-estacionales, y su relación con la distribución y abundancia de los principales recursos pelágicos. En particular se caracterizan los patrones espacio-temporales del reclutamiento de anchoveta, en relación con los parámetros del hábitat. Luego se desarrolla un modelo conceptual que integra la variabilidad del ambiente y la dinámica de las poblaciones. Finalmente se identifican variables proxies y cuantifican indicadores que integran la componente ambiental y biopesquera, para apoyar la toma de decisiones en la administración pesquera.

Antes de desarrollar los objetivos específicos del proyecto, se lograron dos alcances fundamentales. El primero fue la elaboración de un documento que contiene una exhaustiva revisión bibliográfica sobre el estado del arte internacional de temáticas en directa relación con los objetivos específicos del proyecto. La revisión permitió conocer y adaptar conceptos y análisis realizados sobre la zona de estudio y principalmente sobre otras regiones de borde oriental. El segundo alcance dice relación con la configuración de bases de datos ambiente-recursos, implicando la recolección de archivos oceanográficos de diferentes fuentes y bio-pesqueros de diferentes instituciones.

Las relaciones ambiente-recursos se analizan en diversas escalas espacio-temporales. En la **escala estacional** se analiza el ciclo anual de la biomasa de anchoveta, que presenta un máximo en verano y otro secundario en invierno; mientras que la sardina muestra valores máximos entre invierno y primavera, y un máximo secundario en marzo. En condiciones normales la anchoveta se distribuye en las primeras 20 mn de la costa; en tanto que la sardina presenta una distribución más oceánica. La anchoveta presenta su distribución más costera entre diciembre y abril, y más oceánica entre septiembre y noviembre. La sardina se distribuye ampliamente en enero, reduciendo su distribución hacia la costa entre febrero y mayo, y hacia el norte de los 21°S en mayo-octubre. Las condiciones oceanográficas muestran valores de temperatura superficial del mar (TSM) y nivel medio del mar (NMM) máximos durante el verano y mínimos durante el invierno. Las estaciones meteorológicas

### PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

costeras muestran vientos de componente norte-sur positivos durante todo el año, con un máximo en verano y un mínimo en invierno; mientras que los vientos satelitales próximos a la costa muestran un ciclo inverso. Este patrón estacional del viento puede producir levantamiento y profundización de la termoclina (Zb), debido al bombeo de Ekman que contrarrestaría la señal anual de la surgencia costera. De acuerdo con el análisis de la altimetría satelital, la región oceánica (y posiblemente costera) de la zona de estudio se caracteriza por la presencia de remolinos de mesoescala, con dimensiones del orden de cientos de kilómetros y periodos activos de varios meses. Asociado a estos remolinos se observa la advección de aguas ricas (pobres) en clorofila desde (hacia) la costa hacia (desde) regiones más oceánicas.

En la escala intraestacional, las fluctuaciones del NMM y de la corriente subsuperficial de Perú-Chile en el norte de Chile están fuertemente moduladas por la dinámica de ondas ecuatoriales. A frecuencias intraestacionales (30-90 días) dominan las ondas atrapadas a la costa forzadas remotamente por fluctuaciones intraestacionales del viento a lo largo del Pacifico ecuatorial. En frecuencias mayores que la banda intraestacional (140-512 días), se presentan periodos en que predominan las ondas de Rossby forzadas ecuatorialmente (periodos cálidos en el Pacifico ecuatorial central), y otros en que éstas son forzadas por una combinación de forzantes locales y remotos (periodos fríos en el Pacifico ecuatorial central). Por otra parte, la clorofila satelital también muestra un intensa variabilidad intraestacional, probablemente forzada remotamente (ondas internas) y localmente (viento). Durante periodos en que estas ondas producen la mayor profundización de las isotermas (por ejemplo durante El Niño 1997-98), la distribución vertical de la anchoveta cambia drásticamente, alcanzando profundidades cercanas a los 140 m, con una mayor densidad alrededor de los 60 m. Habitualmente la mayor densidad de cardúmenes se presenta a una profundidad media de 15 m, con una excursión vertical que no sobrepasa los 50 m. La mayor dispersión del recurso, debido a una mayor excursión vertical, modifica la disponibilidad del recurso a las artes de pesca, lo cual se refleja en menores captura. Estas relaciones se mantienen, con menor intensidad, durante periodos caracterizados por fluctuaciones intraestacionales débiles.

En la escala interanual, en general las pesquerías de anchoveta y sardina presentan intensas fluctuaciones. Ambos recursos muestran distribuciones más costeras que lo habitual durante eventos El Niño. En tanto, las condiciones oceanográficas y atmosféricas del norte de Chile presentan las típicas fluctuaciones asociadas al ciclo El Niño-Oscilación del Sur (ENOS): anomalías positivas (negativas) de TSM, NMM, profundidad de Zb en la costa, disminución (aumento) del gradiente térmico (GRT) este-oeste durante eventos El Niño (La Niña).

El sistema océano-atmósfera del Pacifico suroriental presenta fluctuaciones en la escala interdecadal, caracterizada por periodos decadales, bidecadales y pentadecadales. A lo largo de la costa norte de Chile, las fluctuaciones de TSM, NMM, TA y Zb son remotamente forzadas por cambios del viento en la franja ecuatorial. Estas fluctuaciones ambientales aparecen desacopladas de las fluctuaciones del viento en la costa. Sin embargo, es posible que el aumento (disminución) del índice de turbulencia y del transporte mar afuera sean condiciones favorables para el desarrollo de la pesquería de anchoveta (sardina). Así, los desembarques de anchoveta presentan dos periodos en que domina la pesquería pelágica en el norte de Chile. El primero desde la década del sesenta hasta mediados de los setentas, y el segundo desde mediados de los ochenta hasta el presente, periodos caracterizados por anomalías negativas de TSM y una Zb relativamente mas somera en el Pacifico ecuatorial oriental y a lo largo del Pacifico suroriental. En tanto, la pesquería de sardina se desarrolla principalmente entre mediados de los setentas y comienzos de los noventas, cuando se observa un periodo con anomalías positivas de TSM, una Zb relativamente mas profunda en el Pacifico ecuatorial oriental y a lo largo del Pacifico suroriental, y vientos que aumentan significativamente las estimaciones de turbulencia (IT) y del transporte de Ekman (TE). La sardina se distribuye ampliamente en el norte de Chile hasta 1992; a partir de entonces disminuye drásticamente su área de distribución. En tanto la anchoveta muestra un aumento del área de distribución, aunque con intensas fluctuaciones interanuales asociadas a los eventos El Niño. De acuerdo con la información espacio-temporal disponible desde 1987, la fase fría de la oscilación interdecadal iniciada a fines de los ochenta se caracteriza por una mayor persistencia de anomalías negativas de TSM, un aumento de los GRT este-oeste debido a una mayor intensidad de la surgencia costera, y un aumento de la productividad fitoplanctónica frente a las costas del norte de Chile. En tanto que en las series temporales se observa una clara disminución del IT y TE a valores moderados. Estas condiciones permiten el desarrollo de un hábitat apto para la anchoveta, favoreciendo el éxito de los desoves y el reclutamiento de esta especie sobre la sardina. En base a observaciones satelitales, se observa un enfriamiento de las condiciones térmicas superficiales a lo largo de la costa norte de Chile a partir de mediados de 1998, mientras que en el sector más oceánico no se observa este proceso, incrementando el gradiente este-oeste en esta región. Además, se observa un aumento de la clorofila satelital en la zona costera a partir de 1997. Estas condiciones favorecen la presencia de anchoveta.

Desde el punto de vista de la dinámica poblacional de anchoveta, gran parte de los índices de abundancia disponibles para conformar una serie temporal están referidos al periodo más reciente. El único índice disponible para inferir cambios en la abundancia de la fracción explotable es la captura por unidad de esfuerzo (CPUE). Se utilizó la CPUE del grupo de trabajo de evaluación conjunta IFOP-IMARPE, para analizar los cambios en la biomasa explotable. Se encontró que la dinámica de tales cambios, a través de la tasa de crecimiento realizada (R<sub>t</sub>), es función lineal de la abundancia del año anterior reflejando una dinámica de dimensión 1, que explica solo 39% de los cambios ocurridos entre 1986 y 2001. Esto quiere decir que los factores densidad-dependientes son débiles, pero ningún factor desidad-independiente contribuyó en la explicación de los cambios poblacionales observados. De esta manera, se concluye que la dinámica de la anchoveta en la zona norte (al menos la fracción explotable) esta siendo regulada mayormente por fuerzas estocásticas y débilmente por factores densidad-dependientes. A su vez, al utilizar la técnica de modelos aditivos generalizados se encontró una relación no-lineal para la función R de naturaleza convexa.

No obstante lo anterior, la abundancia del grupo de edad 0 (**reclutamiento**) es explicada casi linealmente por la biomasa adulta y al menos por una relación no-lineal con el índice de turbulencia y de surgencia primaveral (agosto-diciembre, periodo prerrecluta). En consecuencia, la variabilidad que ha determinado el éxito o fracaso del reclutamiento de anchoveta en la zona norte se debe a la ocurrencia de primaveras con una excesiva o débil actividad del viento. Desde el punto de vista de los efectos densidad-dependientes de la

abundancia de reclutas, se encontró que la sobrevivencia del reclutamiento (grupo de edad 0) está afectada por la abundancia del stock adultos. A su vez, el stock adulto influye negativamente en la sobrevivencia del grupo de edad 1, pero la sobrevivencia de éste a su vez se relaciona con la abundancia de reclutas. Un stock adulto abundante determinará una disminución en la tasa de sobrevivencia del grupo de edad 0 y 1, aspecto que en el caso del grupo de edad 1 se vería compensado por un efecto positivo de la abundancia de reclutas sobre la sobrevivencia del grupo de edad 1. Estos efectos densidad-dependientes están relacionados con la interacción entre cohortes como intra-cohortes.

La abundancia del stock adulto de anchoveta es consecuencia de los cambios en el reclutamiento anual que se explica al menos por algunos factores ambientales como la actividad del viento, que más bien son una respuesta local. Desde una perspectiva de largo plazo, los eventos El Niño-La Niña (variación interanual) de gran magnitud podrían tener consecuencias para el reclutamiento un año después, siendo de mayor importancia los problemas relacionados con la capturabilidad y disponibilidad del recurso en general, y otras causas como la intensidad de pesca o el viento podrían estar determinando cambios de corto plazo en la abundancia de la anchoveta.

La revisión bibliográfica sobre la variabilidad bio-pesquera y oceanográfica de ecosistemas de bordes orientales del Pacífico, la concepción de modelos conceptuales afines y los resultados del objetivo específico 1 del presente trabajo, permitieron adaptar un **modelo conceptual integrador** de los diferentes fenómenos locales y de gran escala que afectan el ambiente marino del norte de Chile, y la distribución y abundancia de los principales recursos pelágicos. Este modelo muestra como las fluctuaciones interdecadales (asociadas a cambios de régimen) e interanuales (asociadas a los eventos El Niño) que se desarrollan en el Océano Pacífico, se manifiestan en el Pacífico Sudeste y por ende en la zona norte de Chile, afectando el ciclo anual, la dinámica de las ondas ecuatoriales y la surgencia costera. En lo biológico, el hecho más notable es la secuencia de la sustitución de las principales especies explotadas en la zona (anchoveta-sardina-anchoveta), siendo más favorables en términos de desembarque los períodos de anchoveta para Perú y de sardina para Chile. Las fluctuaciones que se manifiestan en las diferentes escalas espacio-temporales, se relacionarían a través de la continuidad de lo que sucede diariamente en la zona de estudio

hasta décadas, y desde lo que sucede localmente hasta la cuenca del Pacífico. Sin desconocer la investigación pesquera que con carácter operativa se realiza, ésta visión holística que se visualiza a través del modelo conceptual en cuestión imagina la dimensión del trabajo que es necesario impulsar para permitirnos el desarrollo de un manejo pesquero considerando el enfoque ecosistémico propuesto en la literatura.

Se descarta la CPUE como indicador proxy de la abundancia de anchoveta, debido a que su tendencia difiere de las que muestran las estimaciones directas de biomasa (VPA y BMPH). Se propone entonces el desembarque como proxy de la abundancia de este recurso en el norte de Chile, dado que representa la data más larga del análisis y notables fluctuaciones (en todas las escalas) que se asociarían al recurso (en cuanto a su abundancia y disponibilidad). Para la sardina se propone la CPUE como proxy de la abundancia, debido a su buena correlación con las estimaciones de biomasa (VPA) y desembarque. Se propone la TSM como un proxy ambiental de la abundancia de anchoveta y sardina, por estar en fase con las variaciones de dichos recursos. Además refleja variaciones relacionadas con cambios en otras variables ambientales (Zb, NMM, TE, IT), y las bases de datos son de fácil adquisición. La dinámica de Zb afectaría directamente las posibilidades de captura de anchoveta, debido a la tendencia del recurso a profundizarse y aumentar su dispersión cuando la termoclina se profundiza. Por lo tanto, Zb puede considerarse como un proxy de la vulnerabilidad de la anchoveta. El reclutamiento de anchoveta y el TE presentan una buena correlación negativa. El efecto desfavorable del incremento del TE sobre el reclutamiento de este recurso se debería al aumento de la advección de huevos y larvas lejos de la costa, y por ende de la mortalidad natural. Se propone entonces el TE como una variable proxie del reclutamiento de anchoveta. A pesar de la existencia de diferencias entre rangos de temperatura asociados a los desoves, que indican que ésta podría ser considerado como un proxy, el análisis espacial de los huevos de anchoveta realizado con ACP indica que la variable de mayor importancia al definir zonas con mayor número de huevos es la CLOA, por lo que se propone como proxie del desove.

Las pesquerías, al igual que otras actividades económicas, están íntimamente relacionadas con el ambiente natural. En Chile son llevadas a cabo bajo diversas condiciones climáticas y geográficas, y controladas por una variedad de fuerzas ambientales, tecnológicas,

económicas, sociales y gubernamentales. Sin embargo, no conocemos en forma precisa cuales son los efectos de largo plazo de las medidas de administración pesquera y de la variabilidad ambiental sobre los recursos. En el contexto de estas incertidumbres, y considerando el enfoque ecosistémico de FAO, se utilizó una gran cantidad de datos, información y métodos de análisis disponibles, para proponer un conjunto de indicadores **ambientales y bio-pesqueros** sobre las principales pesquerías de la zona norte del país. En base al modelo conceptual integrador propuesto, se diseñaron y cuantificaron indicadores ecosistémicos considerando la información bio-pesquera y ambiental histórica disponible y las relaciones ambiente-recurso establecidas en las distintas escalas de la variabilidad espacio-temporal. Los resultados del proyecto demuestran la aplicación del SRDS de FAO a grandes bases de datos. Es necesaria más investigación para afinar los análisis y aplicar los modelos con mayor precisión; también se debe mejorar la fineza y confiabilidad de los datos de entrada en la identificación de indicadores. No obstante, son motivantes los resultados de este proyecto sobre el particular. Los indicadores que se presentan son sensibles a cambios en el ambiente y estrategias de pesca en diversas escalas espaciotemporales. Estos establecen una línea base sobre la cual se pueden comparar futuras evaluaciones y pueden ser de gran utilidad para evaluar medidas de administración pesquera y para direccionar futuras investigaciones.

Finalmente, al término del proyecto los análisis y conclusiones fueron presentados en el Taller de Difusión y Discusión de Resultados previsto.

Durante la Consulta de Expertos para Examinar los Cambios de Abundancia y Composición de Peces Neríticos estaba en pleno apogeo el fenómeno El Niño 1982-83, reforzando el interés por las importantes fluctuaciones de los recursos pelágicos costeros debidas a cambios ambientales, y en la necesidad de comprender y pronosticar este tipo de eventos (Csirke y Sharp, 1985).

La problemática involucra principalmente a cuatro sistemas oceánicos de borde oriental: California, Chile-Perú, Canarias y Bengüela. Estos presentan comunidades de peces y dinámicas ambientales similares (Parrish *et al.*, 1983). Asimismo se presentan semejanzas superficiales asociadas a los sistemas de alta presión atmosférica de la zona subtropical de transición (Nicholls, 1987). Existen también notables diferencias; por ejemplo, la capa mínima de oxigeno frente a Chile-Perú es poco profunda en comparación con la de otras áreas, lo que sugiere una menor competencia entre peces pelágicos y mesopelágicos. En cada sistema hay áreas de mezcla intensa causada por el viento que los peces pelágicos parecen evitar. Las áreas de desove se caracterizan por vientos de fuerza débil o moderada, que favorecen la sobrevivencia larval (Lasker, 1978; Cury y Roy, 1989).

En el Océano Pacífico Oriental, al sur del Ecuador y en estrecha asociación con el Centro de Altas Presiones Atmosféricas (25°-35°S y 90°-105°W), se encuentra el Giro Anticiclónico del Pacífico Sudeste. Al oriente de este Giro se ubica el Sistema de Corrientes de Chile y Perú, que corresponde a la bifurcación hacia el norte de la Deriva del Oeste, que llega al continente en los 42-49°S (Silva y Neshyba, 1977, 1979). Así, el régimen oceanográfico de la región está determinado en general por la Corriente de Humbolt, que transporta aguas ricas en nutrientes desde la región subantártica; la intrusión desde el norte hacia la costa de aguas subtropicales también ricas en nutrientes y pobres en oxígeno; y por las surgencias costeras provocadas por los vientos del sur y suroeste, que junto a la advección horizontal de gran escala sustentan la disponibilidad de alimento a partir de la producción primaria (Bernal *et al.*, 1983; Bernal, 1990). También hay que reconocer el aporte que tendrían las bacterias en la descomposición de materia orgánica y su aporte a la productividad de la zona (Quiñones, *com. pers.*). A nivel subsuperficial, el

rasgo más característico lo constituye la presencia de la masa de agua ecuatorial subsuperficial de alta salinidad y mínimo contenido de oxigeno, que juega un papel importante en la distribución de los recursos pelágicos.

La región también se ve afectada por los ciclos ENOS, que provocan un calentamiento anómalo del agua superficial en un amplio contexto espacio-temporal. Estos ciclos se producen a intervalos irregulares en conjunción con la Oscilación del Sur, fluctuación de gran amplitud de la presión atmosférica entre el Pacifico Tropical Suroriental y el Occidental (Philander, 1990). Asimismo se observan cambios ambientales asociados a períodos cálidos y fríos de largo plazo (Cañón, 1986; Yáñez *et al.*, 1986, 1992; Sharp y McLain, 1993; Yáñez, 1998), tal como sucede en el Pacífico norte (Hare y Nathan, 2000; Bakun y Broad, 2001).

Un análisis reciente de la variabilidad de la TSM costera de Perú y Chile indica que ésta se caracteriza por presentar variabilidad interanual asociada al ciclo ENOS, e interdecadal asociada a la oscilación interdecadal del Pacífico (Montecinos *et al.*, 2003). El salto climático de 1976 sería entonces parte de esta oscilación de periodos bidecadales (20-30 años) y pentadecadales (40-60 años) (Minobe, 1999; Chávez *et al.*, 2003).

La zona norte de Chile se caracteriza, como otras áreas de borde oriental, por una baja diversidad de especies pelágicas, que se presentan en grandes abundancias y que generan beneficios socio-económicos a través del desarrollo de sus pesquerías. Sin embargo, la variabilidad es una característica inherente de estos recursos, lo cual se asocia tanto a la intensidad de la explotación como a los cambios de las condiciones ambientales (Cirke y Sharp, 1984; Cañón, 1986; Bakun y Broad, 2001).

Las variaciones ambientales de la región no han sido suficientemente analizadas para mejorar la comprensión de las variaciones de la distribución y abundancia de los recursos pelágicos (Bernal, 1990). En efecto, el manejo de éstos se ha basado en la aplicación de modelos clásicos de evaluación de stocks, los cuales toman cuenta solo el accionar de la pesca como variable explicatoria; o en la ejecución de evaluaciones directas que persiguen esencialmente la estimación de la distribución y biomasa de recursos en periodos limitados

3

de tiempo. Sin embargo, algunos esfuerzos han demostrado que se adquiere un notable incremento explicatorio al introducir parámetros que caracterizan la variabilidad oceanográfica en modelos de evaluación y distribución de estos recursos pelágicos (Fréon y Yáñez, 1995; Klyashtorin, 2001; Yáñez *et al.*, 2001). La integración del ecosistema en las decisiones para el manejo de pesquerías no es aún aplicado en estas pesquerías (Escobar, 2001; Yáñez *et al.*, 2002); aunque existen iniciativas sobre el particular (FAO, 1999; ICES, 2000; Gislason *et al.*, 2000).

En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo general analizar aquellas variables que mejoren la comprensión de la dinámica de las fluctuaciones ambientales en la zona norte de Chile y de las relaciones de éstas con los cambios en la distribución y abundancia de los principales recursos pelágicos presentes, con el fin de analizar el diseño de indicadores ecosistémicos que permitan apoyar la toma de decisiones en la administración pesquera.

La hipótesis que se plantea es "que diferentes fenómenos locales y de gran escala afectarían el ambiente oceánico del norte de Chile, y por lo tanto la distribución y abundancia de los principales recursos pelágicos". La idea central es la de contribuir al establecimiento de una base para la formulación de modelos explicativos, a partir de lo que sería la primera fase de un proyecto de mayor alcance, tiempo y apoyo material.

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar indicadores que integren las componentes ambientales, biológicas y pesqueras orientadas a apoyar la toma de decisiones de administración pesquera de los recursos pelágicos en la zona norte de Chile (I y II Región).

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- 1 Describir y analizar la dinámica del ambiente oceánico de la zona norte de Chile identificando cambios de régimen, cambios decadales, interanuales estacionales e intra-estacionales y su relación con la abundancia de los recursos pelágicos y / o de sus estadios tempranos de desarrollo en la zona norte de Chile.
- 2 Identificar variables proxies en el medio ambiente marino y biológico para la detección temprana de posibles cambios en el ecosistema debido a fluctuaciones ambientales.
- 3 Caracterizar los patrones espacio temporales del reclutamiento de los recursos pelágicos en relación con los parámetros del hábitat que han definido su éxito o fracaso.
- 4 Desarrollar un modelo conceptual explicativo que permita integrar la variabilidad del ambiente marino y la dinámica de poblaciones de recursos pelágicos de la zona norte de Chile.
- 5 Diseñar indicadores que integren las componentes oceanográficas, biológicas y pesqueras orientadas a apoyar la toma de decisiones de administración pesquera de los recursos pelágicos en la zona norte de Chile (I y II Región).

### 2. ANTECEDENTES

#### 2.1. Antecedentes generales

El clima no es un rasgo estático del medio ambiente terrestre (atmósfera, océanos, criósfera, continentes y biosfera), sino que constituye un régimen dinámico sujeto a variaciones naturales en todos las escalas temporales, así como también alteraciones provocadas por la actividad humana (Ginsberg y Angelo, 1989). Cada componente del sistema climático terrestre se halla en permanente interacción con los restantes, pero cada uno presenta diferentes tiempos de respuesta. Luego, dada una perturbación introducida en el sistema, es lógico esperar que éste no logre alcanzar un equilibrio estático. Se deduce entonces que es difícil determinar las causas y los efectos, así como el cuadro de la variabilidad natural del clima.

La temperatura es una variable importante al momento de analizar las fluctuaciones del clima (SBS, 1990). Se estima que en el periodo 1880-1940 la temperatura media global del planeta se habría elevado en 0,4°C; entre 1940 y 1970 ésta se habría mantenido relativamente estable; en tanto que en el período 1980-2000 muestran una clara tendencia al aumento. Para estimar futuras condiciones climáticas universales y regionales se utilizan diversos modelos, los cuales todavía no son lo suficientemente avanzados para pronosticar los cambios de la temperatura. Sin embargo, los modelos todavía no son lo suficientemente avanzados para pronosticar los cambios de la temperatura. Los mecanismos de interacción más importantes, como los de las relaciones entre los océanos y la atmósfera, y el efecto amortiguador de las nubes, apenas se entienden y representan por lo tanto un papel limitado en los modelos.

En general, la disponibilidad de peces a corto plazo depende a menudo de condiciones ambientales como la temperatura (Cañón, 1978); a largo plazo existen relaciones igualmente importantes con los cambios del medio ambiente, pero los vínculos tienden a ser menos claros (Bakun, 1984). Es fundamental distinguir entre cambios en la disponibilidad y cambios en la abundancia de los peces, y de entender los procesos por los cuales los parámetros relacionados con el ambiente, tales como la fecundidad, el reclutamiento, el crecimiento y la mortalidad natural, interaccionan con la explotación causando consecuencias negativas ya sea en la forma de trastornos de corto plazo o bien colapsos poblacionales (Myers *et al.*, 1995; Hutching, 2000).

Es lamentable que no exista aún una base aceptada para predecir los efectos de fenómenos como El Niño en el reclutamiento y en la viabilidad de uno de los mayores complejos poblacionales: el de Chile-Perú. La experiencia acumulada y los conocimientos científicos indican una mayor probabilidad de graves anormalidades, en la reproducción y disponibilidad para la explotación por ejemplo, durante períodos de intensas anomalías ambientales en la región. A menudo se considera que la fase larval constituye el segmento del ciclo vital en el que es más probable que los efectos ambientales hagan sentir su impacto en el eventual reclutamiento y por ende en la abundancia de los recursos (Sharp, 1981).

Es evidente que los ecosistemas marinos de Chile y Perú son impactados por la variabilidad climática, particularmente por los eventos El Niño. Durante estos eventos se produce una migración horizontal y vertical de los pequeños pelágicos; en tanto que los eventos de mayor intensidad afectan incluso la reproducción y la sobrevivencia (Sharp & McLain, 1993; Tarazona & Castillo, 1999).

Dada la incertidumbre científica en la predicción del clima y de los impactos sobre las especies (por ejemplo de las diferentes formas de los El Niño), las regulaciones pesqueras se ven enfrentadas a serias dificultades (Glantz, 1986).

No obstante, los cambios océano-climáticos detectados han sido claramente relacionados con alteraciones en los ecosistemas marinos en varias escalas temporales y espaciales. Este forzamiento físico es especialmente obvio en la escala estacional (o más corta), donde las variaciones de la temperatura superficial del mar (TSM) y la surgencia, por ejemplo, controlan fuertemente la productividad, el crecimiento y la migración. Este forzamiento es también evidente en la escala interanual asociada a los eventos El Niño y La Niña, cuando los ecosistemas tropicales son directamente afectados por las condiciones oceánicas severamente alteradas, o cuando los ecosistemas de borde oriental del Pacífico son

7

remotamente forzados por la concomitancia de las teleconexiones oceánicas y atmosféricas. En aquellos asociados a cambios de régimen decadales, hay un alto grado de incertidumbre sobre los mecanismos involucrados cuando los cambios en las condiciones oceanográficas físicas influyen en los aspectos biológicos (Alheit & Bernal, 1993; Hare *et al.*, 2000).

Los mecanismos por los cuales los forzamientos físicos afectan los ecosistemas marinos incluyen los asociados con las pequeñas escalas de disipación, mezclas turbulentas y difusión; los de mesoescalas asociados con frentes, remolinos y surgencias; y los que operan en la macro escala asociadas con los giros, El Niño y la circulación convectiva termohalina. Las manifestaciones regionales y locales de este forzamiento físico sobre la biología pueden ocurrir instantáneamente o después de un lapso de tiempo. El forzante climático al parecer actúa para modular las complicadas relaciones lineales y no lineales de los ecosistemas.

La variables oceanográficas más importante que influirían en las comunidades pesqueras parecen ser la TSM, la profundidad de la capa de mezcla (PCM), la profundidad de la termoclina, la intensidad de la surgencia y los campos de corriente de la superficie del océano. La TSM, fuertemente correlacionada a la presión atmosférica a nivel del mar, es la mejor variable física del océano sobre las escalas de tiempo climáticas. Por esta razón los estudios tratan de acoplar los cambios de la TSM a los cambios del ecosistema, aunque la influencia directa de la TSM sobre los ecosistemas es aún poco clara por el hecho que muchos procesos físicos causan también cambios en la TSM (ej. calentamientos superficiales directos; advección horizontal de corrientes; surgencias; cambios de mezclas); por lo tanto, las anomalías de TSM pueden ser sintomáticas más bien que causales.

La PCM, la nutriclina y la profundidad de la zona fótica pueden influir en la producción primaria afectando la disponibilidad de los nuevos nutrientes y la intensidad de luz a la cual son expuestas las especies autotróficas. La producción primaria en el subtrópico tiende a ser limitada por los nutrientes, en contraste con las regiones subpolares donde la luz tiende a ser el factor limitante. Cambios de largo plazo en los bordes de la profundidad de la termoclina pueden influir directamente en los hábitat de la fauna béntica o cambiar las características de los remolinos de mesoescala y formación de filamentos, y afectar
#### fundamentalmente los procesos de surgencia y el enriquecimiento superficial de nutrientes.

Es importante señalar que correlaciones entre variables físicas y cambios de largo plazo de los ecosistemas son normalmente encontradas, pero los mecanismos específicos involucrados son usualmente desconocidos. Habrían numerosas razones para explicar esto: el ecosistema puede estar influenciado por varias variables físicas; el ecosistema puede ser muy sensible a la sincronización estacional del forzante físico anómalo; y el ecosistema puede generar variabilidad intrínseca sobre las escalas de tiempo climáticas.

La determinación de condiciones ausentes de perturbaciones climáticas sería importante. Pero las pocas observaciones de condiciones físicas y biológicas confunden estas interpretaciones. Solo las influencias generalizadas del forzamiento físico a gran escala, son considerados al explicar variaciones decadales del ecosistema. La serie de observaciones en la Corriente de California efectuadas por el Programa CalCOFI es la única con perspectivas sobre el forzamiento físico en el sistema biológico en la escala decadal.

El gran desafío es entonces entender los mecanismos de respuesta a estos cambios ambientales físicos instantáneos y retrasados, y las formas de recomposición del ecosistema a través de la cadena trófica en nuestra región. La naturaleza de gran escala del cambio climático parece organizar patrones de respuesta en los recursos pesqueros. No obstante, los problemas inherentes a los datos de captura son bien conocidos. Así, la capturabilidad, la migración y el reclutamiento pueden ser malinterpretadas al confundirse unos con otros. Luego, un apropiado diagnóstico es generalmente más importante que un pronóstico; aunque en casos muy puntuales se pueden identificar algunos componentes predecibles del sistema oceánico físico (Schneider y Miller, 2001).

#### 2.2. Antecedentes específicos

El Sistema de Corrientes de Chile-Perú sustenta uno de los ecosistemas marinos más productivos del mundo. En 1996 cerca de un 20% de las capturas de especies pelágicas mundiales se realizaron en esta región, la cual tan solo representa un 0,09% de la superficie

del océano mundial. Varios importantes factores sustentan la alta productividad biológica observada en este sistema de borde oriental. Estos incluyen la corriente subsuperficial de Perú-Chile, la cual transporta aguas ricas en nutrientes y pobres en oxigeno en dirección sur y la persistente surgencia costera generada por la acción de los vientos predominantes, cuyo principal efecto consiste en el afloramiento de aguas ricas en nutrientes hacia la superficie, favoreciendo la alta producción de fitoplancton disponible para el zooplancton y los peces. Observaciones directas de corrientes medidas sobre el talud continental frente a Chile, han revelado una compleja estructura de variabilidad en la banda intraestacional, estacional e interanual (Shaffer *et al.*, 1999). Mucha de esta variabilidad aparece forzada remotamente desde el Pacífico ecuatorial, por las oscilaciones de Madden-Julian en la banda intraestacional (Shaffer *et al.*, 1997; Hormazabal *et al.*, 2002), por los vientos equatoriales

en la banda estacional (Pizarro *et al.*, 2002), y por El Niño y la oscilación del sur en la banda interanual (Shaffer *et al.*, 1999; Pizarro et al., 2002). Esta variabilidad vinculada a la dinámica ecuatorial abre ahora un potencial de predictabilidad de las condiciones oceanográficas frente a Chile con varios meses de anticipación.

Chile es uno de los principales países pesqueros a nivel mundial, con aproximadamente 5 millones de toneladas de capturas anuales. Las especies pelágicas constituyen cerca de un 90% de las capturas anuales, donde la pesquería pelágica de la zona norte de Chile (18°21'S-24°00'S) contribuye con un 48% (valor promedio entre 1951-1998; SAG, 1957-77, SERNAP, 1978-1994 y SERNAPESCA, 1995-97), lo cual la posiciona como la segunda área mas importante del país. En esta zona la pesquería se basa fundamentalmente en el recurso anchoveta (Engraulis ringens), y en menor medida en jurel (Trachurus symetricus), caballa (Scomber Japonicus) y sardina (Sardinops sagax), especies que poseen importantes fluctuaciones anuales, interanuales e interdecadales (Yáñez et al., 2001). La variabilidad temporal en la distribución y abundancia de estos recursos se vinculan en muchos casos a cambios del medio ambiente (procesos denso-independientes). Sin embargo los procesos físicos involucrados en esta variabilidad aun no han sido definidos y mucho menos las características del acoplamiento ambiente-recurso. claramente Recientes estudios oceanográficos realizados en el sistema de corrientes de Perú-Chile han identificado a las ondas atrapadas a la costa, ondas de Rossby, y a los remolinos y meandros de mesoescala, como los procesos físicos dominantes en la variabilidad de baja frecuencia (Hormazabal *et al.*, 2002, 2004; Pizarro *et al.*, 2002). Estos procesos físicos tienen diversas escalas espaciales y temporales, siendo observados en otras regiones del océano como uno de los factores que contribuyen al equilibrio entre la fuente de nutrientes hacia la capa fótica y la producción primaria (Cipollini *et al.*, 2001; Uz *et al.*, 2001; McGillicuddy *et al.*, 1998; Chávez *et al.*, 1998). Algunas teorías pesqueras atribuyen gran importancia a la variabilidad de las corrientes y estructuras de meosescala (remolinos y corrientes de meandro) en la distribución y abundancia de los recursos en sus diferentes etapas de desarrollo. En el caso particular de la pesquería del norte de Chile, aún no se ha determinado claramente el vinculo entre los procesos físicos que aparecen como dominantes de la variabilidad del ambiente y la variabilidad espacial y temporal de los recursos.

El comportamiento y distribución de los recursos pelágicos en la zona norte están fuertemente ligados a las condiciones bio-oceanográficas existentes en litoral de la I y II Regiones. Por esta razón, desde el año 1964 el país viene realizando cruceros bio-oceanográficos estacionales en la zona norte, cuyos resultados han contribuido con información actualizada y oportuna para explicar el comportamiento de los recursos pelágicos: anchoveta, sardina española, caballa y jurel frente a anomalías oceanográficas, y han entregado datos sobre la abundancia y distribución mediante índices de densidad y cobertura geográfica.

Actualmente se cuenta con una larga serie histórica de información disponible sobre variables y parámetros que describen procesos ambientales, que dan cuenta de importantes fluctuaciones de corta frecuencia (Fase cálida y fría del ciclo El Niño Oscilación del Sur, ENOS) y fluctuaciones de baja frecuencia (cambio climático del largo plazo). Se sabe que las condiciones ambientales tienen directa influencia en la disponibilidad de alimento, desove, y sobrevivencia de los huevos y larvas de peces. Se han planteado varias hipótesis sobre la distribución de los recursos en relación al ambiente, determinándose algunas relaciones funcionales. Sin embargo, aún se desconocen los procesos y mecanismos del ambiente marino que explican en forma directa la dinámica de poblaciones en los recursos pelágicos. El desafío es el diseño de indicadores que integren las componentes

oceanográficas, biológicas y pesqueras orientadas a apoyar la toma de decisiones de administración pesquera.

En el contexto precitado, el Consejo de Investigación Pesquera teniendo presente lo informado al efecto por la Subsecretaría de Pesca, y la conveniencia de robustecer una línea de investigación bio-oceanográfica y su aplicabilidad directa en la fundamentación de medidas de administración, ha decidido incluir el presente proyecto en el programa de investigación pesquera correspondiente al 2003.

# 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para cumplir con los objetivos de los términos básicos de referencia propuestos, se planteó la siguiente metodología de trabajo:

# 3.1. Zona de estudio

La zona de estudio comprende el área de operación de la flota cerquera de la zona norte de Chile (I y II Región), desde la costa (primeras 5 millas náuticas (mn)) hasta las 200 mn (Fig. 1).



Figura 1. Área de estudio (en el cuadro azul) y batimetría (en colores).

## 3.2. Base de datos

## **3.2.1.** Datos ambientales

Representan información de la zona de estudio obtenida de estaciones meteorológicas y oceanográficas ubicadas en la costa; cruceros de investigación; y satélites. Las variables corresponden a temperatura superficial del mar, nivel del mar, temperatura del aire, magnitud y dirección del viento, salinidad, oxígeno y clorofila *a*; además de índices climáticos del Pacífico.

- Estaciones costeras. La base de datos corresponde a registros de magnitud y dirección del viento, temperatura del aire, temperatura superficial y nivel del mar, provenientes de estaciones ubicadas en aeropuertos y puertos de la zona de Arica-Antofagasta.
  - Magnitud y dirección del viento: del Servicio Meteorológico de Chile (SMCH), entre 1950 y 2002.
  - Temperatura del aire (TA): del SMCH, entre 1919 y 2002.
  - Temperatura superficial del mar (TSM): del Servicio Hidrógráfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), entre 1946 y 2002.
  - Nivel del mar (NM): del SHOA, entre 1946 y 2002.
- Cruceros de investigación: representan información ambiental de estaciones de muestreo en la columna vertical, realizadas en cruceros de condiciones bio-oceanográficas y de reclutamientos:
  - Cruceros de condiciones bio-oceanográficas: se miden temperatura (T), salinidad (S%), oxígeno (O) y clorofila *a* (CLOA) en la columna de agua (0-200 m), en estaciones de muestreo georreferenciadas. Los datos del Fondo de Investigación Pesquera (FIP) estarían disponibles desde 1993; los de CORPESCA desde

1980 (Cañón, com. pers.); y los del CENDOC desde 1965 (Bravo, 2003).

- Cruceros de evaluación directa del reclutamiento: se registra la T, S%, O y CLOA en la columna de 0-200 m, durante los muestreos de los cruceros en cuestión. Estos cruceros se ejecutaron a traves de proyectos FIP han sido ejecutados entre 1993 y 2002.
- Información satelital. Se trata de información ambiental del tipo raster, o matricial, o imágenes derivadas con técnicas de interpolación de datos de sensores remotos de satélites meteorológicos y oceanográficos.
  - TSM: datos semanales de satélites NOAA, que abarcan el periodo 1987-2002, con una resolución de *1km x 1km* y una cobertura espacial que comprende el área de estudio.
  - Anomalias del Nivel del Mar (ANM): combinación de los altímetros de los satélites Topex/Poseidón y ERS-1/2. Los datos están a intervalos de diez días, para el periodo 1991-2001, con una resolución espacial de 0,25°x0,25° y una cobertura global. Desde 1991 se dispone de datos semanales de ANM proporcionadas por AVISO-CLS, con una resolución espacial de 1/3° y corresponden a una combinación de los altímetros de los satélites Topex/Poseidón, ERS-1/2 y Jasón.
  - Concentración de clorofila a (CLOA): en Imágenes confeccionadas con datos de satélites SeaStar y Terra & Aqua, disponibles entre 1997 y 2002.
  - Magnitud y dirección del viento (MDV): promedios semanales del periodo 1991-2002, estimados de datos de los satélites ERS-1/2 y QuikSCAT. Los del ERS-1/2 con resolución espacial 1°x1° y cobertura global. Las observaciones diarias del QuikSCAT son de cobertura global y resolución espacial de 0,25°x0,25°; éstos serán reducidos a promedios semanales y llevados a la grilla de ERS-1/2.

- Indices climáticos. Representan índices relacionados con las oscilaciones interdecadales del Pacifico y los ENOS, elaborados por centros climáticos mundiales y de libre disposición.
  - Índice de la Oscilación del Sur (IOS): disponible en http://ingrid.ldgo.columbia.edu/.
  - TSM de las regiones Niño 3+4 y Niño 1+2: disponibles en <u>http://www.cpc.ncep.noaa.gov.</u>
  - Oscilación Decadal del Pacifico (PDO): disponible en <u>http://ingrid.ldgo.columbia.edu/</u>.

## 3.2.2. Datos biológicos

Se trata de información sobre la distribución y abundancia de los recursos en cuestión. Las variables biológicas disponibles a nivel espacial y temporal serían la biomasa, el reclutamiento y el número de huevos & larvas.

## • Evaluaciones de stock

- Biomasa: estimada en proyectos del FIP y del Banco Integrado de Proyectos (BIP), para: anchoveta (1984–2001), sardina (1974–2001) y jurel (Chile) (1975-2001).
- Reclutamiento: estimado en proyectos FIP y BIP, para: anchoveta (1984-2001); sardina (1974-2001) y jurel (Chile) (1975-2001).
- Evaluaciones del ictioplancton: evaluaciones FIP del número de huevos y larvas, particularmente de anchoveta (1993-2002).

#### **3.2.3. Datos pesqueros**

Los datos corresponden a las estadísticas de pesca y a los registros de la actividad operacional de embarcaciones cerqueras industriales.

- Estadísticas de pesca: Anuarios Estadísticos de Pesca que elabora anualmente el Servicio Nacional de Pesca (1978-2002), y anteriormente el Servicio Agrícola y Ganadero (1950-1977).
- Actividad operacional: representada en registros georreferenciados por embarcación, relacionados con los esfuerzos de pesca y capturas por especie (1973-2002).

# 3.3. Objetivo específico 1

Describir y analizar la dinámica del ambiente oceánico de la zona norte de Chile identificando cambios de régimen, cambios decadales, interanuales estacionales e intraestacionales y su relación con la abundancia de los recursos pelágicos y/o de sus estadios tempranos de desarrollo en la zona norte de Chile

# 3.3.1. Fluctuaciones temporales y espaciales de variables ambientales

Los principales forzantes de la variabilidad decadal y de los cambios de régimen aún no han sido establecidos por la comunidad científica internacional. Actualmente se están realizando grandes esfuerzos para entender esta componente de la variabilidad climática, permaneciendo aún como una gran interrogante. En todo caso, un cambio de régimen debiera producir cambios organizados en una variedad de aspectos biológicas y ambientales; por lo que un un apropiado índice de cambio de régimen debiera probablemente tener una connotación multi-dimensional y multivariada (Hare y Mantua, 2000; Bakun y Broad, 2001).

Por otra parte, los forzantes de la variabilidad intra-estacional, estacional e interanual en la zona norte de Chile pueden estar vinculados a perturbaciones originadas por los vientos de la zona ecuatorial (ondas Kelvin ecuatoriales que dan origen a las ondas atrapadas a la costa y ondas Rossby), y localmente por los vientos presentes en la región, o también por una combinación de varios factores que influyen en los cambios de vorticidad en la columna de agua de la zona costera, que da origen a los remolinos y meandros de mesoescala. La variabilidad física del ambiente, vinculada a la dinámica de ondas ecuatoriales, abre un potencial de predictabilidad de las condiciones oceanográficas frente a Chile con varios meses de anticipación. Debido a esto, el análisis de las fluctuaciones temporales y espaciales del ambiente será abordado considerando la información disponible sobre la zona de estudio y la zona ecuatorial.

Así, el análisis de las variaciones temporales tomará en cuenta la información disponible de estaciones oceanográficas y meteorológicas ubicadas en la zona, considerando los promedios mensuales de TSM, NM, TA y vientos; además de los promedios mensuales de

los índices de gran escala en el Pacífico (IOS y PDO). Con la información del viento (dirección y magnitud) se estimarán los promedios mensuales de los índices de surgencia (Bakun, 1973) y de turbulencia (Elsberry y Garwood, 1978). Luego, las series serán sometidos a un control de calidad (removiendo datos erróneos y completando brechas). Posteriormente las series serán analizadas estadísticamente, describiendo su estructura y principales características.

Por otra parte, las variaciones espacio-temporales de las características superficiales del mar serán analizadas con información satelital disponible, haciendo uso de sistemas de información georreferenciada (SIG) (ejemplo, SIG-IDRISI). De esta forma se analizarán la TSM, CLOA, vientos superficiales y corrientes geostróficas. Así se identificarán los principales fenómenos que afectan la zona periódicamente (surgencia, filamentos, remolinos) y cada cierta cantidad de años (ENSO, cambios de régimen).

Finalmente, las variaciones oceanográficas en la columna de agua se analizarán utilizando los datos de cruceros de investigación realizados en la zona de estudio. Esta información permitirá conocer especialmente la variación de la profundidad de la capa de mezcla y de la termoclina, además de algunos aspectos de la dinámica de los procesos de surgencia.

Las principales características de las fluctuaciones de baja frecuencia en la región (cuando ocurren, con que periodicidad y cuan importantes son), serán determinadas utilizando algunas técnicas estadísticas empleadas para el análisis en el dominio del tiempo (por ejemplo: análisis de correlación, correlación cruzada, funciones ortogonales empíricas (FOE), etc), de la frecuencia (por ejemplo: análisis espectral, coherencia y fase, espectro rotatorio, etc), del tiempo y la frecuencia (por ejemplo: análisis de wavelets, crosswavelet, wavelets rotatorias), y del espacio y el tiempo (por ejemplo: FOE, FOE extendidas, FOE rotadas, descomposición del valor singular SVD). Estas técnicas permitirán establecer relaciones entre las distintas variables oceanográficas y los recursos pelágicos, lo cual contribuirá a identificar variables ambientales claves en relación a la variabilidad de los recursos.

El origen de las perturbaciones en la zona de estudio será determinado a través del análisis estadístico de las series de tiempo de estaciones costeras, combinadas con resultados provenientes de modelos numéricos de complejidad intermedia (modelo lineal del vorticidad para ondas Kelvin y ondas de Rossby forzadas por vientos ecuatoriales). El modelo numérico a utilizar corresponde principalmente a un modelo lineal de ondas Kelvin ecuatoriales (Gill y Clarke, 1974; Mcphaden y Yu, 1999), forzado por el esfuerzo del viento satelital. Además, como la teoría lineal sin fricción indica que a frecuencias suficientemente bajas la respuesta a lo largo del borde oriental del océano debe ser en fase, es decir no debe ocurrir una propagación de la perturbación a lo largo de la costa (Clarke, 1992), el nivel del mar estimado desde el modelo de propagación de ondas Kelvin ecuatoriales puede ser usado como forzante de ondas Rossby en la región de estudio (Pizarro et al., 2002). De esta forma se podrá determinar en que bandas de frecuencias (periodicidad característica) y cuando se presenta una variabilidad de la zona de estudio que se puede asociar a ondas de baja frecuencia forzadas en la zona ecuatorial, o a los vientos locales.

Las principales características de los remolinos y meandros de mesoescala serán identificadas a través del campo superficial de las corrientes geostroficas, identificadas a partir de las anomalías del nivel del mar, obtenidas del producto combinado de los altímetros de los satélites Topex/Poseidón y ERS-1/2. Para esto se utilizara la metodología descrita por Hormazabal et al. (en prensa). Posteriormente, utilizando técnicas estadísticas se analizarán relaciones que puedan existir entre las distintas estructuras de mesoescala identificadas en la región de estudio y la abundancia de los recursos pelágicos.

#### 3.3.2. Fluctuaciones temporales y espaciales de variables bio-pesqueras

Las fluctuaciones temporales de los recursos de interés se analizarán a través de los desembarques de la flota pesquera y por estimaciones de captura y del índice de abundancia relativa denominado captura por unidad de esfuerzo (CPUE), derivado del accionar de la flota cerquera de la zona norte. Se construiran series de tiempo las que serán analizadas estadísticamente con el objeto de determinar señales anuales, tendencias y anomalías. Además se considerarán las estimaciones de abundancia y reclutamiento a través de análisis

estructurados a la edad y por hidroacústica.

Por otra parte, la distribución espacio-temporal de las especies en cuestión será analizada considerando los registros operacionales de la flota cerquera que operó en la zona. Para tal efecto se considerará el índice de abundancia relativa CPUE, estimado mensualmente y debidamente georreferenciado. Este índice será utilizado para generar cartografías, analizadas estadísticamente para determinar las variaciones estacionales e interanuales de los recursos en cuestión, a través del SIG IDRISI y la geoestadística para los efectos de obtener mapas de interpolación de las variables en cuestión (Eastman, 2001).

Cabe señalar que la estimación de la CPUE y del esfuerzo de pesca implicará un proceso de estandarización a través de modelos lineales generalizados (MLG), que incluyen las interacciones siempre presentes en este tipo de análisis (McCullag y Nelder, 1989; Yáñez *et al.*, 1999).

También serán analizadas las distribuciones espaciales de abundancia estimadas por el método hidroacústico, que serán confrontadas con las correspondientes estimaciones espacio-temporales de CPUE. Al mismo tiempo se analizará la relación entre la CPUE y la biomasa estimada por VPA, siguiendo el enfoque de Harley *et al.* (2001). Cabe señalar que el coeficiente de capturabilidad (q) puede variar con la abundancia, el comportamiento del recurso, la estrategia de pesca y las condiciones ambientales, entre otros (Arrenguíz-Sánchez, 1996).

Finalmente, con las mismas metodologías de tratamiento de información espacial, serán analizadas las distribuciones de densidad del ictioplancton estimadas durante campañas científicas realizadas en la zona de estudio,

# 3.3.3. Relaciones entre la variabilidad ambiental y los recursos pesqueros

Las relaciones entre las fluctuaciones de las variables ambientales y de los recursos en cuestión se analizarán a través de programas especializados (CLIMPROD, S-PLUS, CLIMLAB2000, entre otros).

#### 3.3.3.1. Modelos de excedentes producción incluyendo variables ambientales

Se hará empleo del sistema experto-experimental CLIMPROD (Fréon *et al.*, 1993) para analizar las fluctuaciones anuales de captura y CPUE, considerando como variables explicativas el esfuerzo de pesca estándar y variables ambientales como TSM, índice de surgencia (IS), índice de turbulencia (IT), entre otras. Aplicaciones en pesquerías chilenas aparecen en Fréon y Yáñez (1995), Yáñez *et al.* (1998), Yáñez y Toro (1999),.

La incorporación de variables ambientales puede realizarse afectando el q y/o la abundancia. Su aplicación requiere de datos de desembarque, esfuerzo de pesca estándar (E) y variables ambientales (V). CLIMPROD ajusta los modelos usando rutinas de regresión no lineal y evalúa el ajuste a través de tests paramétricos y no parámetricos, proporcionando una representación gráfica de los resultados. Los modelos CLIMPROD tienen la capacidad de realizar predicciones de CPUE y captura, para una situación dada de E y V, destacándose como una herramienta para el manejo eficiente de pesquerías, especialmente cuando los fenómenos climáticos pueden ser pronosticados con anticipación.

#### 3.3.3.2. Modelos aditivos generalizados (MAG)

Se emplearán modelos aditivos generalizados (MAG) para analizar relaciones entre variables bio-pesqueras y ambientales (Hastie y Tibshirani, 1990). Estos modelos son una generalización no paramétrica de los modelos lineares generalizados (MLG), donde la función de enlace es relacionada a las variables predictoras ( $x_j$ ) por funciones suavizadoras (f) de diagramas de dispersión (Walsh y Kleiber, 2001).

Así se pueden analizar como variables explicativas tanto factores ambientales como espacio-temporales. Para analizar la relación entre las estimaciones de abundancia de los stocks adultos y el predictor  $\eta$ , se incluirá como variable respuesta la CPUE, la captura, la biomasa acústica y la biomasa estimada por APV. Por otra parte, para analizar la relación entre los estadíos tempranos de los stocks y el predictor  $\eta$ , se incluirán como variables respuestas las estimaciones de reclutamiento por APV y las estimaciones de huevos y larvas.

Se explorará la existencia de relaciones entre el ambiente y las anomalías estimadas de las variables pesqueras (captura y CPUE), como también la relación entre el ambiente y las variaciones de q. Los variables ambientales consideran los parámetros oceanográficas medidos en el plano horizontal y vertical.

# 3.3.3.3. Modelos lineales generalizados (MLG)

Estos modelos son una extensión del modelo lineal general y permiten modelar variables respuestas cuando la distribución del término del error pertenece a la familia exponencial (McCullag y Nelder, 1989). La respuesta media ( $\mu$ ) se relaciona a las variables predictoras ( $x_j$ ) a través de una función de enlace.

Se examinarán como respuestas las variables bio-pesqueras y como predictoras las variables ambientales, espaciales y temporales. Se plantea como alternativa, al momento de introducir los efectos en los MLG, considerar la forma de la relación obtenida previamente con los MAG. Así se intentará desarrollar modelos de tipo paramétrico que consideren los efectos no lineales de las variables.

# 3.3.3.4. Funciones ortogonales empíricas (FOE)

Las series temporales e imágenes espaciales de las variables oceanográficas, pesqueras y biológicas serán analizadas usando FOE, para aislar los modos más importante de variabilidad, con el programa CLIMLAB2000 (Tanco y Berri, 2000).

Las FOE permiten explorar relaciones entre variables (vectores, imágenes o matrices), permitiendo estimar índices cuantitativos. El análisis de las FOE se define como un número reducido de funciones que explican gran parte de la varianza contenida dentro de los datos. Los FOE no necesitan que las variables a analizar tengan una forma predeterminada, sino dependen de la interrelación de los datos. En aplicaciones oceanográficas, un conjunto de datos en función del tiempo y el espacio son descompuestos en funciones separadas de tiempo y espacio (Soto, 1999; Bello, 2001; Yáñez *et al.*, 2001).

Las FOE serán empleadas para determinar la variabilidad espacial y temporal en base a los patrones de varianza residual de las imágenes de TSM, CPUE, CLOA, salinidad, entre otros, considerando los primeros componentes de estas funciones, asociados a amplitudes para facilitar la interpretación (Bello, 2001).

# 3.3.3.5. Análisis espectral de Fourier

El análisis espectral de Fourier (Bendat y Piersol, 1972; Van Winkle *et al.;* 1979; Shumway, 1988), tiene por finalidad reconocer los patrones cíclicos en las series de datos. El propósito es descomponer una serie de tiempo compleja con componentes cíclicos, en una serie de funciones sinusoidales (senos y cósenos) de longitudes de ondas particulares.

Para desarrollar este análisis, primero se establecen series de tiempo de anomalías de las variables oceanográficas y pesqueras. Como las series de tiempo analizadas tienen un ciclo anual de 12 meses, el proceso de substracción en la transformación de la anomalía elimina el ciclo anual de la serie de tiempo. Cada serie de tiempo de la anomalía de las variables es suavizada mediante la transformación de la media móvil central de varios meses (normalmente 12). Las series de tiempo de las anomalías suavizadas son posteriormente estandarizadas.

El análisis espectral estudia las relaciones entre las series  $Z_t$ . El análisis provee un análisis sistemático de la varianza en función de la frecuencia, basándose en las funciones del modelo armónico, el cual expresa la función periódica de las series de tiempo  $Z_t$  como la suma del sinusoide y cosinusoide. Con el análisis espectral bivariado se calcula y grafican los espectros de coherencias cuadradas y de fase entre las variables dependientes (pesqueras) e independientes (oceanográficas) aplicando una ventana Hamming.

# **3.3.3.6.** Correlaciones cruzadas

Por otro lado se estudian las posibles relaciones entre las  $Z_t$  variables pesqueras (dependientes) y ambientales (independientes), realizando un análisis de la función de correlaciones cruzadas.

La correlación cruzada es el coeficiente de correlación entre una serie y otra, desplazada en un determinado número de observaciones. Si la expresión es calculada para todo los desfase d=0, 1, 2, ..., N-1, entonces resulta una serie de correlación cruzada del doble de la longitud de la serie original. Cabe señalar que la correlación cruzada no es necesariamente simétrica respecto del d=0.

#### 3.3.3.7. Análisis de wavelets

Las relaciones entre las ondas de baja frecuencia (ondas atrapadas a la costa, ondas de Rossby) y la distribución y abundancia de los recursos pelágicos y/o de sus estadios tempranos de desarrollo, serán determinadas a través del análisis estadístico de las series oceanográficas costeras, de los resultados provenientes del modelo de ondas ecuatoriales y de la información bio-pesquera. A través del análisis de wavelts de las series de tiempo costeras y de aquellas provenientes del modelo, se determinará en que bandas de frecuencia y durante que periodos estas ondas son mas energéticas. Posteriormente se clasificara la información de los recursos pelágicos de acuerdo a las distintas fases de estas ondas, y se emplearán estadísticos descriptivos básicos para determinar el grado de relación entre las distintas fases de las ondas de baja frecuencia y los recursos.

#### 3.4. Objetivo específico 2

Identificar variables proxies en el medio ambiente marino y biológico para la detección temprana de posibles cambios en el ecosistema debido a fluctuaciones ambientales

En el desarrollo de este trabajo se determinarán los periodos en que ocurren cambios en el ecosistema, a través del análisis de las series de tiempo de variables bio-pesqueras. Posteriormente, a través del análisis estadístico de las series de tiempo oceanográficas, se determinaran las fluctuaciones ambientales que se relacionan con esos cambios del ecosistema. Por último se identificaran las variables proxies, tanto físicas como biológicas, que podrían ser usadas para la detección temprana de cambios probables en el ecosistema debido a fluctuaciones ambientales.

Los periodos en que ocurren cambios en el ecosistema serán determinados a través del análisis de anomalías acumuladas. Posteriormente, a través de la construcción de una matriz de selección de variables y análisis estadísticos, se determinarán las variables biológicas (variables proxies) que mejor se relacionen con los cambios en el ecosistema.

Las fluctuaciones ambientales que se relacionan con los cambios del ecosistema, identificadas en la región de estudio, serán determinadas a través de análisis estadísticos de series de tiempo (análisis en el dominio del tiempo, la frecuencia y tiempo-frecuencia). Para esto se emplearán las series de tiempo de las estaciones oceanográficas y meteorológicas costeras, además de los índices climáticos (IOS, PDO). En el caso que las restricciones del análisis de series de tiempo no permitan determinar las relaciones entre las fluctuaciones del ambiente y los cambios del ecosistema, se procederá a realizar un estudio de casos enfocado en los períodos en que ocurren estos cambios. En el estudio de casos se utilizará toda la información oceanográfica, meteorológica y climática disponible para la región, de tal forma de identificar las variables del ambiente (variables proxies) que se vinculan con los cambios del ecosistema.

Para identificar las variables proxies en la detección temprana de posibles cambios en el ecosistema debido a las fluctuaciones ambientales, se realizará "un análisis de matriz de selección de variables del medio ambiente marino físico y biológico". Como instrumento

de evaluación para la selección de variables proxies se elaborará una matriz de comparación que incorpora los grados de correlación o nivel de explicación de cada variable para las distintas fluctuaciones estimadas en el objetivo 1. El nivel de explicación se mide en una escala de 0 a 1 y se seleccionarán solamente aquellas variables ambientales y bio-pesqueras que presentan un mayor valor de correlación.

# 3.5. Objetivo específico 3

Caracterizar los patrones espacio-temporales del reclutamiento de los recursos pelágicos en relación con los parámetros del hábitat que han definido su éxito o fracaso

# 3.5.1. Variabilidad del reclutamiento, densidad-dependencia, densidad-independencia y procesos estocásticos

Uno de los aspectos relevantes en el análisis de la dinámica poblacional subyace en distinguir la importancia relativa de los factores densidad-dependientes e independientes (Royama, 1992; Lima, 2001). Es bien sabido que la anchoveta, como otros peces pelágicos pequeños, exhibe grandes fluctuaciones en su abundancia poblacional, dominada principalmente por cambios en el reclutamiento. Por lo general, se asume que la variabilidad del reclutamiento es determinada por factores densidad-independientes durante los primeros estadios de vida o bien durante la fase prerrecluta (Cole y McGlade, 1998). Sin embargo, la importancia de los factores densidad-dependientes en interacción con factores ambientales cada vez se considera más en el análisis integrado de la dinámica poblacional (Lima, 2001).

En particular, varios estudios teóricos y empíricos indican que la interacción densidaddependientes entre diferentes edades podrían generar un espectro en el cual se pueden identificar ciclos de comportamiento dinámico determinista (Higgins *et al.*, 1997<sup>a</sup> y b). En el bacalao (*Gadus morhua*), fluctuaciones de alta y baja frecuencia en el grupo de edad 0 pueden ser explicados por la interacción entre la estocasticidad ambiental y la densidaddependencia intra e inter-cohortes (Bjørnstad *et al.*, 1999; Stenseth *et al.*, 1999). Sin embargo hay pocos estudios que han tratado de modelar o integrar ambos tipos de influencia en la dinámica de peces pelágicos pequeños.

Para los fines del presente proyecto, se intentará desarrollar un modelo matemático que incluya procesos denso-dependientes e independientes como modelos estocásticos para analizar que ambos factores pueden explicar conjuntamente la dinámica poblacional de la anchoveta de la zona norte de Chile.

La anchoveta, en particular, se caracteriza por el reducido número de grupos de edad presentes en la población y se ha postulado que la variabilidad ambiental tiene notable influencia en los cambios de abundancia y disponibilidad. Para los propósitos de este proyecto, se postula que la dinámica poblacional de anchoveta es el resultado del forzamiento de una estructura retroalimentada (densidad-dependiente), factores climáticos y estocásticos. Para comprender como tales factores pueden determinar fluctuaciones poblacionales, se considera el siguiente esquema conceptual:



Esquema del modelo que ilustra las interacciones potenciales entre el efecto trófico modulados indirectamente y directamente por factores ambientales.  $N_t$  representa la abundancia poblacional, las funciones f, g y h describen los cambios en la población según las interacciones dadas por la dirección de las flechas y definidas por las derivativas parciales.

Las interacciones de dichas relaciones pueden ser representadas por un modelo general en términos del proceso reproductivo y sobrevivencia de los individuos (Berryman y Gutierrez, 1999), representado como una variante del modelo logístico discreto de Ricker

influenciado por alimento, clima y factores estocásticos. La dinámica se puede representar por:

$$N_{t} = N_{t-1} \exp(\alpha + f(N_{t-1}) + g(C_{t}) + h(C_{t-1}) + \varepsilon_{t})$$

donde *N* es la abundancia poblacional, *C* representa factores climáticos. Las funciones  $f(\bullet)$ ,  $g(\bullet)$  y  $h(\bullet)$  representan los efectos de la densidad y forzamiento climático directo e indirecto sobre la dinámica poblacional, mientras que  $\varepsilon_t$  representa perturbaciones aleatorias estocásticas. Una forma alternativa de expresar el modelo anterior se basa en la tasa de crecimiento poblacional per capita, que representa el proceso de sobrevivencia y reproducción que conduce la dinámica poblacional y que se conoce como una función R (Berryman, 1999). Se define  $R_t = \ln(N_t) \cdot \ln(N_{t-1})$ , y la función se expresa por:

 $R_t = \alpha + f(N_{t-1}) + g(C_t) + h(C_{t-1}) + \varepsilon_t$ 

Este modelo representa la estructura básica de retroalimentación e integra el forzamiento climático y estocástico que conduce la dinámica poblacional. Sobre la base de esta formulación, se requiere identificar una familia de formas funcionales para las funciones  $f(\bullet)$ ,  $g(\bullet)$  y  $h(\bullet)$  utilizando datos de series de tiempo. Para ello, se utilizará modelos aditivos generalizados (GAM; Hastie y Tibshirani, 1990), utilizando "natural cubic splines", utilizando S-PLUS 2000.

Alternativamente, se analizará un modelo edad-estructurado densidad-dependiente con interacción climática y estocasticidad. En este caso, el proceso reproductivo se define como la transición desde la época de desove hasta el reclutamiento, definido como la abundancia ó índice de abundancia del grupo de edad 0. Se considera que el proceso reproductivo es altamente variable interanualmente y que las fuentes de esta variabilidad son el resultado de factores densidad-independientes, densidad-dependientes, variables oceanográficas-climáticas y estocasticidad. El proceso reproductivo se modelará según el siguiente modelo general:

 $R_{t} = \exp(\alpha + f(S_{t-1}) + g(C_{t-1}) + h(C_{t}) + \varepsilon_{t})$ 

donde  $R_t$  representa la tasa reproductiva per capita (número de individuos producidos por la población adulta o desovante),  $\alpha$  representa la tasa reproductiva en ausencia de factores densidad-dependientes, factores climáticos y estocasticidad;  $f(S_{t-1})$  es una función densida-

dependiente de los adultos desovantes,  $g(C_{t-1})$  y  $h(C_t)$  representan funciones que toman en cuenta variables oceanográficas-climáticas indirectas y directas, mientras que  $\varepsilon_t$  se distribuye normal con promedio igual cero y varianza constante ( $\sigma^2$ ). La tasa reproductiva se estimará a partir de los datos disponibles. Para evaluar los modelos funcionales relacionados con los factores densidad-dependientes y oceanográficos-climáticos, se utilizará el criterio de información de Akaike corregido para muestras pequeñas (AICc). El mejor modelo corresponderá al que minimize el AICc, según:

AICc = -2(logL)+2p+2(p+1)(p+2)/(n-p-2)

donde  $\log L$  es la log-verosimilitud, p es el número de parámetros y n el tamaño de muestra.

Una diferencia  $\leq 1$  en AICc se puede considerar no significativa, aspecto que resulta ser una regla basada en la experiencia en procedimientos de selección de modelos basados en el criterio de información (Burnham y Anderson, 1998; Lima *et al.*, 2000).

La producción de reclutas, abundancia o índice de abundancia del grupo de edad 0 en el año siguiente, quedará definido según:

$$N_{0,t+1} = S_t \exp(\alpha + f(S_t) + g(C_t) + h(C_{t+1}) + \varepsilon_t)$$

Este modelo general tendrá la forma Ricker si la función densidad dependiente es  $f(S_t) = -\beta S_t$ . A su vez, con el objeto de analizar posibles interacciones densidad-dependientes intra e inter-cohortes que podrían reducir la sobrevivencia de diferentes clases de edad (Lima *et al.*, 2000), la transición a través de diferentes edades puede ser formalizada según las siguientes expresiones:

$$N_{i,t+1} = N_{i-1,t} \left( \frac{1}{1 + \exp(-(\beta - \gamma N_{0,t} - \mu S_t))} \right)$$

0

$$N_{i,t+1} = N_{i-1,t} \left( \frac{1}{1 + \exp(-(\beta - \gamma \ln(N_{0,t}) - \mu \ln(S_t)))} \right)$$

donde  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\mu$  representan constantes positivas determinando la sobrevivencia densidaddependiente en tamaños poblacionales bajos, la reducción en la tasa de sobrevivencia debido al efecto del reclutamiento y de adultos, respectivamente. Estos modelos se evaluarán sobre la tasa de sobrevivencia de cada grupo de edad utilizando modelos lineales generalizados (GLM; McCullagh y Nelder, 1989) utilizando una estructura de error binomial y una función de enlace logit. El objetivo del análisis es evaluar si el número de reclutas o la abundancia de adultos son mejores predictores de las tasas de sobrevivencia edad-específicas y la fortaleza de las interacciones intra e inter-cohortes (Bjørnstad *et al.*, 1999).

El modelo conceptual considera que los efectos ambientales, pueden impactar directamente a una población a través de efectos fisiológicos (metabolismo y proceso reproductivo) o indirectamente a través del ecosistema, incluyendo la oferta trófica, predadores, y competidores. Sobre la base de estas dos formas de impacto, se considera que la variabilidad ambiental en la zona norte podría tener un efecto retardado en la dinámica poblacional de la anchoveta a través del impacto en el proceso reproductivo. En otras palabras, los individuos nacidos en un año en particular pueden ser más o menos abundantes dependiendo de las condiciones ambientales presentes en el año de nacimiento. Las cohortes más abundantes, generadas durante condiciones ambientales favorables, podrían ser determinantes en la tasa de sobrevivencia intra-cohorte, afectando la dinámica de la población durante toda su esperanza de vida.

# **3.5.2.** Predicción del reclutamiento utilizando relaciones funcionales ambientereclutamiento

La inclusión de la variabilidad ambiental en los modelos de reclutamiento ha permitido reducir significativamente la varianza no explicada por los modelos convencionales (e.g. Fournier, 1983; Quinn y Niebauer, 1995; Chen y Ware, 1999). El primer paso, para generar modelos que incluyan variables ambientales, además de la dinámica poblacional intrínsica, es conocer las funciones empíricas que relacionan algún parámetro poblacional con las variables ambientales. En Chile se han llevado a cabo numerosos estudios que muestran las relaciones empíricas de ambiente-recurso (e.g. Yáñez *et al.*, 1996, 2001; Montes y Quiñónez, 1999). Sin embargo, las aproximaciones donde modelan explícitamente las variables ambientales en la dinámica poblacional, aun son limitadas (Loucks y Sutcliffe, 1978; Ultang; 1996). Esto se debe a que pocas veces es posible conocer las relaciones

funcionales del ambiente y su relación en la dinámica poblacional. En este contexto, aquí proponemos generar una aproximación para el reclutamiento que incluya explícitamente las formas funcionales ambiente-recurso (derivadas de estudios empíricos), con la dinámica poblacional clásica. Se usaran ponderadores de parsimonia y coeficientes de determinación de las relaciones funcionales ambiente-reclutamiento para dar un peso relativo a la variabilidad ambiental y a la dinámica poblacional.

Primero, indicaremos que la relación entre el reclutamiento y una variable ambiental particular, puede tomar cualquier forma funcional. Así, aquella variable ambiental más probable en modificar los reclutamientos, como por ejemplo la temperatura superficial del mar, el índice de surgencia, entre otras, pueden ser incluidas para hacer una estimación de reclutamiento y sus resultados promediados para obtener una estimación total. Sin embargo, este enfoque perece no ser el más adecuado, debido a que las relaciones funcionales ambiente-recurso presentan diferente grado de parsimonia en la estimación del reclutamiento, con lo que el peso relativo de cada relación funcional puede ser diferente. Si conocemos que los criterios de información automáticos (AIC) son una herramienta robusta en la comparación de modelos que explican un mismo proceso (Quinn y Deriso, 1999) y proveen una adecuado criterio de parsimonia, entregando un balance entre el valor de verosimilitud y la cantidad de parámetros, usaremos este criterio para ponderar los reclutamientos provenientes de las diferentes funciones exploratorias. De esta manera, se entregará más peso relativo al calculo final del reclutamiento aquella función ambiental que presente menor valor AIC. De esta forma, el promedio ponderado del reclutamiento solo debido a la componente ambiental  $(R_A)$  es:

$$R_{A} = \frac{\frac{f(A_{1})}{AIC_{1}} + \frac{f(A_{2})}{AIC_{2}} + \dots + \frac{f(A_{n})}{AIC_{n}}}{\frac{1}{AIC_{1}} + \frac{1}{AIC_{2}} + \dots + \frac{1}{AIC_{n}}}$$

donde f(A) es una función ambiental, provenientes de estudios empíricos con probabilidad de modificar el reclutamiento. Así, la forma algebraica que tengan estas funciones es libre y su AIC indica el grado de peso relativo que representa.

Por otra parte el reclutamiento, desde un punto de vista de la dinámica poblacional, podría ser estimado a partir de las relaciones stock-reclutas clásicos o a través de un modelo edad estructurado:

$$R_{R} = \alpha S e^{-\beta S}$$
$$R_{B-H} = \frac{\alpha S}{1 + \beta S}$$

para el modelo de Ricker y Beverton-Holt respectivamente, donde *S* es el stock desovante,  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes. Un modelo edad estructurado para el reclutamiento es:

$$R_e = \gamma \sum_{i=1}^{T} N_i P_i F_i$$

donde N, P y F, son la abundancia, madurez y fecundidad en la edad i,  $\gamma$  es la sobrevivencia en los estadios tempranos.

Así una estimación del reclutamiento ( $R_T$ ), que incluye la(s) componente(s) ambientales y la dinámica poblacional explícitamente es:

$$R_T = t^2 R_A + (1 - t^2) R_d$$

donde  $\hat{r}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2$ , con  $r^2$  es el coeficiente de determinación, que da cuenta del

porcentaje de variabilidad explicada por la i función ambiente-recurso. De esta forma se pondera en el calculo final del reclutamiento el grado de explicación que presentan las funciones ambientales, en comparación con aquellas provenientes de dinámica poblacional (Ricker, Beverton-Holt, edad estructura). Esta aproximación incluiría directamente las relaciones empíricas encontradas en ambiente-recurso dando un peso relativo de acuerdo a la parsimonia y el grado de explicación de varianza en el reclutamiento. Por otra parte, permitiría actualización año a año al incorporar nueva data tanto en la parte ambiental como el la netamente poblacional.

#### 3.5.3. Caracterización espacio-temporal del reclutamiento

Se considerará las estimaciones anuales del reclutamiento desarrolladas por el Grupo de Trabajo IFOP-IMARPE, consistentes en la abundancia del grupo de edad 0. Considerando que el proceso reproductivo se define como la transición desde la época de desove hasta el reclutamiento, se asumirá que las variaciones anuales en el reclutamiento se reflejan en la distribución espacial de algunas variables ambientales como la TSM, la que puede ser evaluada a través de la distribución espacial del coeficiente de correlación. Por lo tanto, se utilizará el programa CLIMLAB2000.

# 3.5.4. Análisis de sincronía de tres poblaciones de anchoveta

En el Sistema de Corrientes de Humbold (SCH) la anchoveta (*Engraulis ringens*) tendría tres stocks discretos. El más productivo de éstos se encuentra en el centro-norte de Perú (4°-15°S), otro es compartido entre el sur de Perú y la zona norte de Chile (16°-27° S), y el más austral y menos abundante se localiza en Chile centro-sur (34°-40° S). En estos stocks de anchoveta han ocurrido fluctuaciones importantes en el tamaño de las poblaciones en los últimos 30 años, incluyendo regímenes baja abundancia en que la anchoveta ha sido reemplazada por sardina *Sardinops sagax* (Yáñez *et al.*, 1989; Chávez *et al.*, 2003). Los regímenes de alta y baja abundancia tienen importantes consecuencias sobre la estructura, dimensión y dinámica de las pesquerías, y las causas de cambios de régimen están siendo intensivamente estudiados (Schwartzlose *et al.*, 1999).

Para los fines del presente proyecto, y con el objeto de caracterizar y describir patrones sincrónicos de fluctuación en los tres stocks de anchoveta, se intentará separar componentes de variabilidad de largo y corto término utilizando datos de captura anual. Aunque la evidencia empírica sugiere la existencia de dicha sincronía, ésta no se ha evaluado estadísticamente. La historia de la captura de los stocks de anchoveta podrían revelar coherentes fluctuaciones de largo plazo en la productividad de los stocks de anchoveta debido a que estas especies son de corto ciclo de vida.

Los datos de captura anual de anchoveta serán obtenidos para conformar una serie de tiempo que cubra el periodo 1960-2002. Para el stock Norte-Centro de Perú (NCP) y stock del sur de Perú-Norte de Chile (SPNCh) se utilizará los datos publicados por Schwartzlose *et al.* (1999), y actualizados desde el sitio web de IMARPE (www.imarpe.gob.pe); mientras que los datos de desembarque para el stock del sur de Chile (SCh) serán obtenidos de los

registros oficiales de desembarque que lleva el Servicio Nacional de Pesca. Se utilizarán los registros de desembarque porque los índices de abundancia no cubren un periodo largo de tiempo para los tres stocks. Se considera, que clases anuales abundantes y pobres que reclutan son percibidas directamente por los pescadores y por lo tanto se reflejan directamente en los datos de captura.

La representación más simple de patrones de abundancia o productividad es un incremento o decremento temporal, cuya tendencia puede ser evaluada a través de regresión lineal. Para evaluar la variabilidad en escalas de largo y corto término, la técnica conocida como regresión local ponderada ó suavizador loess (Cleveland, 1979) será aplicada a cada conjunto de datos. La ventana de suavizamiento (span) será igual a 0,3 veces la longitud de la serie de datos. Los residuales entre los datos originales (observados) y los datos suavizados se definirán como variación de corto término o variación de alta frecuencia. La proporción de varianza explicada por la tendencia suavizada puede ser evaluada a través del coeficiente de determinación,  $r^2 = 1-[Var(residuales)/Var(observados)]$ . Los residuales entre los datos suavizados y la tendencia lineal se definirá como variabilidad de largo término o de baja frecuencia. Análisis de regresión se aplicará para determinar la relación entre los componentes de alta y baja frecuencia entre los tres stocks de anchoveta. Se analizara la influencia de El Niño-Oscilación del Sur sobre los componentes de alta frecuencia en los stocks de anchoveta, utilizando para esto la temperatura de las regiones Niño 3.4 y El Niño 1+2.

# 3.6. Objetivo específico 4

Desarrollar un modelo conceptual explicativo que permita integrar la variabilidad del ambiente marino y la dinámica de poblaciones de recursos pelágicos de la zona norte de Chile

Basados en los resultados del proyecto y antecedentes bibliográficos, se desarrollarían modelos conceptuales que sustentan la hipótesis que se plantea al respecto de que "diferentes fenómenos locales y de gran escala afectarían el ambiente oceánico del norte de Chile, y por lo tanto la distribución y abundancia de los principales recursos pelágicos".

En la escala interanual se considera un modelo conceptual que describa las asociaciones entre los cambios bio-pesqueros con los eventos El Niño y La Niña. Para tal efecto se esquematizarían los cambios detectados en los indicadores ecosistémicos a nivel de la estructura térmica del mar, biomasa de recursos y productividad. Para el desarrollo del modelo conceptual en cuestión se seguiría un enfoque metodológico similar al de Chávez *et al.* (2002), quienes estudian los impactos del El Niño 1997-1998 en las aguas de California central y definen un modelo conceptual de los cambios ecosistémicos asociados (Fig. 2). El modelo describe en la escala interanual las relaciones establecidas entre la abundancia y distribución de los recursos en sus diferentes estados de desarrollo y los niveles de temperatura, salinidad, clorofila, altura del mar y zooplancton, entre otros.



Figura 2. Modelo conceptual sobre cambios en el ecosistema de California asociados a eventos El Niño y en condiciones normales (Chávez *et al.*, 2002).

En la escala interdecadal se establecería un modelo conceptual sobre las fluctuaciones de los recursos pelágicos pequeños (anchoveta y sardina) asociados con cambios de gran escala temporal en la temperatura, IOS e índice de surgencia, entre otros. El modelo se basaría en los resultados obtenidos del análisis de relaciones de largo plazo entre series de tiempo de variables ambientales y bio-pesqueras. Se establecerían los cambios de régimen (régimen de anchoveta y sardina) y se sintetizarían las condiciones ambientales asociadas a cada régimen. Se seguiría un enfoque metodológico similar al desarrollado por Chavez *et al.* (2003), que estudian la variabilidad de largo plazo (50 años) de la anchoveta y sardina, asociados a grandes cambios de la condición ambiental del Océano Pacífico (Fig. 3).



Figura 3. Modelo conceptual sobre la variabilidad de indicadores ecosistémicos y cambios de régimen en una escala de largo plazo o multidecadal (Chavez *et al.*, 2003).

## 3.7. Objetivo específico 5

Diseñar indicadores que integren las componentes oceanográficas, biológicas y pesqueras orientadas a apoyar la toma de decisiones de administración pesquera de los recursos pelágicos en la zona norte de Chile (I y II Región).

La finalidad de los indicadores es mejorar la comunicación, transparencia, eficacia y rendición de cuentas en la ordenación de los recursos naturales (FAO, 1999). Los indicadores ayudan en el proceso de evaluación del funcionamiento de las políticas y ordenación pesquera a nivel mundial, regional, nacional y subnacional. Además proporcionan un instrumento de fácil comprensión para describir la situación de los recursos y de las actividades pesqueras, lo cual permite evaluar las tendencias relacionadas con los objetivos del desarrollo sustentable.

Dentro de este contexto, Jordan (2001) define los elementos necesarios para el desarrollo de indicadores: Por su parte, el Comité Científico de la Investigación del Océano (SCOR/COI) creó un grupo de trabajo (Nº 119) orientado a recomendar indicadores cuantitativos para el manejo de la pesca (SCOR, 2001). Así, Cury y Christensen (2001) definen los tipos de indicadores cuantitativos del ecosistema y un enfoque metodológico para el manejo de pesquerías:

De acuerdo con FAO (1999), hay una gran cantidad de indicadores que se utilizan en la pesca y otros tantos que podrían utilizarse. Por lo tanto, se necesita un sistema para elaborar, organizar y utilizar un conjunto de indicadores, con el fin de seguir los progresos del desarrollo sostenible. Estas orientaciones se basan en la elaboración de un Sistema de Referencia del Desarrollo Sostenible (SRDS), lo cual implica la definición de los siguientes elementos que lo componen:

**Marco:** es la estructura utilizada para seleccionar y organizar los indicadores y puntos de referencia. Se basa en un determinado conjunto de dimensiones que resaltan las necesidades y finalidades del SRDS: En este caso corresponden a dimensiones ambientales, biológicas y pesqueras orientadas a apoyar la toma de decisiones en la administración pesquera de los recursos pelágicos en la zona en cuestión.

**Dimensiones:** son las clases utilizadas para describir el sistema, para las que se necesitan criterios, indicadores y puntos de referencia. Las dimensiones del marco definido en el proyecto son de tipo ambiental, biológicas y pesqueras.

Escala: de tipo regional y local.

**Objetivos:** indican lo que se trata de conseguir dentro de los principios generales del desarrollo sostenible. En este caso, el Consejo de Investigación Pesquera, teniendo presente lo informado al efecto por la Subsecretaría de Pesca, requiere:

- robustecer una línea de investigación en oceanografía-pesquera, con aplicabilidad en la fundamentación de medidas de administración, y
- apoyar la toma de decisiones en la administración pesquera, con el uso de indicadores que integren las componentes oceanográficas, biológicas y pesqueras.

**Criterios:** son componentes del SRDS cuyo comportamiento puede describirse por medio de indicadores y puntos de referencia. Por ejemplo, podrían utilizarse los siguientes criterios: **biomasa desovante**, que refleja el bienestar del recurso; **capacidad pesquera**, que se relaciona con la presión de pesca; **ingresos** (en efectivo o en especie), que se relacionan con el bienestar de la población humana; y **legislativas**, que se relacionan con el gobierno.

**Indicadores y puntos de referencia:** un indicador es un valor cuantitativo o cualitativo, una variable o índice relacionado con un criterio. Sus fluctuaciones revelan las variaciones de los criterios. Un punto de referencia indica una situación concreta de un indicador, correspondiente a una situación deseable (punto de referencia objetivo PRO), o indeseable y que exige una acción inmediata (puntos de referencia límite (PRL) y umbral (PRU).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

#### a) Estado de Avance del Plan de Actividades y Carta GANTT

Reuniones de Coordinación. a) La primera reunión se realizó el 18 de marzo en Concepción, donde el Jefe del Proyecto coordinó el trabajó con el equipo de la Universidad de Concepción (UDEC). b) La segunda se realizó en Valparaíso el 22 de abril, en la cual el Dr. Hormazábal de la UDEC coordinó el trabajó con el equipo de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV). c) Un taller de trabajo se realizó el 4 de junio en Concepción, a la cual asistieron A. Ordenes, C. Hernández, C. Silva y E. Yáñez, de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), y S. Hormazábal, O. Pizarro, A. Montecinos, L. Cubillos, A. Valdenegro y F. Espíndola de la UDEC. d) Una cuarta reunión se realizó el 24 de septiembre en Valparaíso, con el objeto de coordinar los últimos alcances del Informe de Avance; en esta participaron investigadores de la PUCV y el Dr. Hormazábal de la UDEC. e) El 21 y 22 de enero de 2005 se realizó en Valparaíso un taller de presentación de resultados y coordinación del trabajo en vista de la entrega del Informe de Avance el 25 de marzo próximo, fecha reprogramada después de la prorroga solicitada por carta el 28 de noviembre de 2004 y otorgada oficialmente el 12 de enero de 2005 (Carta FIP N° 21). f) Finalmente, con fecha de 6 de mayo de 2005, se realiza en el Auditorium del Instituto de Fomento Pesquero el "Taller de Difusión y Discusión de Resultados" (ANEXO 10).

En las primeras reuniones se afinaron los siguientes acuerdos:

 i) Para la recolección de las bases de datos de las fuentes correspondientes se nombraron a las siguientes personas:

Estaciones Costeras: E. Yáñez, A. Montecinos y F. Gómez Teledetección: S. Hormazábal y C. Silva Cruceros Oceanograficos: N. Silva y A. Valdenegro Cruceros de Ictioplancton: C. Silva y A. Ordenes Hidroacústica: A. Ordenes y S. Hormazábal

#### Pesca: E. Yáñez, F. Gómez y F. Espíndola

ii) En tanto que para analizar el estado del arte internacional se nombraron a:

Objetivo Específico 1: S. Hormazábal, L. Cubillos, A. Montecinos y F. Espíndola Objetivos Específicos 3 y 4: L. Cubillos Objetivos Específicos 2 y 5: E. Yáñez, C. Silva y A. Ordenes

iii) Respecto del alcance del proyecto se precisaron los objetivos, la metodología, los resultados esperados y el plan de actividades, concordando para el objetivo específico 1 la planificación que se presenta en el ANEXO 1. Del objetivo específico 3 se encargará el Equipo del Profesor L. Cubillos de la UDEC; en tanto que el trabajo de los otros objetivos será planificado después de la entrega del informe de avance.

iv) En la cuarta reunión se revisaron y coordinaron principalmente los trabajos asociados a los objetivos 1 y 3. En tanto que en la quinta reunión se presentaron los resultados de dichos objetivos; se precisaron los responsables y tiempos para desarrollar y terminar el trabajo de los objetivos 2, 4 y 5; y se decidió el 18 de marzo como fecha para la realización del Taller de Presentación y Discusión de Resultados.

#### b) Creación de la Base de Datos Ambientales, Biológica y Pesquera

<u>Identificación de Fuentes de Datos</u>: De acuerdo con la metodología de la Propuesta Técnica (ver Capítulo 5), específicamente en cuanto a los datos considerados (ver 5.2.), se gestiono la adquisición en:

- a) Servicio Meteorológico de Chile, con visitas a Sede en Santiago.
- b) Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, por carta.
- c) Subsecretaria de Pesca, por carta (respondida recién en septiembre).
- d) Fondo de Investigación Pesquera, por carta (con entrega incompleta de datos).
- e) Servicio Nacional de Pesca, por teléfono y correo.
- f) CORPESCA S.A., con visita a Sede en Santiago (pendiente).

g) Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, directamente.

h) Universidad de Concepción, directamente.

i) International Research Institute, a través de página WEB.

j) NOAA, a través de página WEB.

<u>Recolección de Bases de Datos:</u> Las bases de datos solicitadas a las fuentes correspondientes se recolectaron de archivos enviados por correo, vía e-mail, en CD, de Internet y en forma personal.

<u>Organización y Manipulación de Bases de Datos:</u> Los datos adquiridos, particularmente aquellos que no configuran series oficiales, fueron revisados para: a) verificar la calidad; b) consolidar y cambiar (estandarización) el formato; y c) configurar las bases de datos temáticos.

Resultado 1. Las bases de datos ambientales, biológicos y pesqueros se entregarán junto al informe final.

# c) Estado del Arte Internacional sobre Investigación en la Temática

<u>Recolección y Revisión Bibliográfica:</u> Se realizó la búsqueda y recolección exhaustiva de publicaciones científicas (revistas, libros, newsletters y otros) y documentos disponibles a nivel internacional sobre la temática del proyecto; luego se revisaron y analizaron las publicaciones y documentos disponibles.

Elaboración de Documento con Publicaciones y Documentos Recopilados: Una síntesis de la recolección y revisión bibliográfica sobre los objetivos específicos del trabajo se presenta en el ANEXO 2.

Resultado 2. El documento impreso y digital con publicaciones científicas se entregará junto al informe final.
# 4.1. Descripción y análisis de la dinámica del ambiente oceánico y su relación con la abundancia de los recursos pelágicos y/o de sus estadios tempranos de desarrollo en la zona norte de Chile (Objetivo Específico 1)

## 4.1.1. Fluctuaciones temporales de variables bio-pesqueras y ambientales

El sistema de Chile-Perú presenta stocks de peces pelágicos muy abundantes y variables, lo cual se asocia a la intensidad de la explotación y a cambios ambientales (Csirke & Sharp, 1985; Cañón, 1986; Yáñez & Barbieri, 1988; Bernal, 1990; Yáñez *et al.*, 2001). Chile es uno de los principales países pesqueros del mundo, con aproximadamente 8 millones de t anuales desembarcadas en 1994-95, que disminuyen a cerca de 5 millones anuales en el período 1997-02 (SAG, 1963-1977; SERNAPESCA, 1978-2002). Los peces pelágicos constituyen cerca del 90% de los desembarques, logrados esencialmente en la zona económica exclusiva con barcos cerqueros que han experimentado un gran desarrollo tecnológico (IFOP, 1996).

En la zona norte de Chile (18°21'-24°S) la pesquería pelágica se realiza desde la década del 50, primero y esencialmente sobre la anchoveta (*Engraulis ringens*), aunque los desembarques son bastante mayores en Perú; éstos siguen prácticamente la misma tendencia, incluidas las variaciones asociadas a los eventos El Niño (Fig. 4a). Esta especie se distribuye de preferencia en las primeras 30 millas náuticas de la costa, es de pequeño tamaño (18 cm), de vida corta (4 años) y de fecundidad elevada (Serra, 1983). Esta pesquería colapsa a mediados de la década del 70, siendo remplazada por la de sardina (*Sardinops sagax*) en la zona norte de Chile y también en Perú (Fig. 4b). Esta especie es de mayor tamaño (42 cm) y longevidad (11 años), de menor fecundidad y de distribución más oceánica (Serra & Tsukayama, 1988). Después de 1975 también aumentan las capturas de jurel (*Trachurus murphyi*) y caballa (*Scomber japonicus*), representando en el norte de Chile el 15% y 4 % de los desembarques del período 1976-2002; en tanto la anchoveta y sardina representan el 34% y 46% respectivamente (SAG, 1976-77; SERNAPESCA, 1978-2002).

Los rendimientos de anchoveta muestran anomalías negativas asociadas a los eventos El Niño (Yáñez & Barbieri, 1988). Además, la escasa recuperación de esta pesquería después

de 1976, coincide con la caída en el largo plazo del Índice de la Oscilación del Sur (IOS) y con el desarrollo de la pesquería de sardina. No obstante, esta pesquería muestra en el norte de Chile una importante disminución después de 1985; años después la disminución comienza en Perú (Fig. 4b). En tanto que al mismo tiempo se observa una notable recuperación de la pesquería de anchoveta (Fig. 4a).

En este trabajo se analizan las fluctuaciones del ambiente y de los principales recursos pelágicos explotados en la zona norte de Chile, para determinar indicadores que permitan seguir los principales patrones de la variabilidad del sistema.

## 4.1.1.1. Fluctuaciones temporales de variables bio-pesqueras

## Información analizada

Los desembarques anuales del Perú corresponden a estimaciones del Instituto del Mar del Perú (IMARPE) (Ñiquen, *com. pers.*). En tanto que los desembarques mensuales y anuales la zona norte de Chile fueron recopilados de los Anuarios Estadísticos del Departamento de Pesca y Caza, de la Dirección de Agricultura y Pesca, del Ministerio de Agricultura (1963-66); de la División de Pesca y Caza, del Servicio Agrícola y Ganadero, del Ministerio de Agricultura (1967-73); de la División de Protección Pesquera, del Servicio Agrícola y Ganadero, del Ministerio de Agricultura (1974-77); y del Servicio Nacional de Pesca, del Ministerio de Economía Fomento y Reconstrucción (1978-2002).

En cuanto a las estimaciones de CPUE, se ocuparon las siguientes fuentes disponibles: a) datos georreferenciados de la flota cerquera de Iquique (1973-1979); b) estimaciones georreferenciadas de CPUE de los proyectos FIP 93-21, 93-22 y 96-05 (1980-1986) (Böhm *et al.*, 1996a y b, 1998); y datos georreferenciados de barcos considerados en el proyecto FONDEF D98-I-1022 (1987-2002). En relación con los desembarques anuales del SERNAPESCA (1973-2002), estas fuentes de datos representan los porcentajes que se indican en la Tabla 1. Cabe señalar que los datos brutos de los análisis de los proyectos FIP 93-21, 93-22 y 96-05 aún no han podido ser recuperados.

Tabla 1. Representatividad de la base de datos de anchoveta, sardina y jurel. BASE: captura
(t) registrada en la base de datos; DESEM: desembarque (t) zona norte (SERNAPESCA);
%: representatividad de BASE con respecto a DESEM.

	A	NCHOVETA		SARDINA			JUREL		
AÑO	BASE	DESEM	%	BASE	DESEM	%	BASE	DESEM	%
1973	37.864	156.870	24	16.883	45.986	37	52.497	83.730	63
1974	195.343	355.181	55	95.365	186.941	51	97.765	165.779	59
1975	115.946	230.428	50	83.153	134.244	62	102.724	207.755	49
1976	217.657	431.166	50	172.320	279.639	62	147.893	257.970	57
1977	1.237	18.561	7	285.714	577.404	49	89.351	226.234	39
1978	40.581	228.163	18	224.179	674.958	33	224.179	398.414	56
1979	3.296	49.230	7	601.068	1.483.874	41	171.145	344.407	50
1980	74.485	101.415	73	1.604.378	1.656.882	97	262.202	288.809	91
1981	181.430	317.033	57	1.417.977	1.490.952	95	429.305	474.817	90
1982	33.092	101.323	33	1.649.727	1.670.128	99	754.576	789.912	96
1983	0	23	0	2.402.723	2.467.089	97	252.319	301.934	84
1984	0	5.760	0	2.314.575	2.247.011	100	662.003	727.000	91
1985	39.632	68.314	58	2.617.387	2.616.041	100	477.978	511.150	94
1986	1.098.002	1.349.726	81	2.244.104	2.246.121	100	47.501	55.203	86
1987	58.490	204.821	29	845.569	1.883.441	45	144.575	313.310	46
1988	307.429	811.089	38	605.738	1.379.948	44	134.054	325.466	41
1989	547.433	1.338.208	41	644.918	1.474.706	44	119.769	338.600	35
1990	248.342	609.077	41	306.166	765.078	40	105.611	323.089	33
1991	244.748	606.069	40	274.581	607.891	45	112.343	346.245	32
1992	501.842	991.943	51	334.415	710.018	47	142.937	304.243	47
1993	470.984	1.167.854	40	166.015	369.442	45	177.591	379.467	47
1994	1.255.351	2.134.387	59	39.697	128.060	31	139.317	222.254	63
1995	1.011.641	1.613.601	63	19.303	74.953	26	121.630	230.177	53
1996	589.792	944.554	62	15.998	49.446	32	156.681	278.439	56
1997	905.284	1.389.989	65	1.602	9.082	18	65.504	104.198	63
1998	62.208	144.884	43	480	11.525	4	9.145	30.273	30
1999	423.044	855.136	49	115.618	236.431	49	27.033	55.654	49
2000	587.414	1.201.122	49	5.687	48.245	12	53.711	118.534	45
2001	297.723	674.732	44	6.537	29.701	22	123.882	248.097	50
2002	582.212	1.246.024	47	203	15.884	1	53.344	108.727	49

Por otra parte, cabe indicar que desde 1983 las pesquerías de la zona norte de Chile han sido sometidas a vedas extractivas relacionadas con los períodos de mayor actividad reproductiva y de reclutamiento, particularmente en cuanto a anchoveta y sardina se refiere (Tabla 2). Esto debe ser debidamente tomado en cuenta al analizar la variabilidad de las capturas y de las CPUE.

#### Desembarques

En el sur del Perú la anchoveta presenta mayores capturas en el período 1970-82, situación que después se invierte debido probablemente al mayor desarrollo de la flota chilena (Fig. 5a); en tanto que las capturas de sardina y jurel son notablemente más importante en la zona norte de Chile (Fig. 5b y c). Del jurel se reconoce actualmente una unidad de stock frente a Chile (Serra, 1991), no obstante lo amplio de la distribución de la especie en el Pacifico Sur. Son necesarios entonces estudios que permitan clarificar con mayor precisión la estructura de los stocks de las especies en cuestión, tanto de aquellas que se distribuyen en Chile y Perú, como las presentes dentro y fuera de sus zonas económicas exclusivas.

Las capturas de anchoveta en el norte de Chile fueron relativamente importantes hasta antes del fenómeno El Niño de 1972-73; en tanto que después decaen notablemente hasta 1985 (Fig. 6a). Posteriormente la pesquería se recupera sobrepasando los niveles históricos, debido probablemente al notable desarrollo tecnológico de la flota cerquera (IFOP, 1996). Junto a esta recuperación de la pesquería de anchoveta se asocia el decaimiento de la pesquería de sardina, la cual mostró un notable aumento entre 1976-85 (Fig. 6b). Este reemplazo de especies coincide con el cambio de régimen observado en 1976, en los índices ambientales locales y globales; en tanto que el cambio observado después de 1985, coincide con fluctuaciones de algunos índices locales, tales como la temperatura superficial y nivel del mar (Yáñez, 1998).

Año	Anchoveta	Sardina	Año	Anchoveta	Sardina
1983	Sin veda	27 ago – 13 sep	1993	1 ene – 31 ene	1 feb – 27 feb
				29 nov – 31 dic	2 ago – 10 sep
1985	15 abr – 31 dic	23 abr – 22 may	1994	1 ene – 13 feb	14 feb – 13 mar
		17 ago – 24 ago		18 dic – 31 dic	
		9 sep – 22 sep			
		$14 \operatorname{dic} - 31 \operatorname{dic}$			
1986	1  ene - 31  ene	l ene –2 feb	1995	1  ene - 5  feb	21 jul – 27 ago
	1 jul – 31 jul	12 jul – 10 ago		13 feb - 5 mar	
				21  Jul - 27  ago	
				2 / nov - 2 / dic	
1987	Sin veda	1 feb - 25 feb	1996	1 200 - 21 200	1 ago - 21 ago
1707	Sili veda	1 200 - 20 100	1770	16  dig = 31  dig	1  ago = 21  ago
		1 ugo 10 sep			
1988	23  ene - 31  mar	1 feb –11 mar	1997	1  ene - 19  ene	
	l ago 11 sep	1 ago – 11 sep		29 ene – 16 feb	
	19  dic - 31  dic			15 ago – 13 sep	
				$17 \operatorname{dic} - 31 \operatorname{dic}$	
1989	1 ene – 19 mar	20 ene – 28 feb	1998	1 ene – 1 feb	
1707	31  iul = 29  sen	17  iul - 24  sen	1770	11  feb = 24  feb	
	25  dig = 31  dig	17 Jul 2150p		15  inl - 16  ago	
	25 410 51 410			26  ago - 9  sep	
				5  oct - 19  oct	
				1  nov - 30  nov	
				2 dic – 31 dic	
1990	1 ene 19 mar	22 ene – 4 mar	1999	26 jul – 31 ago	26 jul - 12 sep
	31 jul – 1 sep	16 jul – 8 sep		1 sep – 12 sep	<b>J 1</b>
	12 dic – 31 dic				
1991	1  ene - 10  mar	Sin veda	2001	23 ene – 25 feb (6	26 jul – 8 sep <b>2000</b>
	$8 \operatorname{dic} - 31 \operatorname{dic}$			mn)	
				6 ago – 26 ago	
				17  sep - 30  sep	
1992	1 ene – 29 feb	27 ene – 7 mar	2002	5 ene – 19 ene	
	10  ago - 17  sep	17  ago - 26  sep	2002	19 ago - 8 sep	
	30  nov - 31  dic	-, <b></b> 50 -0.00p			

Tabla 2. Vedas extractivas de anchoveta, sardina y jurel (abajo) en la zona norte de Chile.

Vedas de la pesquería de jurel en la I y II regiones:

Año	Período	Observaciones
2000	10 jun – 31 dic	<ul> <li>28-jun al 30-ago se permite un 10% de captura en peso de jurel como fauna acompañante de sardina y anchoveta.</li> <li>31-ago en adelante se permite un 30 % como fauna acompañante</li> </ul>
2001	Veda	Se permite un 30 % de captura de jurel como fauna acompañante
2002	Veda	Se realizan capturas de jurel como pesca de investigación

"ANÁLISIS INTEGRADO HISTÓRICO AMBIENTE – RECURSOS, I – II REGIONES" FIP 2003-33 Como se mencionó anteriormente, las capturas de jurel son menos importantes que las de anchoveta y sardina (Fig. 5c y 6c). Así, en el norte de Chile el jurel sobrepasa las 200.000 t anuales en 1975, alcanzando un promedio de 561.000 t anuales en 1981-85, las que luego disminuyen a 332.920 t anuales en 1987-93 y a 155.000 t en 1994-02 (SAG, 1975-1977; SERNAPESCA, 1978-2002).

#### Captura por unidad de esfuerzo

Se estimaron índices de abundancia relativa mensual y anual, tomando en cuenta la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) de embarcaciones cerqueras de la zona norte de Chile y la estandarización de sus esfuerzos de pesca considerando: la capacidad de bodega (CB) de las embarcaciones (m<sup>3</sup>), el método de Robson (1966) y modelos lineales generalizados (MLG; ANEXO 3). Cabe señalar que en el período 1987-2002, las CPUE de anchoveta estandarizadas con los tres métodos antes mencionados presentan prácticamente la misma tendencia (Fig. 7).

Se recomienda prudencia en cuanto a dichas estimaciones, debido principalmente a la dificultad para separar las variaciones de abundancia de las de disponibilidad. Además, de las bases de datos con información operacional de los barcos solo se toman en cuenta los días con pesca, dado que se desconocen los lugares de pesca de los barcos que recalan sin captura (Caballero, com. pers.). Sin embargo, las CPUE estimadas para la anchoveta del norte de Chile y sur de Perú, considerando los viajes con pesca y los viajes totales estimados, presentan tendencias similares (GTE, 2004).

Así, la CPUE mensual de anchoveta es más alta en el período 1963-71, que en el período 1972-76, destacándose los efectos de los El Niño de 1963, 1965, 1969 y 1972-73, y de los años fríos del 1966-67 y 1970 (Fig. 8). Posteriormente la CPUE mensual muestra valores relativamente estables entre 1973 y 1985, con disminuciones notables asociadas a los El Niño de 1976-77 y 1982-83 (Fig. 9a). La CPUE aumenta a valores altos y relativamente estables hasta 1994, y luego disminuye y se estabiliza hasta el 2002; en este período se notan las disminuciones asociadas a los El Niño de 1987, 1991-92 y 1997-98.

Las fluctuaciones de la CPUE mensual de anchoveta (Fig. 9a) no son tan marcadas como se esperaría de acuerdo a la evolución de los desembarques mensuales (Fig. 6a), particularmente entre 1973 y 1985. Esto se debería: a) al análisis de sólo una fracción del stock que sería compartido con el sur del Perú; b) al considerar los viajes con pesca y no los viajes totales; aunque mejor es el tiempo de búsqueda que requiere una recolección bastante fina (FAO, 1976); y c) a las variaciones de la capturabilidad (q) asociadas al tamaño del stock, al hidroclima, al desarrollo tecnológico, a la experiencia de los pescadores y a la interacción entre las embarcaciones (Laurec & Le Guen, 1981). Esto sin desconocer que el conocimiento de la fisiología de los peces puede ser útil para explicar su vulnerabilidad y sus variaciones (Sharp, 1979).

La tendencia de la CPUE anual de anchoveta en el norte de Chile (Fig. 7) es bastante diferente de la tendencia de la biomasa del "stock norte de Chile y sur de Perú" estimada anualmente por APV (Serra *et al.*, 2004) (Fig. 10a). Cabe indicar que las condiciones ambientales de la zona norte, a pesar de los El Niño de 1987, 1991-92 y 1997-98, habrían comenzado un período de enfriamiento desde mediados de los 80, lo cual sería favorable a la anchoveta (Yánez *et al.*, 2003). No obstante, no se debe desconocer el notable aumento del esfuerzo de pesca que sobre la anchoveta se desarrolla desde mediados de los 80 (Fig. 11a).

Para la anchoveta se examina la relación entre la CPUE y la biomasa estimada por el método de producción de huevos (BMPH), considerando el modelo CPUE =  $qB^{\beta}$  (Harley *et al.*, 2001). El modelo evalúa si la CPUE presenta hiperestabilidad, que es cuando la CPUE declina más lentamente que la abundancia, siendo  $\beta$  menor que 1; en tanto que cuando  $\beta$  es mayor que 1, la CPUE presenta hiperdepleción. Se evalúan concretamente cuatro series de CPUE estándar promedio anual (CPUE1 (t/vt) (GTE, 2004); b) CPUE2 (t/vcp) (MLG); CPUE3 (t/vcp) (Robson); CPUE4 t/CB)), con la serie de BMPH del período 1992-2002 (Braun *et al.*, 2004b). Para todos los caso el parámetro  $\beta$  es menor que 1 (Fig. 12), indicando un sesgo al considerar la CPUE proporcional a la abundancia. La relación entre la CPUE y la abundancia podría estar influenciada por numerosos factores, tales como el incremento de la vulnerabilidad a la pesca ante escenarios ambientales adversos (Alheit y

Ñiquen, 2004), o el efecto de cambios tecnológicos de la flota no del todo considerados en los modelos de estandarización (Punt, 2000).

Para la pesquería de sardina de la zona norte de Chile las estimaciones de CPUE parecerían más razonables, al observar un crecimiento desde 1973 hasta mediados de los ochenta y luego una clara tendencia a la disminución (Fig. 9b). Esto en relación con las capturas (Fig. 6b) y las estimaciones del esfuerzo de pesca estándar (Fig. 11b), que después de mediados de los 80 muestran también una clara tendencia a la disminución. Por otra parte, la tendencia de la CPUE anual es similar a la estimación de la biomasa con APV (Serra y Canales, 2003), salvo que esta última muestra que la disminución se habría producido con anterioridad (Fig. 10b), lo cual implicaría también un cierto grado de hiperestabilidad del índice de abundancia. Esto tendencia es también observada en el jurel, cuya CPUE aumenta claramente hasta 1982, y luego disminuye hasta el final del período de estudio (Fig. 9c).

# Estacionalidad de las CPUE y los desembarques

Para evaluar el patrón estacional de anchoveta, sardina y jurel se analizan las series mensuales de las CPUE y los desembarques (Fig. 13). Para la anchoveta y sardina se excluye del análisis el período posterior a 1984, donde la estacionalidad es afectada por la aplicación de vedas extractivas (Tabla 2). Además, para la anchoveta no se considera el período 1976-1984, dado que la flota se orientó principalmente a la pesquería de sardina (Fig. 6a y b).

La estacionalidad de la CPUE y del desembarque de anchoveta muestra valores que se incrementan en primavera-verano (Fig. 13, arriba). Estos se asociarían al desove secundario y principalmente al importante proceso de reclutamiento (Braun *et al.*, 1995; Castillo *et al.*, 2002), que desde 1986 se protege con vedas extractivas (Tabla 2). El aumento de la CPUE que se observa en invierno se relacionaría con un período secundario de reclutamiento, toda vez que después de la época considerada de reposo sexual de marzo-mayo se desarrolla el principal período de desove (Braun *et al.*, 1995). En este período las vedas, aplicadas desde mediados de los 80, implican los meses de julio-septiembre (Tabla 2).

La componente estacional de la CPUE y de los desembarques de sardina es opuesta a la de anchoveta, mostrando los mayores valores durante el segundo semestre y los mínimos en primavera-verano, con un aumento secundario en marzo (Fig. 13, al centro). Bajo condiciones normales, la sardina presenta un desove prolongado entre julio y marzo, con una moda intensa en agosto-septiembre y otra de menor intensidad en febrero-marzo (Serra & Tsukayama, 1988). En 1991, por ejemplo, el índice gonado somático de sardina mostró valores máximos durante marzo y nuevamente en agosto-septiembre (Martínez *et al.*, 1992). Desde 1983, éstos períodos son protegidos con vedas extractivas (Tabla 2).

No obstante lo anterior, en condiciones ambientales extremas, como aquellas asociadas a los fenómenos El Niño, se producen drásticas alteraciones en cuanto a la magnitud y época de los máximos del desove de dichos recursos pelágicos de la zona norte de Chile (Martínez *et al.*, 1986). En efecto, cuando las aguas subtropicales no invaden la región, predomina en ella el agua de origen subantártico y la surgencia es favorable, determinando esta situación un ambiente más propicio para las especies como la anchoveta. Esta no supera en general los 50 m de profundidad, en tanto que horizontalmente se encuentra dentro de las 50 mn, debido al parecer a las condiciones cálidas y de menor cantidad de alimento de las aguas exteriores (Yáñez, 1989).

Por el contrario, la instrucción de aguas subtropicales a la zona de distribución de anchoveta trae consigo un cambio en las condiciones más normales del ambiente modificando el comportamiento de la especie. Así, los fenómenos El Niño jugarían un rol importante en la disminución de las capturas, afectando la disponibilidad y la vulnerabilidad del recurso. Por otra parte, dichos fenómenos afectarían la fecundidad y viabilidad de los huevos, como también la sobrevivencia de las larvas, postlarvas y juveniles, produciendo disminuciones del reclutamiento y por ende de la biomasa del stock.

Después de 1976 persiste en la zona un período cálido que se relaciona con el aumento de la abundancia de sardina, la cual es gran depredadora de huevos de anchoveta (Santander *et al.*, 1983). En tanto que después de mediados de los ochenta se reestablecen condiciones más bien frías, que favorecen la recuperación de la anchoveta y la disminución de la sardina, no obstante los El Niño de 1987, 1991-92 y 1997-98 (Yáñez *et al.*, 2001).

El jurel es considerado una especie secundaria en la pesquería pelágica de la zona norte de Chile (Fig. 6), sobre el cual se considera la existencia de una unidad de stock frente a Chile (Serra, 1991), explotado mayormente en la zona centro sur (Barría *et al.*, 2003). En la zona norte este presenta una clara estacionalidad, con los más altos valores durante el primer semestre y los más bajos durante el segundo (Fig. 13, abajo). Dicha estacionalidad se asociaría a los procesos migratorios que realizaría el recurso frente a Chile (Sepúlveda *et al.*, 2003). Sobre este recurso se han contemplado vedas extractivas en la zona de estudio en los últimos años del período de estudio, pero permitiendo capturas como fauna acompañante y asociadas a pescas de investigación (Tabla 2).

## Espectros Wavelet en la pesquería de anchoveta

Los espectros Wavelet del desembarque y la CPUE estándar de anchoveta presentan una fuerte variabilidad en la escala bidecadal, pero con una reducida significancia debido a la longitud de las series de tiempo (Fig. 14).

El desembarque de anchoveta incrementa su varianza en el período 1985-2002, especialmente en las bandas de frecuencia de 5-8 y 2-3 años. Estas últimas podrían reflejar fluctuaciones interanuales del recurso, relacionadas a los eventos El Niño-La Niña.

La CPUE de anchoveta presenta una reducida variabilidad en las bandas de entre 2 y 4 años durante todo el periodo analizado. Comparada con el desembarque, la CPUE presenta una estabilidad bastante mayor en las bandas menores a los 4 años. Por otra parte, si bien la CPUE presenta una alta varianza en las bandas de 4-8 años del período 1985-1997, esta es pequeña en el período 1998-2002.

# Correlaciones entre variables bio-pesqueras

En figura 15 se presentan las correlaciones y los diagramas de dispersión entre series anuales de variables bio-pesqueras. Es posible observar una correlación positiva entre el desembarque y la CPUE de anchoveta (0,59), aunque con algunos puntos iniciales fuera del rango. En tanto que la relación entre la CPUE y la biomasa de anchoveta estimada con

APV, tal como se insinuó anteriormente, es poco clara (-0,21). En tanto que la biomasa y el reclutamiento de anchoveta presentan una fuerte correlación positiva (0,86).

El desembarque de sardina se correlaciona positivamente con las estimaciones de CPUE y biomasa del recurso (0,95 y 0,99), y con la CPUE y el desembarque del jurel (0,43 y 0,45), insinuándose entonces un comportamiento similar entre ambas especies. Por otra parte, el desembarque de sardina exhibe una correlación negativa con el desembarque y, principalmente, con la biomasa de anchoveta (-0,36 y -0,80). Estos resultados evidencian la relación inversa que presenta la pesquería de anchoveta en relación con la sardina, además de la asociación positiva entre esta última y el jurel, ambas especies de distribución más oceánica que la anchoveta.

#### 4.1.1.2. Fluctuaciones temporales de variables ambientales

## Información analizada

Las fluctuaciones temporales del ambiente se analizan con información de larga duración de estaciones costeras ubicadas en Arica (18°28'S), Iquique (20°12') y Antofagasta (23°26'S), y específicamente con los promedios mensuales de temperatura superficial del mar (TSM), nivel medio del mar (NMM), temperatura del aire (TA), y dirección y magnitud del viento. Con estas últimas se estiman el transporte de Ekman (TE; Bakun *et al.*, 1974) y el índice de turbulencia (IT; Elsberry & Garwood, 1978).

También fueron considerados los promedios mensuales del Índice de la Oscilación del Sur (IOS; Allan *et al.*, 1991), del Pacific Decadal Oscillation (PDO; Mantua *et al.*, 1997), del Cold Tongue Index (CTI; Zhang *et al.*, 1997) y de la TSM en las regiones Niño 1+2 y Niño 3.4 (WEB NOAA-NCEP). Adicionalmente se analiza un índice mensual del esfuerzo del viento ecuatorial (Teq), calculado a partir de la diferencia de presión atmosférica en la región centrada en los 85°W y 145°E, de acuerdo a la metodología propuesta por Clarke & Lebedev (1996). Por otra parte se utilizan valores anuales de la profundidad de la base de la termoclina (Zb) en una grilla de 5 grados de longitud por 2 grados de latitud, centrada en

los 24°S y 72.5°W, calculada a partir de datos de batitermógrafos expandibles y mecánicos, y analizada por Pizarro & Montecinos (2004).

#### Análisis de series mensuales del período 1950-2002

De acuerdo con la información recuperada del SHOA, la TSM y el NMM del mareógrafo de Iquique solo se registra desde mediados de los 80; en tanto que la serie del NMM en la estación de Arica presenta importantes vacíos, lo que dificulta el análisis estadístico.

En cuanto a la información recuperada del SMCH, la TA está disponible en la estación meteorológica de Iquique tan sólo desde 1981, en tanto que los vientos lo están desde mediados de los 70 y de los 80 en las estaciones de Arica e Iquique respectivamente. En todo caso, la estación meteorológica de Arica está bastante alejada de la costa hacia el noreste y podría más bien representar la interacción del flujo costero con las numerosas quebradas presentes en esta región (Montecinos, 1991). Por otra parte, en la frontera de Chile y Perú la línea de la costa pasa de una orientación sur-norte a una sureste-noroeste.

Así, el análisis se centra en las variables registradas en las estaciones costeras de Antofagasta, dado que muestra los registros más largos y representa bien la variabilidad en la zona norte de Chile, expresada en las fluctuaciones de la TSM (Montecinos *et al.*, 2003) y de la profundidad de la termoclina (Pizarro & Montecinos, 2004).

La estacionalidad de dichas variables muestra que el IT es mínimo en junio y máximo en octubre-enero (Fig. 16a); en tanto que el TE presenta un ciclo inverso, indicando que en primavera-verano el transporte hacia el oeste es mayor y en junio menor (Fig. 16b). Este comportamiento se asocia a la disminución de la intensidad de los vientos costeros en invierno y al incremento en primavera-verano. Sin embargo, el ciclo anual del viento oceánico obtenido de data satelital difiere del costero al presentar su máxima intensidad en invierno y la mínima en verano, produciendo un bombeo Ekman negativo durante el verano (Hormázabal *et al.*, 2001); esto limitaría la extensión de los eventos de surgencia a una estrecha franja costera. Esto se relacionaría con el ciclo anual de la clorofila\_*a* satelital, que en el sector costero es máxima en verano y mínima en invierno; en tanto que en el sector

oceánico el ciclo sería opuesto. La TSM y TA presentan un ciclo con máximos valores en enero-febrero y mínimos en julio-agosto (Fig. 16c y d). El rango de variación de la TSM es menor 1,3°C respecto a la TA. El nivel medio del mar muestra máximos valores en verano y mínimos en agosto-octubre (Fig. 16e). Por otra parte, la profundidad de la capa de mezcla del sector costero y oceánico exhibiría máximos valores en julio-septiembre, relacionados a

la desaparición de la termoclina estacional de primavera-verano (Anexo 6).

Las anomalías de las series de tiempo fueron calculadas tomando en cuenta las señales anuales del períodos analizado (1950-2002); dichas anomalías fueron luego suavizadas con un promedio móvil de 13 meses centrados. Así, las anomalías de la TSM muestran que la zona de estudio es afectada por los eventos El Niño, pero además por un período cálido de más largo plazo que se establece a partir de 1976 (Fig. 17a). Este período es seguido por una tendencia al enfriamiento después de mediados de la década del 80, a pesar de los eventos El Niño de 1987, 1991-92 y 1997-98.

Las fluctuaciones de la TSM costera se caracterizan entonces por presentar variabilidad interanual asociada al ciclo El Niño-Southern Oscillation (ENSO), e interdecadal asociada a la oscilación interdecadal del Pacífico o ENSO-like Oscillation (Montecinos *et al.*, 2003). Así, el "salto climático de 1976" corresponde más bien a una oscilación que presenta períodos bidecadales (20-30 años) y pentadecadales (40-60 años) (Minobe, 1999).

Las anomalías positivas del NMM en la estación de Antofagasta están generalmente asociadas a eventos El Niño (Fig. 17b). No obstante, se puede observar que después de 1960 las anomalías del NMM presentan una tendencia decreciente hasta mediados de los 70. Luego se observan valores alrededor de la media hasta 1987, salvo durante El Niño 1982-83; en tanto que posteriormente las anomalías son más bien negativas, salvo durante los eventos El Niño que se suceden. La tendencia a la disminución que presentan el NMM y la TSM después de mediados de los 80, correspondería a una cambio general de las condiciones del medio que favorecería la recuperación del stock de anchoveta. Esto explicaría el notable crecimiento de sus capturas después de 1985, a pesar de las disminuciones durante los eventos El Niño que se producen posteriormente (Fig. 4a). Desde 1976 se observa en la zona norte un notable aumento del TE, con una clara tendencia a la disminución después de 1987, observándose las menores intensidades después del evento El Niño de 1991-92 (Fig. 17c). Cabe señalar que después de mediados de los 80 los desembarques de sardina muestran una clara tendencia a la disminución (Fig. 6b); en tanto que entre 1957 y 1971, período de desarrollo de la pesquería de anchoveta, el TE fluctúa alrededor de la media histórica, salvo durante los El Niño observados desde 1963.

Cabe señalar que el TE y el IT (Fig. 17c y d) están altamente correlacionados ( $r^2$ =-0,90), al igual que en las zonas de surgencia de Marruecos, Perú y Senegal (Cury & Roy, 1989). En efecto, ambos índices son calculados a partir del viento y en la zona norte los vientos predominantes del sur y sur-oeste son favorables a la surgencia (Pizarro *et al.*, 1994) y por ende al transporte hacia el oeste.

Esta misma evolución del TE ha sido observada en California, Península Ibérica, Marruecos, Perú y Golfo de Guinea (Bakun, 1990, 1995). El autor sugiere que la intensificación de la fuerza de los vientos sobre la superficie del mar a lo largo de las costas conduciría a una acentuación de las surgencias, alterando las zonas de reproducción de especies pelágicas costeras tales como la anchoveta. En efecto, el aumento del TE provocaría un mayor advección de huevos y larvas lejos de la costa; en tanto que el aumento del IT dificultaría las condiciones de alimentación de larvas, juveniles y adultos (Cole & McGlade, 1998).

El aumento de la intensidad de los vientos se asociaría al desplazamiento hacia el norte del anticiclón del Pacifico Suroriental durante los períodos cálidos (Romero & Garrido, 1985). Pero este no es un hecho confirmado para explicar el aumento de los vientos durante períodos cálidos en la zona, lo cual debe ser analizado con la debida atención. Al respecto, Rutllant *et al.* (1998) señalan que la nubosidad observada a las 2 p.m. sobre Antofagasta disminuye después de 1976, lo cual puede aumentar el contraste térmico tierra-mar, incrementando el viento a lo largo de la costa.

Estas grandes variaciones se asociarían a importantes cambios en el Pacífico, reflejados en el IOS y el PDO, particularmente a mediados de los 70 (Fig. 18a y b), como también se

observa en la TSM de las regiones El Niño 1+2 y El Niño 3.4 (Fig. 18c y d). No obstante, el cambio observado después de mediados de los 80 en la TSM y NMM (Fig. 17a y b) y en las capturas de la zona en cuestión (Fig. 6), no se observan claramente en las series de anomalías mensuales tanto de los índices que representan variaciones del Pacífico (IOS y PDO), como tampoco en la TA medida localmente (Fig.17e).

Cabe señalar que un cambio de régimen climático es también observado en el Pacífico Norte en 1976-77, denominado "salto climático de 1976" (Trenberth & Hurrel (1994), con grandes consecuencias en el ecosistema marino de la región (Hare & Nathan, 2000). También se identificó un cambio en 1989, en algunos componentes de este ecosistema, pero que no señala un simple retorno a las condiciones previas a 1977. Además, si bien el cambio de 1989 se observa con relativa claridad en los registros biológicos, éste tampoco se refleja en la Oscilación Decadal del Pacífico (Mantua *et al.*, 1997).

#### Variabilidad interdecadal en el período 1919-2002

La TA es la serie más larga registrada en Antofagasta. En la figura 19 se comparan los espectros Wavelet de esta serie y de los índices que representan fluctuaciones de gran escala en el océano Pacífico: IOS, CTI y Teq en el período 1919-2002. El IOS y la CTI comparten gran parte de la variabilidad en las escalas interanual e interdecadal, presentando fluctuaciones entre 2 y 6 años durante todo el período de estudio; decadales a partir de comienzos de los 70; y pentadecadales. Estos índices representan en esencia los ciclos ENSO en la escala interanual y ENSO-like en la interdecadal. Es interesante notar que las fluctuaciones del viento zonal a lo largo del Ecuador, representados por el Teq, comparten una buena fracción de estas oscilaciones en todas las escalas de tiempo, especialmente del IOS. Al contrario de lo observado en el índice CTI (que representa la TSM en el Pacífico ecuatorial), tanto el IOS como el Teq presentan una oscilación bidecadal entre los 50 y 70. Regionalmente, la TA de Antofagasta comparte la variabilidad de baja frecuencia del ciclo ENOS, entre 2 y 6 años, y del ENSO-like Oscillation, con periodos decadales, bidecadales y pentadecadales.

Una manera de focalizar el análisis de la variabilidad interdecadal es filtrar las series. Con este objetivo se obtuvieron los promedios anuales y a los cuales se les extrajo la tendencia lineal. Luego se utilizó un promedio móvil de 5 años, pasado dos veces, para filtrar la variabilidad interanual. Este filtro ha sido utilizado en otros estudios de la variabilidad interdecadal (McPhaden & Zhang, 2002).

La figura 20 muestra las series interdecadales o suavizadas de los índices IOS, CTI y Teq, en comparación con la serie interdecadal de la TA. Los índices IOS y CTI muestran una correlación de -0.56, aumentando a 0.75 cuando se correlacionan las series interdecadales de CTI y Teq. El índice que más se correlaciona con la serie de TA en Antofagasta es el Teq, llegando a un valor de 0.87 en el período común 1924-1991, seguido por el CTI con una correlación de 0.64. Estas correlaciones coinciden con la dinámica de la oscilación interdecadal en el Pacífico Sur, descrita en trabajos previos (Pizarro & Montecinos 2004; Montecinos & Pizarro, 2004). En esencia, la variabilidad de baja frecuencia de la TSM y la termoclina en la costa oeste de Sudamérica fluctúa en respuesta a fluctuaciones de baja frecuencia del esfuerzo del viento zonal a lo largo del ecuador, mecanismo sugerido por Clarke & Lebedev (1999). En este caso específico, se espera que anomalías positivas de Teq (que representan vientos alisios anormalmente débiles) profundicen la termoclina en el Pacífico ecuatorial oriental y a lo largo de las costas oeste de Norte y Sudamérica. La profundización de la termoclina induce la aparición de anomalías positivas de TSM en la costa, y estas aumentarían la radiación de onda larga y los flujos de calor sensible y latente, explicando la sincronía con la temperatura del aire en la región costera.

En general la mayoría de las variables costeras, incluso del desembarque, comienzan en torno a 1950. La figura 21 muestra los espectros Wavelet de la TA, la TSM, el NMM y TE. Existe una mayor correspondencia entre la variabilidad de la TSM y el NMM, tanto en la escala interanual como en la interdecadal, aunque específicamente en la escala interanual el espectro Wavelet de la TA es muy similar al de la TSM. En el caso del TE, la mayor varianza se concentra en el periodo pentadecadal, aunque con poca significancia debido al largo de los registros. La figura 22 muestra las series suavizadas o filtradas de estas series, además de la profundidad de la Zb. Es interesante destacar que el llamado "salto climático de 1976, o cambio de régimen", se observa en todas las variables. La TSM, NMM y TA

aumentan (anomalías positivas), mientras que la Zb se profundiza (anomalía negativa). El TE hacia fuera de la costa aumenta (anomalía negativa) y IT aumenta (anomalía positiva), aunque este cambio se observa a comienzos de los 70. Al igual que en el caso de las series más largas, se pueden establecer relaciones dinámicas entre estas series. En el análisis de las series largas (Fig. 20), se estableció la relación de la TA con el Teq y los índices del ENSO-like Oscillation. Cuando los vientos alisios a lo largo del ecuador se debilitan (anomalías positivas), se profundiza la termoclina en el Pacífico ecuatorial oriental y a lo largo de la costa de Sudamérica (anomalías de Zb negativas). Esta profundización de Zb se asocia con aguas advectadas verticalmente menos frías, induciendo la aparición de anomalías positivas de TSM, NMM y TA. Cuando los alisios se intensifican, estas anomalías tienen los signos opuestos. Es interesante destacar que las fluctuaciones del TE no presentan relación con lo observado, por ejemplo, con la TSM. Incluso la relación es opuesta; esto es, que el aumento del TE se asocia con un aumento de la profundidad de la termoclina. Por lo tanto, se observa una desacoplamiento entre el forzante local (representado por el viento) y la respuesta oceánica a variaciones más bien remotas (Pizarro & Montecinos, 2004). Es importante destacar que las series largas muestran una intensa variabilidad pentadecadal entre la década del 30 y el 70 (Fig. 20). De esta manera, a partir de la década del 50 esta oscilación se vería como una tendencia, la cual ha sido extraída en el análisis de las series más cortas (Fig. 22), pero que se sugiere en los espectros Wavelet (Fig. 21).

## 4.1.1.3. Relaciones entre variables bio-pesqueras y ambientales

## Estacionalidad ambiente y anchoveta

El ciclo estacional del desembarque de anchoveta (similar al de la CPUE), presenta una disminución en el periodo julio-octubre que podría en parte ser asociado a la profundidad de la capa de mezcla (Fig. 23). Un incremento en la PCM implicaría una mayor extensión vertical del hábitat de anchoveta, lo que la haría menos accesible a la flota pesquera. Por otra parte, en este periodo la concentración de clorofila se incrementa en el sector oceánico (Fig. 74) lo que permitiría una extensión del área de distribución de la anchoveta debido a una mayor disponibilidad de alimento. Entonces, en julio-octubre la disminución observada

en las capturas de anchoveta se explicaría en parte por una mayor extensión vertical y longitudinal del hábitat del recurso, que disminuiría su capturabilidad. Por otra parte, en verano la PCM es más somera, la concentración de clorofila es máxima en una estrecha franja costera, asociada a un incremento del viento favorable a la surgencia (Fig. 16), lo que concentraría a la anchoveta cerca de la costa y la haría más vulnerable.

#### Ambiente definido por los vientos locales

El sistema interactivo experimental **CLIMPROD** incluye en los modelos de producción convencionales (lineal, exponencial y generalizado), una variable ambiental para mejorar la exactitud; ésta aparece en las formulas a nivel de la abundancia, de la capturabilidad y de ambas (Freón & Yáñez, 1995). Se asume entonces un modelo global dado, cuya varianza residual sería explicada por esta variable ambiental.

Para las pesquerías de la zona norte se ajustaron previamente modelos CLIMPROD para las pesquerías de anchoveta (1957-77) y sardina (1973-95). Para la primera se consideró un modelo lineal-lineal tomando en cuenta el esfuerzo de pesca estándar y el IT como variables explicatorias de la CPUE (k=3;  $r^2=0,91$ ): En tanto que para la segunda se tomó en cuenta un modelo linear-cuadrático que considera el esfuerzo de pesca estándar y la TSM explicando la CPUE (k=4 ;  $r^2=0,93$ ) (Yáñez *et al.*, 2001). El parámentro k, representando las clases participando significativamente en las capturas, fue considerado para promediar los esfuerzos y las variables ambientales de acuerdo a lo propuesto por Fox (1975).

En el presente trabajo se analizan nuevamente las pesquerías de sardina (1973-2002) y anchoveta (1984-2002) de la zona en cuestión, no encontrándose modelos convencionales que expliquen el desarrollo de las mismas. En efecto, para la sardina la relación entre el desembarque anual y el esfuerzo de pesca estándar resulta lineal-positiva, con un aumento hasta los máximos valores observados en 1983-1987, los cuales vuelven posteriormente al origen (Fig. 24a). En tanto que la relación exponencial-positiva entre el desembarque y el transporte de Ekman (TE) muestra los mayores valores entre 1982 y 1987 (Fig. 24b). La CPUE de sardina también muestra relaciones positivas, aunque no lineales, con el esfuerzo de pesca y el TE, con valores que aumentan desde 1973 hasta 1985, para luego disminuir

hasta el origen (Fig. 25a y b). Cabe señalar que una importante relación se detecta entre éstas dos variables explicatorias (Fig. 26a); además, que el TE se relaciona fuertemente con la turbulencia (Fig. 26b).

En el caso de la anchoveta se destaca en primer lugar la relación directa entre el reclutamiento y la biomasa (Fig. 27a); en tanto que la relación se presenta inversa con el TE (Fig. 27b). También resulta inversa la relación entre la biomasa y el TE (Fig. 28a) y, aunque en forma más dispersa, la relación entre el esfuerzo de pesca estándar y el TE (Fig. 28b). En tanto que, aunque un poco menos claro que la sardina, la relación entre el desembarque y el esfuerzo de pesca estándar resulta también positiva (Fig. 29).

Se deduce que el incremento de la turbulencia y el TE (estrechamente correlacionados), sobre todo durante períodos cálidos, es desfavorable a la producción de anchoveta en el norte de Chile. Habría una mayor mortalidad de huevos y larvas, y por ende del reclutamiento, debido a una dispersión y modificación de la calidad del alimento (Bernal *et al.*, 1983, Santander & Flores, 1983), y a un aumento del transporte mar afuera que provocaría una advección de los productos de la reproducción (Parrish *et al.*, 1983). Sin embargo, un efecto sobre la capturabilidad no se puede excluir, en particular sobre los individuos más viejos que pueden modificar su distribución durante dichos períodos.

Durante el período 1963-73, la anchoveta presentó dos áreas bien definidas de máximo desove, la de la zona norte y la de Talcahuano (36°-38°S), mientras la de sardina se encontraba restringida a la primera. En la zona norte la sardina habría presentado una densidad de huevos igual al 16% del de la anchoveta. No obstante, a la inversa de lo que sucede con la anchoveta,, la sardina presenta anomalías positivas en la intensidad del desove durante períodos cálidos, en tanto que serían negativas durante períodos fríos (Bernal *et al.*, 1983). Entonces, si bien hasta 1972 los desoves de sardina se realizaban en una área reducida, éstos fueron más intensos cada vez que ocurría un evento El Niño. Luego, con una abundancia de anchoveta bastante reducida, la sardina incrementa el área de distribución del desove y de las larvas a partir del fenómeno El Niño 1972-73, estableciendo incluso un centro de desove en el área de Talcahuano.

El aumento de la abundancia de sardina en el norte de Chile estaría efectivamente asociado al cambio de régimen que se manifiesta después de 1976, reflejado en un aumento que persiste en las variables locales (Fig. 17) y en aquellas que indican cambios globales en el Pacífico, particularmente el IOS que disminuye en el largo plazo desde mediados de los 70 (Fig. 18).

Es probable que este ambiente característico de un período cálido haya favorecido el aumento de la intensidad de los desoves en la zona y los niveles de reclutamiento hasta intensidades del viento bastante más fuertes que los que maximizan el reclutamiento de anchoveta (Yáñez *et al.*, 2003). Estos buenos reclutamientos habrían favorecido el aumento de los individuos de 5-8 años que son los más representativos en las capturas, los cuales tendrían una buena disponibilidad de alimento producto del mayor TE y en ausencia de una considerable biomasa de anchoveta.

Sin embargo, desde 1985 se vuelven a observar grandes abundancias de huevos y larvas de anchoveta (Rojas, 1986; Loeb & Rojas, 1988), así como un extraordinario crecimiento de sus capturas desde 1986, afectadas en todo caso por los eventos El Niño de 1987, 1991-92 y 1997-98 (Fig. 4a). Esta recuperación se relaciona con la tendencia al enfriamiento del ambiente después de 1987 (Fig. 17a), la disminución del TE y el IT (Fig. 17c y d) y la disminución de la abundancia de sardina (Fig. 23a). En efecto, después del máximo observado en 1984, el reclutamiento de sardina disminuye en forma lineal con la biomasa parental y con la TSM promedio del año i al i-2 (Yáñez *et al.*, 1998), lo cual se ve reflejado en la notable posterior disminución de sus capturas (Fig. 4b).

Por otra parte se analiza la relación entre las pesquerías de anchoveta y sardina de la zona norte y las fluctuaciones del ambiente mediante la aplicación del **Análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (FOE)** estándar. De este modo, haciendo uso del programa CLIMLAB2000 (Tanco & Berri, 2000), se analizan series anuales de características pesqueras, biológicas y ambientales, para extraer los modos más importantes de la variabilidad. Así, el análisis de las series de tiempo disponibles para la anchoveta en el período 1957-2002, permiten extraer un primer componente que explica el 58% de la variabilidad de la pesquería. Las variables tomadas en cuenta individualmente explican: la

captura 54%, el esfuerzo de pesca 59%, el TE 65% y el IT 55% (Fig. 30, arriba). En tanto que el análisis para la sardina considera un primer componente que explica el 62% de la variabilidad. En este caso las variables tomadas en cuenta explican individualmente: reclutamiento77 %, biomasa 83%, 48 TSM % y 52 TE % (Fig. 30, abajo).

Existirían entonces dos períodos favorables a la pesquería de anchoveta, separados por un período negativo que coincide con un ambiente favorable que permite el desarrollo de la abundancia y la pesquería de sardina (Fig. 30). Cabe recordar que un cambio de régimen es también observado en el Pacífico norte en 1976-77 y otro en 1989 en algunos componentes del ecosistema; aunque éste último no se refleja en los índices climáticos del Pacífico (Hare & Nathan, 2000). Los mismos cambios de régimenes fueron propuestos para explicar el reemplazo de anchoveta-sardina-anchoveta en el Pacífico Suroriental, además de los cambios del jurel, sardina común, pez espada y merluza común frente a Chile (Yáñez, 1998; Yáñez *et al.*, 2002; Yáñez *et al.*, 2003). Por otra parte, Chavez *et al.* (2003) indican que las fluctuaciones de anchoveta y sardina en el Pacífico se asocian a cambios de gran escala en la temperatura del océano, identificando dos ciclos con dos fases frías (1900-1925 y 1950-1975) y dos cálidas (1925-1950 y 1975 hasta la mitad de los 90).

#### Ambiente definido por el forzamiento remoto ecuatorial

El análisis FOE complejo aplicado a los desembarques y fluctuaciones interdecadales del ambiente en Antofagasta se muestra en la Fig. 31. Con este análisis es posible determinar las relaciones de fase entre las variables y, al igual que con el FOE estándar, se pueden reconstruir las series a partir de los modos (detalles del FOE complejo se encuentran en Horel, 1984).

Así, el primer modo de este análisis explica el 77% de la varianza total de las 8 series interdecadales analizadas. La fase temporal que resulta de este primer modo muestra la evolución de una oscilación de 25 años (bidecadal), abarcando un ciclo y medio entre 1960 y 1998. Las anomalías normalizadas reconstruidas de las 8 series son comparadas con las observadas. Las series que mejor se simulan con este modo complejo son el desembarque de anchoveta (correlación de 0,94 entre las series observada y reconstruida), el

desembarque de sardina (0,91), la TSM (0,90) y el Zb (0,93). Por otra parte, las series que menos contribuyen con la varianza explicada por el modo complejo son el NMM (0,84), el TE (0,84) y el IT (0,80). El modo complejo indica que el desembarque de anchoveta alcanzó un segundo máximo en 1997, mientras que la sardina continúa disminuyendo (en la práctica significa que no se observa un aumento del desembarque). En cuanto a las relaciones entre las variables, el desembarque de anchoveta se relaciona positivamente con Zb y el TE, mientras que el de sardina se relaciona positivamente con la TSM, el NMM, la TA y el IT. Cabe señalar que los valores del TE son precedidos del signo negativo, indicando que el transporte es hacia el oeste; en tanto que los valores absolutos del TE se relacionan positivamente con el IT. ( $R^2 = 0,88$  durante el periodo 1950-2002).

Es interesante observar que la evolución temporal del modo complejo (visto en cada serie reconstruida de la Fig. 31), no presentan fluctuaciones decadales, como lo hace notar explícitamente la evolución de la fase temporal de este modo (Fig. 31, panel superior). De hecho, la variabilidad decadal que se observa entre la década del 80 y 90 (Montecinos & Pizarro, 2005) no es reproducida por el modo complejo. Esto sugiere que los desembarques, indicadores de la presencia de las especies analizadas, no responderían a fluctuaciones relativamente "rápidas" en la escala interdecadal, del orden de décadas.

Sin embargo, tanto el TE como IT muestran una relación que no es coherente con las fluctuaciones de la TSM y TA, NMM y del Zb. De hecho, la variabilidad de estos índices que se originan en las fluctuaciones del viento local en la zona norte de Chile, tiende amortiguar las fluctuaciones originadas por la dinámica de la Zb. En los trabajos de Pizarro & Montecinos (2004), Montecinos & Pizarro (2005), y Montecinos *et al.* (2005) se establece que las fluctuaciones del ambiente en la zona norte de Chile, en la escala interdecadal, son principalmente forzadas por cambios de los vientos alisios en la zona ecuatorial del Pacífico. De esta manera, en la zona norte de Chile las variaciones oceánicas son producidas por variaciones de la Zb que se conectan con fluctuaciones ecuatoriales. Así, la profundización (levantamiento) de Zb implica un aumento (disminución) del nivel del mar, y un aumento (disminución) de la TSM debido a una disminución (aumento) de la advección vertical de aguas relativamente frías. En cambio, el viento tiende a disminuir las anomalías positivas (negativas) de la TSM mediante un aumento (disminución) del TE y un

aumento (disminución) de la intensidad del viento, que se refleja en el IT, lo cual se relaciona con una mayor (menor) evaporación.

La figura 32 muestra las series interdecadales (o suavizadas) de los desembarques de anchoveta y sardina. La relación que existe entre ambas pesquerías es más bien opuesta, existiendo una fase inferior a 180 grados, lo cual quiere decir que existe una relación de dependencia negativa entre ambas especies pelágicas. Esto es fácil de observar en el diagrama anchoveta-sardina (panel inferior de la Fig. 32), el cual parte desde 1968 debido a que antes de ese periodo los desembarques de sardina eran prácticamente nulos. Si la fase fuera de 180 grados (relación ortogonal o de correlación nula), la evolución que se muestra en la figura describiría un círculo perfecto. A partir de 1968, cuando la anchoveta muestra un máximo en las capturas, comienza a disminuir este recurso y a aumentar los desembarques de sardina. Este proceso continúa hasta mediados de la década de los 80. Desde 1981 la anchoveta comienza a aumentar, mientras que desde 1985 la sardina disminuye. Según este diagrama, la pesquería de anchoveta alcanza un máximo en 1994 y a partir de entonces comienza a disminuir; mientras que aún no se observa la recuperación de la sardina. Es interesante notar que el aumento y disminución de la sardina son más rápidos (demoran menos tiempo en alcanzar los valores máximos) que en el caso de la anchoveta.

La pregunta que subyace en la relación que se muestra en la Fig. 32 (panel inferior), es cómo se explica la variabilidad de los desembarques de anchoveta y sardina en la zona norte de Chile. En primer lugar, los antecedentes proporcionados por los trabajos previos (ver Yáñez *et al.*, 2001), indican que el ambiente es un factor importante para explicar la sucesión de especies pelágicas. En segundo lugar, y a diferencia de un ambiente definido por la variación del viento local, se ha establecido que las fluctuaciones oceanográficas en la zona norte de Chile fluctúan en la escala interdecadal debido al forzamiento remoto de los vientos alisios en el Pacífico ecuatorial.

De esta manera, se define un índice de las fluctuaciones del ambiente, utilizando la primera componente principal de las series suavizadas y normalizadas (por la desviación estándar) de la TSM, NMM, Zb y TA en el periodo 1960-98, que se muestra en la Fig. 33. Este modo explica el 91% de la varianza total de las cuatro series. Este índice se relaciona con los

desembarques normalizados de anchoveta y sardina con el fin de extraer los modos principales de variabilidad. Este análisis se muestra en la Fig. 34. La primera componente principal explica el 68% de la varianza total y tiene una evolución similar al índice del ambiente que se muestra en la Fig. 33 (panel superior). De hecho la correlación entre estas series es igual a 0,92. De esta manera, se puede indicar que el eje que explica aproximadamente el 70% de la varianza de los desembarques de sardina y anchoveta se asocia a las fluctuaciones del medio ambiente (Fig. 34 panel superior). En tanto, la segunda componente principal explica el 21% de la varianza total, mostrando una tendencia positiva entre la década del 60 y el 90 (Fig. 34 panel central). Como se observa en el panel inferior de la Fig. 34, en el eje principal las pesquerías de anchoveta y sardina presentan una variación opuesta, favoreciendo un ambiente "positivo" los desembarques de sardina y un ambiente "negativo" los desembarques de anchoveta. En cambio, con el segundo eje ambas pesquerías presentan una fluctuación similar, aumentando los desembarques cuando este eje presenta valores positivos.

La Fig. 35 (panel superior) muestra los esfuerzos de pesca anuales de anchoveta y sardina. El esfuerzo de anchoveta presenta dos periodos importantes: durante la década del 60 y comienzos del 70, y a partir de la década del 90, siendo los esfuerzos de este último periodo mayores que en el anterior. En tanto, el esfuerzo sobre sardina presenta un máximo a mediados de los 80. Es importante mostrar que la suma de ambos esfuerzos de pesca (Fig. 35 panel inferior), que representa el esfuerzo total de pesca sobre ambos recursos en la zona norte de Chile, muestra una evolución que se asemeja a la segunda componente principal desplegada en el panel central de la Fig. 34. De hecho, ambas series presentan un clara correspondencia, con una correlación de 0,94 (Fig. 36). Esto significa que los desembarques aumentan cuando aumenta el esfuerzo de pesca.

De esta manera se puede explicar el 90% de la variabilidad interdecadal de los desembarques, que representarían en esta escala temporal un índice de abundancia, a través de la variabilidad de un ambiente definido básicamente por las fluctuaciones de Zb (70%) y del esfuerzo de pesca (20%). El esquema que se muestra en la Fig. 37 resume estas relaciones.

Es interesante destacar que, si bien las variaciones del viento local parecen jugar un rol menor en la definición del ambiente oceanográfico, las variaciones del TE o del IT podrían aportar a la sucesión de especies pelágicas que se observa en la zona norte de Chile, en un ambiente definido por las variaciones del viento.

Por otra parte, si bien es posible encontrar explicaciones razonables sobre la relación entre las pesquerías y las fluctuaciones de las variables ambientales (como las discutidas en este documento), hay que considerar que las magnitudes de los cambios de las variables oceanográficas son pequeñas. Estas amplitudes son del orden de 8 décimas de grado en el caso de la TSM, de 10 centímetros en el NMM y de 10 m en Zb. Cabe preguntar si es posible producir un cambio en las pesquerías pelágicas con variaciones tan pequeñas del ambiente, descritas anteriormente. Por lo tanto, es necesario profundizar el análisis del ciclo vital de tales especies pelágicas y determinar que fase de este ciclo es más susceptible de ser modificado por las variaciones ambientales en la escala interdecadal.

# 4.1.2. Fluctuaciones espacio-temporales de variables bio-pesqueras y ambientales

# 4.1.2.1. Fluctuaciones espacio-temporales de variables bio-pesqueras

Esta pesquería ha sido analizada tomando en cuenta la evolución interanual del esfuerzo de pesca y la variabilidad de baja frecuencia del medio ambiente, con el objeto de comprender en mejor forma los cambios de largo plazo de la abundancia de los principales recursos explotados (Cañón, 1986; Cubillos y Fuenzalida 1990; Yáñez, 1989 y 1998). También se han realizado estudios sobre la influencia de las variaciones del medio ambiente en la distribución espacial de dichos recursos (Cañón, 1978; Castillo y Guzmán, 1985; Castillo *et al.*, 1995; Barbieri *et al.*, 1995a; Barría *et al.*, 1999).

Sin embargo, se necesita una comprensión más precisa de la distribución espacio-temporal de los recursos y del ambiente, para entender de mejor forma los problemas asociados a los cambios de abundancia y/o disponibilidad de los recursos en cuestión. Con esta óptica se analiza la distribución espacial de la CPUE de dichos recursos (1987-02); así como la distribución de la biomasa estimada por hidroacústica de anchoveta (1994-01) y la distribución de los huevos (1995-02) de anchoveta.

## Información analizada

La distribución espacio-temporal del índice de abundancia relativa (CPUE) se analiza con información de capturas georreferenciadas (por cuadrículas de 10\*10 mn) registradas diariamente por barcos cerqueros industriales (110) en la zona norte de Chile, durante el período 1987-2002. Esta información proviene de las bases de datos generadas en los proyectos FONDEF D98-I-1022 y FONDEF DOOT1066, y en términos de captura representa un porcentaje de los desembarques oficiales de SERNAPESCA (Tabla 1). Por otra parte, debido a la heterogeneidad de los barcos en cuestión, cuya capacidad de bodega fluctúa entre los 100 y 550 m<sup>3</sup>, se realizó una estandarización del esfuerzo de pesca con modelos lineales generalizados, para hacer comparativas las CPUE (ANEXO 3). De esta manera, la distribución espacio-temporal anual y mensual de la CPUE de los recursos en cuestión fue analizada utilizando el Sistema de Información Geográfica IDRISI (Eastman, 1999). Para cada mes se generaron cartografías de CPUE y se calculó el área (en grados cuadrados) del polígono que encierran los datos distribuidos en el espacio. Por otra parte, las series de tiempo extraídas fueron suavizadas con promedios móviles centrados. En tanto que análisis FOE (Funciones Ortogonales Empíricas) fueron realizados sobre las cartografías anuales de las CPUE de las tres especies consideradas. Es necesario indicar que las pesquerías de los recursos en cuestión son sometidas a vedas extractivas desde 1983, lo cual incide de alguna manera en las estimaciones mensuales que se consideran (Tabla 2).

La información hidroacústica registrada en las prospecciones es grabada por unidades básicas de muestreo (UBM) de 0,5 millas. Para cada UBM se obtiene información espacio temporal (latitud, longitud, año, mes) de la energía acústica retrodispersada por unidad de superficie (Sa) en  $m^2/mn^2$  (Hernández, 2004). La información analizada corresponde a la data acústica georreferenciada de anchoveta obtenida de cruceros de evaluación de biomasa y reclutamiento, de cruceros de aplicación del método de producción de huevos (MPH) y bioceanográficos, entre 1994 y 2002 en la zona norte de Chile. Dichas bases de datos presentan problemas; en algunos casos la información es incompleta y en otros simplemente no se encuentra (Tabla 3).

Código proyecto	Información faltante	Código proyecto	Información faltante
95-02	Horaria	2000-07	Sa
97-02	Posición	2001-01	Ubicación
98-08	Posición y Sa	2001-11	Sa
98-12	Sa	2002-01	Sa

Tabla 3. Información acústica faltante de proyectos FIP (1994-02).

Para el análisis de la distribución de huevos de anchoveta se contó con la información de los cruceros MPH realizados en los períodos 1995-1996 y 1999-2002. La base de datos de 1997 no estuvo disponible; en tanto que en 1998 no se efectuó el crucero.

# Captura por unidad de esfuerzo

En la escala interanual, al comparar las distribuciones anuales de la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) de sardina, se establecen diferencias entre años; lo mismo ocurre con las distribuciones anuales de anchoveta (Fig. 38). Estas diferencias se deberían a variaciones de abundancia de los recursos y a los efectos de las modificaciones del ambiente. Durante los eventos El Niño ambas especies presentan distribuciones más costeras y en los últimos años del período 1987-02 se habrán producido notables disminuciones de abundancia, particularmente de sardina. La anchoveta se distribuye preferentemente dentro de la primeras 60 mn de la costa, aunque extrañamente en 1991, 1992 y 2002 sobrepasa este límite en el norte de la zona de estudio, no obstante que la fracción más importante estuvo concentrada en la costa (Fig. 38). Sin embargo, normalmente los valores más importantes de CPUE de anchoveta se registran en las primeras 20 mn; en tanto la sardina presenta una distribución más amplia, distribuyéndose hasta los 73°W.

Al comparar las cartografías anuales de anchoveta y sardina a través del Índice V de Cramer (IVC), se observan marcadas diferencias entre 1987 y 1992, dada la distribución más amplia de la sardina; las diferencias son menores en 1993 y 1994, con un IVC de 0,68 y 0,77 respectivamente (Fig. 38). Las diferencias son también notables en el período 1995-02, pero dada la gran disminución de la abundancia de sardina (Fig. 10b), la anchoveta aparenta una distribución más amplia, salvo el excepcional 1999 en sardina. No obstante lo anterior, durante los eventos El Niño ambas especias presentan distribuciones más costeras,

particularmente en 1987 y 1997-98; en tanto que en los últimos años del periodo estudio se habrían presentado notables disminuciones de abundancia de sardina (Fig. 38). Esto último provoca que el IVC indique diferencias entre las distribuciones de ambas especies, toda vez que las cartografías indican que la sardina presenta una cantidad de datos no comparables con las cartografías de anchoveta.

En el período analizado la anchoveta muestra, sin considerar El Niño de 1987, su mayor área de distribución hasta 1991; después de El Niño 1991-92, ésta se recupera y vuelve a disminuir durante El Niño de 1997-98; en tanto que posteriormente tiende nuevamente a recuperarse (Fig. 39a). La sardina muestra dos situaciones relativamente claras: una distribución más amplia hasta 1992 y una drástica disminución posterior, con la salvedad del área que habría ocupado en 1999 (Fig. 39b). El jurel presenta la mayor área de distribución en 1990-92; después disminuye en 1993-96 y en 1997-98, para tender a recuperarse al final del período (Fig. 39c).

Frente a éstos resultados podríamos inferir que la distribución de anchoveta se ve afectada por los eventos El Niño, modificando la disponibilidad y/o abundancia. En condiciones ambientales favorables de características más bien frías del período 1987-2003 (Fig. 17), la anchoveta tendería a recuperarse no obstante los altos niveles de esfuerzo desarrollados en este período (Fig. 11). En cambio la sardina habría reducido drásticamente su área de distribución debido a una notable disminución de su abundancia en la zona (Fig. 10b), lo que se refleja en la disminución de sus capturas (Fig. 5b). El jurel estaría también reduciendo su área de distribución en la zona, aunque con una reducción de la abundancia y capturas que se estaría dando en forma más lenta (Fig. 5c ).

Al analizar los centros de gravedad (CG) de las distribuciones de anchoveta, sardina y jurel en período 1987-95, longitudinalmente no se sobreponen dado que la sardina y el jurel se ubican más lejos de la costa (Fig. 40). En tanto que entre 1996 y el 2002 la sardina y el jurel muestran CG más cercanos a la costa.

Los CG de anchoveta muestran una distribución entre los 70°25' y los 70°41'W (Fig. 41a). En 1987, el CG de esta especie se encuentra muy cerca de la costa, ubicándose en los 70°25'W y hacia el sur. En el período 1988-92 el CG anual se desplaza a los 70°39'W y hacia el norte. En 1993 la anchoveta presenta un CG más costero, asociado al evento cálido de 1991-92, que persiste en 1993-94 (Chávez *et al.*, 2002). Los CG de 1997 y 1998 resultan los más cercanos a la costa del período de estudio, lo que se asocia al fuerte evento El Niño 1997-98 (Fig. 4 y 17). Con respecto a la ubicación latitudinal, los CG mantienen su ubicación alrededor de los 20°50'S, con la excepción de las ubicaciones bastante al norte de los CG de 1991 y 1992.

Los CG anuales de sardina se distribuyen desde los 70°25'W hasta los 71°30'W (Fig. 41b). En 1987, el CG se encuentra bastante más cercano a la costa, en los 70°39'W. Después y hasta 1991, el CG se ubica hasta los 71°30'W, para desplazarse abruptamente hacia la costa y recuperar la ubicación sur en 1992, lo que coincide con los cambios de distribución observado en anchoveta. Posteriormente, los CG de sardina se mantienen longitudinalmente relativamente estables. Se observa además, que la distribución del jurel insinúa el mismo comportamiento que la sardina (Fig. 41c).

Al comparar las distribuciones anuales de CPUE de sardina se establecen diferencias entre años; lo mismo ocurre con las distribuciones anuales de anchoveta (Fig. 38). Estas diferencias se deberían a variaciones de abundancia de los recursos y a los efectos de las modificaciones del ambiente. Durante los eventos El Niño ambas especies presentan distribuciones más costeras y en los últimos años del período 1987-02 se habrán producido notables disminuciones de abundancia, particularmente de sardina.

La anchoveta se distribuye preferentemente dentro de la primeras 60 mn de la costa, aunque extrañamente en 1991, 1992 y 2002 sobrepasa este límite en el norte de la zona de estudio, no obstante que la fracción más importante estuvo concentrada en la costa (Fig. 38). Sin embargo, normalmente los valores más importantes de CPUE de anchoveta se registran en las primeras 20 mn. En tanto, la sardina presenta una distribución más amplia, distribuyéndose hasta los 73°W.

Los análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (FOE) a la series anuales de CPUE de anchoveta, sardina y jurel, para el período 1987-2002, consideran los 2 primeros

componentes principales (PC) en su modo espacial y temporal (Fig. 42 y 43). En las imágenes FOE, los eigenvalores positivos delimitan las zonas donde la CPUE es mayor a cero; inversamente, eigenvalores negativos indican zonas donde no hay capturas. Amplitudes positivas del modo temporal acentúan las zonas positivas y negativas, mientras que amplitudes negativas disminuyen el gradiente entre ambas áreas.

El modo espacial del PC1 de la CPUE de anchoveta explica el 70% de la varianza (Tabla 4) y es positivo en un área marina comprendida entre la costa y las 60 mn (Arica) a 30 mn (Tocopilla) mar adentro (Fig. 42), disminuyendo el área en sentido sur. Se observa un marcado gradiente perpendicular a la costa, en donde los mayores eigenvalores se encuentran cercanos a la costa, disminuyendo hacia el oeste. Se observa que altos eigenvalores (30 – 160) se encuentran concentrados en las primeras 20mn, siendo esta área más amplia entre Iquique y el río Loa. La evolución temporal de la amplitud de los eigenvectores muestra sólo valores positivos, acentuándose el patrón espacial en los años con amplitudes más altas. Los valores temporales más altos del período se registran en 1989, 1994, 1995 y 1997, lo que coincide con los años de máximos desembarques (Fig.4). La evolución temporal de los eigenvectores estaría reflejando entonces la dinámica seguida por los desembarques (Fig. 4).

El PC2 de la CPUE de anchoveta explica 7% de la varianza (Tabla 4). El modo espacial presenta áreas con valores positivos que se localizan cercanos a la costa y hasta los 80 mn (Fig. 43). A diferencia del modo espacial del PC1, este patrón espacial muestra áreas con altos eigenvalores localizadas más lejos de la costa, indicando un patrón de distribución más amplia del recurso en ciertas latitudes (Arica, Pisagua a Loa). Este patrón caracterizado por una distribución más amplia de la anchoveta se manifestó en 1994, único año del período que presenta valores positivos de amplitud temporal.

El modo espacial del PC1 de la CPUE de sardina explica el 69% de la varianza y es positivo en un área marina comprendida entre la costa y las 90 mn (Arica) a 60 mn (Loa). Se observa un marcado gradiente perpendicular a la costa, donde los mayores eigenvalores se encuentran más cercanos a la costa, disminuyendo hacia el oeste hasta llegar a cero en la zona neutral. El modo temporal muestra sólo valores positivos, acentuándose el patrón

espacial en los años con amplitudes más altas. Los años con valores temporales más altos son 1987, 1989 y 1992; después de 1994 se presentan valores muy cercanos a 0, con excepción de 1999 en donde se presentan valores positivos. La evolución temporal de los eigenvectores estaría reflejando la dinámica seguida por los desembarques (Fig. 5). A diferencia de la anchoveta que presenta un patrón espacial más costero, la sardina presenta una cobertura de eigenvalores positivos más amplia abarcando un área más oceánica.

El PC2 de la CPUE de sardina explica 11% de la varianza (Tabla 4). El modo espacial presenta un área de valores negativos localizada dentro de las primeras 20 mn.

	Mo		
CPUE	1	2	Total
Anchoveta	69,8%	7,1%	77,0%
Sardina	69,5%	11,4%	80,9%
Jurel	53,6%	8,8%	62,4%

Tabla 4. Varianza explicada por modos FOE de la CPUE de anchoveta, sardina y jurel.

Al analizar la variabilidad en la escala estacional, se debe considerar que las pesquerías de anchoveta, sardina y jurel de la zona norte de Chile han sido sometidas a vedas extractivas (Tabla 2). Estas vedas afectan entonces los niveles de captura y el carácter de muestreador de la flota cerquera industrial en algunos meses. No obstante, durante los periodos de veda se autoriza la captura para carnada y la elaboración de productos para consumo humano, y la realización de muestreos biológicos con barcos pesqueros.

La señal anual de las cartografías de CPUE muestra que la anchoveta se distribuye entre diciembre y abril bastante concentrada en la costa; luego se desplaza hacia el norte hasta septiembre, distribuyéndose hacia fines de año (septiembre-noviembre) ampliamente en la zona (Fig. 44a). Las cartografías muestran que los valores más importantes de CPUE se presentan durante el primer trimestre, y entre el tercero y cuarto trimestre, asociados a los límites entre las estaciones cálida y fría.

En la cartografía mensual se observa que en 1994 el recurso se distribuye longitudinalmente en toda la zona y durante todo el año, con un aumento en la CPUE

(ANEXO 4). En 1997, hasta junio la anchoveta se encuentra en una posición muy costera y

(ANEXO 4). En 1997, hasta junio la anchoveta se encuentra en una posición muy costera y con un aumento en la CPUE; luego disminuye en forma considerable, mostrando escasos datos, lo cual se mantiene hasta fines de 1998, recuperándose en 1999.

Las cartografías de la señal anual de la CPUE de sardina muestran que en enero se distribuye ampliamente en la zona de estudio, en tanto que en febrero-mayo se observa cerca de la costa y en mayo-octubre (estación fría) al norte de los 21°S (Fig. 44b). Hacia fines de año la sardina se distribuye más ampliamente en la zona de estudio. No obstante, en 1987, en los meses de fin de años el recursos se encuentra más cerca de la costa, lo que se asocia a los efectos del evento El Niño ocurrido este año. En ANEXO 4 se observa que después de 1994 la CPUE de sardina disminuye considerablemente, mostrando una recuperación particular entre marzo y junio de 1999.

En la cartografía de la señal anual de jurel se observa una distribución relativamente costera desde febrero a mayo, comportamiento que sigue un patrón similar al de sardina; en junioagosto su ubicación es más oceánica (Fig. 44c). Entre septiembre y diciembre éste se desplaza hacia el norte. En la cartografía mensual se observa que hasta 1993 la distribución del jurel es desde la costa hasta los 73°W durante todo el año (ANEXO 4). Luego se presenta cercano a la costa hasta el final del periodo de estudio, con la excepción de agostoseptiembre del 2001 en que se desplaza hacia el océano. Cabe señalar que desde 1994 comienzan a disminuir los valores de CPUE, con una recuperación en 1995-96 y 2000-01.

## Biomasa hidroacústica

Las evaluaciones hidroacústicas se realizan solo para el recurso anchoveta y en transectas paralelas entre si y perpendiculares a la costa; su longitud varía dependiendo del objetivo del crucero (evaluación hidroacústica 100 mn, reclutamiento 20 mn). La data recolectada corresponde al periodo 1994-2001, donde se registra un máximo de 3 meses muestreados en 1994 y 1995. Sin embargo, debido a la calidad de las bases de datos, en algunos meses no existen observaciones, como en noviembre-diciembre de 1998 y febrero-marzo de 1999 (Fig. 45).

La cartografía de los cruceros de evaluación hidroacústica de 1994 y 1995, de reclutamiento de 1996-1998-2000 y 2001, y del MPH de 1997 se muestran en la figura 46. En 1994 el crucero de prospección acústica se realizó entre el 24 de agosto y el 10 de septiembre, con valores promedio de Sa que llegaron hasta los 1600. Se detecta presencia del recurso en forma latitudinal prácticamente en toda la zona de estudio (Fig. 46). Las mayores concentraciones se localizaron en los 21°S y los 71°30'W y de los 22°30'S hasta Antofagasta. En el año 1995 los límites de la distribución de anchoveta variaron entre la costa y las 85 mn. Se observan 2 zonas de concentración, la primera entre Arica y Pisagua con menor presencia del recurso anchoveta (Fig. 46). El período de la data acústica de 1996, corresponde a la principal época de reclutamiento (18 noviembre - 9 diciembre), donde la anchoveta se distribuyó cerca de la costa, no superando las 5 mn desde Arica al río Loa, destacándose las inmediaciones de éste con altas concentraciones del recurso. Desde el Loa al sur se detectan escasas observaciones.

En 1997 la anchoveta se distribuyó desde Arica hasta los 24°S, entre la costa y las 60 mn, registrándose en las primeras 8 mn de la costa, llegando ocasionalmente hasta las 20 mn (Fig. 46). Las mayores concentraciones de anchoveta se detectaron en dos focos importantes, el primero entre Iquique y el Loa caracterizándose por su distribución costera, y el segundo al sur del Loa con una distribución más oceánica, con altas concentraciones en la costa en las inmediaciones de Antofagasta y Mejillones. El período cartografiado de 1998 está comprendido entre el 6 y 25 de enero. La distribución de anchoveta se caracterizó por su alta presencia en el sentido latitudinal, registrándose en prácticamente toda la zona de estudio, con dos zonas importantes de alta concentración del recurso frente a Arica y en las cercanías de Antofagasta-Mejillones. Se observa además una tercera zona menos importante entre Iquique y el río Loa (Fig. 46). El 2000 corresponde al periodo del 4 al 21 de diciembre del 2000, donde la anchoveta se distribuyó prácticamente en toda la zona de estudio entre la costa y las 8 mn (Fig. 46). Se detectaron altas densidades entre Arica y los 18°40'S, entre Tocopilla y Mejillones y un tercer foco más importante en Antofagasta. La cartografía del 2001 corresponde al crucero de reclutamiento realizado entre el 28 de noviembre y el 10 de diciembre de 1998 (Fig. 46). La distribución del recurso en el 2001

muestra un aumento en la concentración de anchoveta en toda el área de estudio, aunque se

mantiene un área importante en las inmediaciones de Antofagasta y Mejillones, un foco en las cercanías del río Loa y otro foco importante entre Pisagua e Iquique.

Al comparar la evolución anual de la Sa de anchoveta y la CPUE, se observa que en 1994 y 1995 se comportan en forma similar; luego las variables no siguen el mismo patrón. Sin embargo, es importante considerar que los meses de muestreo acústico corresponden a meses sometidos a veda (agosto-septiembre) (Fig. 47). Al comparar septiembre de 1994, donde el crucero hidroacústico se realizó en toda la zona y además la data corresponde a todo el mes y se comparó con la CPUE diaria en el mismo mes, se observa una disminución de la abundancia de anchoveta desde mediados del mes. La CPUE no sigue una tendencia clara ni comparable con los datos acústicos (Fig. 48).

## Huevos de anchoveta

El número total de estaciones muestreadas (ET) y el número de estaciones con registros positivos de huevos ( $E^+$ ) de los cruceros analizados se presentan en Tabla 5 y Figura 49a. Destacan el 2001 y 2002, respectivamente con la menor (12%) y mayor (53%) proporción de  $E^+$  respecto de ET. El número promedio de huevos en las estaciones totales (PET) tiene un valor mínimo en 1996 (9) y máximo en el 2002 (31); en tanto el promedio de huevos en las estaciones positivas (PE<sup>+</sup>) es máximo en el 2001 (93) (Tabla 5, Fig. 49b). La mayor diferencia entre PET y PE<sup>+</sup> se registra en el 2001 (PE<sup>+</sup>=9,3\*PET). Al relacionar PET con la CPUE anual de anchoveta en el período 1995-2002, se observan fluctuaciones similares, no obstante la tendencia de la CPUE es negativa y la del PET positiva (Fig. 50).

	ET	<u>E+</u>	E+/ET	PET	PE+
1995	578	208	36	13	36
1996	752	176	23	9	38
1997	800	209	26	SI	SI
1999	598	133	22	11	45
2000	502	212	42	21	49
2001	514	60	12	10	93
2002	588	309	53	31	59

Tabla 5. Estadísticas de los cruceros MPH de anchoveta en la zona norte de Chile.

SI: sin información

La distribución espacio-temporal de huevos de anchoveta se presenta en la figura 51. Aunque los cruceros de MPH se extienden desde el límite con Perú a los 25° y 26°S (dependiendo del año), la zona de estudio comprometida para el presente proyecto se restringe a los 24°S. A partir de las estimaciones puntuales de huevos de las transectas muestreadas, se aplica krigging para generar cartografías de datos interpolados (Fig. 52). En las cartografías destaca la importancia de la zona del río Loa (20°50'-23°S) como área de desove. La distribución espacial muestra una importante variabilidad interanual en la extensión y localización de los focos de desove. En 1995, la mayor densidad de huevos se presenta al sur del río Loa, principalmente entre los 21°10' y 22°10'S. En 1996, el mayor foco de distribución de huevos se localiza entre Iquique y Tocopilla (20°-22° S). Una distribución más septentrional de la zona de desove se presenta en 1999, localizándose entre Arica y el sur de Tocopilla, con un núcleo principal entre los 21º y 22ºS. En 2000, la distribución de huevos se extiende latitudinalmente en toda el área de estudio, destacándose 4 zonas de mayor concentración: Punta Tetas (23°30'S); Punta Algodonales-Caleta Paquica (21°55-22°05'S), Caleta Guanillos del Norte-Punta Cavancha (21°10'-20°15'S) (Oliva et al., 2001). El 2001 presenta una reducida área de distribución de huevos, concentrada en focos costeros como Punta Gruesa (20°20'S) y río Loa (21°50), contribuyendo con el 55% de los huevos, y Mejillones (23°00'S) y Antofagasta (23°40'S), registrándose el 36% de los huevos (Oliva et al., 2002). Finalmente, en el 2002 la zona de distribución presenta la mayor extensión del periodo analizado, concentrándose alrededor de los 22°S.

#### 4.1.2.2. Fluctuaciones espacio-temporales de variables ambientales

#### Temperatura superficial del mar

La variabilidad espacio-temporal de la temperatura superficial del mar (TSM), del período 1987-2002, se estudia con información proveniente de satélites NOAA. Las imágenes de TSM satelital tienen una resolución espacial aproximada de 1km x 1km y representan matrices de 180 columnas y 330 filas que abarcan la zona comprendida entre la costa y los 73°W, y desde los 18° a los 23°30'S. Para el período de estudio se utilizaron aproximadamente 3.100 imágenes diarias de TSM, generando 768 imágenes semanales que representan la información base de este estudio. Con la información semanal se generaron 192 imágenes de TSM promedio mensual (ANEXO 5) y con éstas se crearon las 16 imágenes de TSM promedio anual (Fig. 53), que sirvieron para calcular la TSM promedio del período, se genera la climatología de la TSM satelital, correspondiente a imágenes de 18M promedio, se y la TSM promedio estacional (Fig. 59).

En la figura 54 se presenta la TSM satelital del área de estudio, correspondiente al promedio del período 1987-2002. Las mayores temperaturas se encuentran en la zona oceánica, mientras que las menores se localizan cercanas a la costa. Se observan gradientes de temperatura perpendiculares y paralelos a la costa, formados por las aguas frías costeras y las cálidas de origen oceánico.

Las imágenes de la TSM promedio anual, muestran una alta variabilidad caracterizada por la presencia de eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) (Fig. 53). Los eventos El Niño más intensos del período se presentaron en 1997-1998 y 1987. El año 1997 es el más cálido del período, registrando valores promedios anuales que fluctuaron entre los 20° y 23°C, con un promedio espacial igual a los 21,7°C. El segundo año más cálido fue 1998 con un promedio espacial de 20,7°C, seguido de 1987 que registró un promedio de 20,4°C. Durante los eventos El Niño (1987, 1992 y 1997-1998), se observó un predominio de anomalías positivas de la TSM, siendo más marcadas en la zona costera (Fig. 55) que en la oceánica (Fig. 56).
Entre 1988 y 1991 se evidencian los menores valores anuales de TSM, registrando promedios espaciales cercanos a los 19,5°C, con un mínimo de 17,8° y un máximo de 20,2°C. Durante este período prevalecen en la zona norte de Chile anomalías negativas de TSM (Figs. 55 y 56), destacándose 1990 como el año más frío con una media espacial de 19,1°C.

Entre 1992 y 1996 los valores promedios anuales son bastante similares (promedios espaciales cercanos a los 20°C) y moderadamente mayores a los registrados entre 1988 y 1991. En la zona costera se observa que 1992 fue el más cálido y predominaron las anomalías positivas de TSM; mientras que 1996 fue el más frío (Fig. 55).

Después de El Niño 1997-98, se presenta en el período 1999-2002 una condición normal a fría en el sector costero, registrándose un predominio de anomalías de la TSM (ATSM) negativas durante todo el período (Fig. 55). No obstante, se evidencia que el enfriamiento que afectó al sector costero no se registra en el sector oceánico, donde se manifiestan ATSM positivas y negativas (Fig. 56). Los promedios espaciales y rangos para estos años son muy similares, registrándose una media entre los 19,6° y 19,8°C, con TSM mínimas y máximas de 16,3° y 21°C respectivamente.

Las fluctuaciones espacio – temporales de la TSM anual en el período 1987-2002, son analizadas a través de Funciones Ortogonales Empíricas (FOE), considerando los 2 primeros componentes principales (PC) en sus modos espacial y temporal (Fig. 57a). El PC1 explica el 92% de la varianza y es negativo entre la costa y las 20 mn, desde el límite norte y hasta los 21°20'S; mientras que al sur de los 21°20'S los valores son negativos en toda el área. Se observa un marcado gradiente perpendicular a la costa, donde se incrementan los eigenvalores en sentido este-oeste. Así también se distingue un gradiente paralelo a la costa, donde se incrementan los eigenvalores en sentido sur-norte. El patrón espacial se manifiesta en todo el período, ya que los valores de amplitud temporal son positivos. Este patrón espacial (gradientes perpendicular y paralelo a la costa) se acentúa o es más marcado en el período 1998 – 2002, mientras que 1990 y 1997 son los años en que el gradiente entre valores negativos y positivos es menor.

El PC2 explica el 5% de la varianza y es negativo desde la costa hasta los 72°W (frente a Arica), y los 71°W frente a Mejillones (Fig. 57b). Se observa un gradiente perpendicular a la costa, donde se incrementan los eigenvalores en sentido este-oeste. Este patrón es más marcado en los años más fríos (1988, 1989, 1996, 1999, 2000, 2001 y 2002), los cuales presentan eigenvalores positivos.

Al observar las imágenes de la TSM promedio mensual (ANEXO 5), de la climatología mensual (Fig. 58), de la climatología estacional (Fig. 59), del Hovmoller de la TSM semanal (Fig. 62 y 64) y del Hovmoller de la TSM mensual (Fig. 66 y 68), del período 1987-2002, podemos señalar que esta variable presenta una marcada estacionalidad, registrando los máximos valores durante los meses de verano y los mínimos en los meses de invierno. La principal característica espacial en las imágenes climatológicas de TSM mensual (Fig. 58) y estacional (Fig. 59), es el gradiente perpendicular a la costa formado entre las aguas frías costeras (influenciadas por surgencias inducidas por vientos sur y suroeste) y las aguas cálidas oceánicas de origen subtropical. El mayor gradiente se presenta en verano, seguido de gradientes intermedios y similares durante otoño y primavera, encontrándose los mínimos gradientes durante el invierno. Otro patrón espacial de la TSM estacional es el gradiente latitudinal, que se caracteriza por un descenso de la TSM hacia el sur de la zona de estudio.

La climatología de la TSM mensual (Fig 58) y estacional (Fig 59) muestra cambios en la distribución espacio – temporal de la temperatura, constatándose que esta variable tiene una marcada estacionalidad, con máximos valores durante los meses de verano y mínimos en invierno. En efecto, considerando toda el área de estudio la TSM promedio de verano registra los máximos valores con un promedio espacial de 22,8°C y un rango que varía entre 19,1° y 23,9°C. En otoño los valores de TSM tienden a disminuir, alcanzando un promedio espacial de 20,1°C, con un valor mínimo igual a 17,8°C y un máximo de 21°C. En invierno se registran los mínimos valores y un bajo gradiente de TSM, alcanzando una media espacial de 17,2°C y un rango que fluctúa entre 16,2° y 17,8°C. En primavera se presenta un aumento de los valores y del rango de la TSM, registrándose un promedio espacial de 19,8°C con una variación que va desde los 18° a los 20,7°C. La climatología de

la TSM estacional refleja que su distribución espacial y la magnitud es similar en otoño y primavera. Por otro lado, en verano se registran los valores más altos y en invierno los más bajos.

En la figura 60 se observan los valores de la TSM mensual extraídos del perfil costero ubicado a 6 mn (Fig. 61), donde se evidencia una marcada estacionalidad, con una estación cálida que se inicia en octubre y finaliza en mayo. Durante el período de estudio la TSM mensual oscila entre 15,9° y 24,9°C; los valores máximos se presentan en los meses de verano, con excepción de 1989 y 1997 en que el máximo se presenta en diciembre. Los máximos valores de TSM en verano se registraron en los años afectados por eventos El Niño, observándose las mayores temperaturas en 1998, seguido de 1987 y 1992. Los valores mínimos se presentan en los meses de invierno, con excepción de los años 1997 y 1987, en que se registraron mínimos de 20,2° y 17,9°C respectivamente, alcanzando anomalías positivas de 1,3° y 3,5°C con respecto al promedio. El año 1997 es el más cálido del período (1,4° a 3,6°C sobre lo normal) y este no presenta una clara estacionalidad debido al notable aumento de la TSM en otoño, invierno y primavera.

Por otro lado se estudia la variabilidad estacional, extrayendo información estadística (promedio y rango) de la serie de imágenes de TSM promedio semanal, considerando un perfil costero (6 mn) y otro oceánico (80 mn), compuestos de cuadrículas de muestreo de 10\*10 mn (Fig. 61). Los valores promedio y rangos o gradientes (GRT) de la TSM semanal por cuadrícula y para cada perfil, son representados en diagramas Hovmoller (latitud-tiempo) que permiten reducir la serie de imágenes a una representación gráfica más comprensible (Figs. 62, 63 y 64). También se generan diagramas Hovmoller con las imágenes de las ATSM mensuales y las TSM mensuales (Fig. 66 y 68).

En los Hovmoller de la sección ubicada 6 mn frente a la costa, se observa alta variabilidad estacional e interanual de la TSM (Fig. 62) y del GRT (Fig. 63) semanal. El año 1987 fue afectado por un evento El Niño, que aumentó la TSM, generando ATSM positivas, afectando el ciclo estacional y reduciendo la intensidad de los GRT. Entre 1988 y 1996 se observa un marcado ciclo estacional, caracterizado generalmente por la presencia de TSM mayores a 18°C y GRT mayores a 1°C en primavera, verano y otoño; mientras que TSM

83

menores a 18°C y bajos GRT se presentan durante el invierno. Una excepción son los años fríos de 1988, 1989 y 1990, donde las TSM menores a 18°C se registran desde finales de otoño y hasta principios de primavera.

Durante 1997 y hasta finales de otoño de 1998 la zona es afectada por un evento El Niño, el cual produjo un notable aumento de la TSM y altos valores de ATSM; no obstante, se mantienen la intensidad y la estacionalidad de los GRT que caracterizan el período 1987 - 1996. Desde la primavera de 1998 y hasta finales de 2002 se observa un período frío en la zona costera, caracterizado por la persistencia de ATSM negativas (Fig. 65) y un aumento tanto en la intensidad del ciclo estacional de la TSM (Fig. 62), como en la intensidad y cobertura espacial de los GRT (Fig. 63).

En los Hovmoller de la sección ubicada a 80 mn frente a la costa, se observa alta variabilidad estacional y zonal de la TSM (Fig. 64). En el período 1987-1996, al comparar los diagramas costero y oceánico se observa en este último un aumento de la TSM en los meses de verano y otoño, coincidente con el gradiente perpendicular a la costa característico de la región. Por otra parte se presenta una condición similar en las zonas costera y oceánica durante el invierno y la primavera, período en que disminuye el gradiente longitudinal. Al observar las anomalías de la TSM del perfil oceánico para este período (Fig. 67), se evidencia el evento cálido de 1987, seguido por un período frío (1988-1991) y otro más cálido (1992-1996) que culmina con el evento cálido de 1997-1998.

Durante el período 1999–2002 el ciclo estacional es más marcado, observándose un notable aumento de la diferencia termal entre la zona costera y oceánica. Esto se debería al enfriamiento de las aguas costeras producto de la persistencia de las surgencias inducidas por los vientos predominantes. No obstante el enfriamiento del sector costero, en la zona oceánica se mantiene la condición cálida, acentuando la diferencia térmica o gradiente entre ambos sectores. En efecto, al comparar las ATSM del sector oceánico (Fig. 67) con las del sector costero (Fig. 65), en el período 1999-2002, se evidencia que el enfriamiento que afectó el sector costero no se registra en el sector oceánico, donde se manifiestan anomalías positivas de TSM principalmente en los meses de verano y otoño.

Se realiza un análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (FOE) a la serie de 192 imágenes de ATSM mensual para el período 1987-2002, el cual considera los 3 primeros componentes principales (PC) en sus modos espacial y temporal (Fig. 69, Tabla 6). Para interpretar los FOE, se consideran los eigenvectores espaciales junto a su correspondiente amplitud temporal. En las imágenes FOE, los eigenvalores positivos delimitan las zonas donde la TSM satelital es mayor al promedio; inversamente, eigenvalores negativos indican las zonas donde la TSM satelital está bajo el promedio. Positivas amplitudes tiempodependientes acentúan las zonas positivas y negativas de las imágenes, mientras que las amplitudes temporales negativas disminuyen los gradientes entre áreas positivas y negativas.

	1	2	3	Total
ATSM satelital	30,84%	15,41%	5,17%	51,42%

Tabla 6. Varianza explicada (%) por los tres primeros modos del FOE de la ATSM satelital.

El modo espacial del PC1, que explica el 30,84% de la varianza (Tabla 6), es negativo en el área marina comprendida entre la línea de la costa y las 30 mn (Arica a Pisagua), y a 80 mn (Loa–Mejillones) (Fig. 69a). Se observa un marcado gradiente perpendicular a la costa, donde los valores se incrementan en sentido Este – Oeste. La evolución temporal de la amplitud de los eigenvectores muestra a escala estacional principalmente valores negativos entre 1987 y mediados de 1998; no obstante, se registraron meses con valores positivos (1988, 1989 y 1996) en donde se acentuó el patrón espacial del gradiente longitudinal. En 1997 se alcanzan los valores temporales más negativos, evidenciado que este año se caracterizó por la disminución del gradiente entre áreas positivas y negativas. En efecto, aquí disminuyó la diferencia entre la TSM máxima (verano) y la mínima (invierno), lo que generó que la estacionalidad durante este año no sea muy evidente (Fig. 69a). Desde mediados de 1998 y hasta diciembre de 2002 se presentan valores positivos en las amplitudes temporales de los eigenvectores, los que realzan los gradientes espaciales. Es decir, la TSM cercana a la costa fue más fría mientras que la oceánica fue más cálida, acentuando así el gradiente perpendicular a la costa. La evolución temporal de los

eigenvectores muestra variaciones interanuales y estacionales. Los ciclos estacionales más acentuados fueron registrados en el 2000, 2001 y 2002, observándose un patrón común en los tres años, que se caracterizó por presentar máximos valores en los meses de verano para continuar con una tendencia decreciente hasta primavera. El patrón espacial y temporal observado durante estos años se explicaría por la disminución de la TSM costera (Fig. 65), debido al aumento de los eventos de surgencias inducidas por vientos sur y sur-este. El predominante enfriamiento de las aguas costeras junto a la condición normal a cálida registrada en la zona oceánica (Fig. 67), explicaría la amplitud temporal positiva dominante en estos años, que acentúa las zonas positivas y negativas de las imágenes.

El segundo (PC2) modo FOE de la ATSM mensual (Fig. 69b) explica 15,41% de la varianza (Tabla 6). En el modo espacial se observa un marcado gradiente paralelo a la costa, donde los valores se incrementan en sentido norte – sur. El PC2 de la ATSM contiene eigenvalores negativos en la zona norte del área de estudio y positivo en la porción sur. La línea neutral es diagonal a la costa, partiendo desde aproximadamente Tocopilla con dirección este – oeste para terminar alrededor de los 20°S y 73°W. La evolución temporal de la amplitud de los eigenvectores muestra una alta variabilidad, observándose que el patrón espacial formado por el gradiente latitudinal entre una TSM bajo lo normal en el área norte y una TSM sobre lo normal en área sur, se manifiesta preferentemente en los años normales a fríos y que presentan valores positivos de amplitud temporal, como 1988 a 1991, 1996, 1999, 2000 y 2002.

El modo espacial PC3 de la ATSM mensual (Fig. 69c) explica 5,17% de la varianza (Tabla 6). En el modo espacial se observa un área elipsoide que contiene eigenvalores positivos, la cual se localiza a 20 mn frente a la costa, abarcando hasta los 72°20'W por el oeste, y desde el límite sur hasta los 19°S por el norte. Los valores se incrementan hacia el centro del área; este patrón puede estar asociado a la presencia de fenómenos de mesoescala como Eddies.

#### Fluctuaciones de la Clorofila\_a satelital

En la figura 70 se presenta la clorofila\_a satelital, correspondiente al promedio del periodo 1997-2003, para el área de estudio. En ella se puede apreciar que las mayores

concentraciones de clorofila a se encuentran en una banda angosta apegada a la costa, la cual no excede los primeros 100 km. Las concentraciones de clorofila a en la zona oceánica son un orden de magnitud menores que las observadas en la zona costera. El máximo costero de clorofila a posee una mayor extensión hacia el oeste en la zona frente a Arica (18-19°S), Iquique (20-21.5°S) y Antofagasta (22.5-24°S). Esta subdivisión natural de la distribución de la clorofila se utilizó para caracterizar algunos rasgos de la variabilidad espacial y temporal de ella. Esto se llevó a cabo mediante la confección de series de tiempo diarias con el promedio de los datos de clorofila obtenidos en una cuadricula costera (entre la costa y 60 km) y otra oceánica (entre 100 y 200 km de la costa) para el rango de latitudes de la zona de Arica (18-19°S), Iquique (20-21.5°S) y Antofagasta (22.5-24°S), respectivamente. Estas series de tiempo fueron filtradas con un filtro de paso bajo Coseno-Lanczos de 49 días y con una amplitud media de 10 días, de tal forma de remover todos los periodos menores a una semana. La clorofila a en la zona costera presenta un progresivo aumento de la concentración y amplitud de la varianza desde 1997 en adelante (Fig. 71). Una tendencia similar se observa en la zona oceánica, aunque el incremento es mas débil y se presenta principalmente en la concentración, y en menor grado en la varianza (Fig. 72). Esta tendencia podría estar asociada a la saturación del sensor montado en el satélite. Sin embargo, desde fines de 1999 y comienzos del 2000, las series del nivel del mar en la costa también presentan una tendencia al aumento, por lo cual esta tendencia puede ser real. Esta tendencia no ha sido reportada previamente, y sin lugar a dudas las implicancias que pueda tener sobre el ecosistema pelágico deberá ser motivo de estudios posteriores.

La variabilidad de la clorofila, en el dominio del tiempo y la frecuencia es abordada a través del espectro de wavelet. En la figura 73 se muestra el espectro para las series costeras (a y b) y oceánicas (c y d) de la zona frente a Iquique y Antofagasta respectivamente. Este análisis no se pudo realizar con las series de Arica debido a la gran cantidad de brechas producidas por la cobertura nubosa. El espectro muestra que las series de tiempo de clorofila, tanto costeras como oceánicas, presentan un importante incremento de la varianza, en casi todas las bandas de frecuencias, desde fines de 1999 hasta el término del registro (Fig. 73). También se puede apreciar que en la zona oceánica el ciclo anual es el rasgo dominante en la variabilidad de la clorofila; en cambio en la zona costera el ciclo

anual y semianual se destacan solo en la serie de Antofagasta. En la zona costera frente a Iquique el ciclo anual está presente durante todo el registro, pero con una amplitud relativamente débil que se incrementa levemente a partir de 2002. En general la serie costera de Iquique posee una fuerte señal interanual dominada principalmente por una variabilidad cuasi-bianual, la cual es mas fuerte desde mediados de 2000 hasta el termino del registro (Fig. 73).

En la zona de estudio el ciclo anual característico de la clorofila a satelital posee importantes fluctuaciones latitudinales y longitudinales (Fig. 74). En la zona costera la clorofila a posee un máximo en verano y un mínimo en invierno; en cambio en la zona oceánica el ciclo anual es opuesto, observándose un máximo de clorofila durante el periodo de invierno, con un mínimo en verano (Fig. 74). En la zona costera el máximo de verano (febrero-marzo) se propaga desde la costa (febrero) hacia el océano (marzo), con un fuerte decaimiento en su amplitud, hasta desaparecer completamente en la zona oceánica En la zona oceánica, el máximo de clorofila a se propaga de norte a sur y de este a oeste, entre otoño e invierno; el mínimo se propaga de oeste a este durante la primavera, abarcando toda la región oceánica a comienzos del verano (Fig. 74). El análisis armónico de las series de tiempo costeras permite detectar la presencia de un máximo secundario hacia fines de invierno - comienzos de primavera (septiembre-noviembre), con un mínimo secundario a fines de primavera (Fig. 75). El análisis armónico de las series oceánicas no refleja bien la variabilidad observada en la figura 74, probablemente por estar contaminadas con la zona costera, donde el rango de variabilidad de la clorofila es mucho mayor. En general el ciclo anual de la clorofila, en la zona costera, posee un ciclo similar al del viento medido en las estaciones meteorológicas costeras (máximo viento favorable a la surgencia durante verano y mínimo en invierno); en cambio en la zona oceánica el ciclo anual se asemeja al ciclo anual de los vientos satelitales (Fig. 78).

En la región de estudio, tanto en la zona costera como oceánica, la clorofila presenta una marcada variabilidad intraestacional (30-90 días), la cual se acentúa durante el periodo de invierno/primavera en la zona de Iquique, y de primavera/verano en Antofagasta. (Fig. 73). De acuerdo a la variabilidad de los vientos, se esperaría que en asociación a ellos, la clorofila presente fluctuaciones intraestacionales de importancia durante invierno; aunque

por otro lado, debido a las fluctuaciones de la termoclina, producidas por las ondas atrapadas a la costa, fluctuaciones intraestacionales deberían ser favorecidas durante la época de primavera/verano.

#### Esfuerzo del viento a lo largo de la costa

En la figura 76 se presentan las series del esfuerzo del viento a lo largo de la costa, para la zona de Arica Iquique y Antofagasta. En la región de estudio, la zona de Arica e Iquique posee las menores magnitudes; en cambio en Antofagasta son mucho mayores. Esto es concordante con lo obtenido en trabajos previos, utilizando datos satelitales (Shaffer *et al.*, 1999; Hormazabal *et al.*, 2004), y mediciones en estaciones meteorológicas costeras (Pizarro *et al.*, 1994, Blanco *et al.*, 2001), donde los vientos más débiles se registran en la zona de Arica/Iquique e incrementan fuertemente su magnitud y energía hacia el polo.

Las fluctuaciones temporales del esfuerzo del viento, para el periodo 1991-2003, son analizadas a través del espectro de wavelets (Fig. 77). Se puede apreciar un importante incremento de la energía en la banda cuasi-bianual, la cual disminuye de norte a sur y se presenta principalmente durante el periodo 1995-2000. Estas fluctuaciones cuasi-bianuales pueden estar ligadas a fluctuaciones similares observadas en la zona ecuatorial (Clarke y Shu, 2000), y explicar en parte el decaimiento de la amplitud de la señal hacia el sur del área de estudio.

Durante el periodo de estudio, el ciclo anual aparece bien definido en la zona de Antofagasta e Iquique, con un paulatino debilitamiento de sur a norte. En la zona de Arica el ciclo anual cambia su amplitud en el tiempo, siendo mas intenso durante los periodos 1992 y 1999-2003, y menos intenso durante 1994-95 y 1998-1999 (periodos fríos, de acuerdo al índice de El Niño 3.4). La amplitud de la señal semi-anual disminuye de norte a sur (de Arica hacia Antofagasta), y se presenta en forma de pulsos con una periodicidad aproximada de tres años, partiendo en 1992. Los vientos obtenidos de estaciones meteorológicas costeras poseen un marcado ciclo anual característico, con un máximo en verano y mínimos en invierno (ver trabajo de Blanco *et al.*, 2001). En cambio los vientos satelitales, correspondientes al píxel más cercano a la costa, poseen un ciclo anual

\_\_\_\_\_89

relativamente débil y opuesto al observado en los vientos de estaciones costeras; es decir, un máximo en invierno y mínimo en verano (Fig. 78), tal como ha sido observado por Hormazabal *et. al.* (2001). Este ciclo anual inverso, entre el esfuerzo del viento de la costa (estaciones costeras) y el esfuerzo del viento un poco mas alejado de ella (viento satelital), puede producir un bombeo de Ekman negativo durante el verano, el cual profundizaría la termoclina en la zona costera. Como consecuencia de esto, en la zona costera el agua de la capa superficial del océano puede contener una considerable fracción de agua recirculada, relativamente cálida y pobre en nutrientes. Este bombeo de Ekman negativo, "de gran escala", podría estar restringiendo el efecto de la surgencia costera a una banda angosta, apegada a la costa, lo cual podría explicar en parte porque en esta región, a diferencia de otras regiones de surgencia, las mayores concentraciones de clorofila se restringen a una angosta banda costera.

En la banda intraestacional (30-90 días), la energía del esfuerzo del viento se incrementa principalmente durante la época invernal, donde los periodos cercanos a 40 y 60 días son los dominantes (Fig. 77). Estas oscilaciones pueden estar vinculadas a oscilaciones similares que se presentan en el Pacifico ecuatorial central, las cuales describen un patrón de teleconexión atmosférico que ha sido discutido por Hormazabal *et al.* (2002). En ese trabajo se muestra que durante el periodo de invierno, dentro de la banda intraestacional (28-90 días), las máximas correlaciones poseen rezagos típicos entre cero y una semana, donde las fluctuaciones hacia el polo (hacia el ecuador) de las anomalías del viento intraestacional frente a Chile central, ocurren después que se presentan las perturbaciones desde el oeste (desde el este) en las anomalías del viento intraestacional en el Pacifico ecuatorial central (Fig. 79).

#### Cruceros oceanográficos

En el presente proyecto se analizaron y procesaron más de 9.242 estaciones realizadas en la zona norte de Chile, entre los 18°-24°S y 70°-74°W, que conforman una serie histórica de más de 35 años de datos oceanográficos. El análisis detallado de la data de los cruceros se entrega en el Anexo 6. En un primer análisis se identificaron las principales masas de agua presentes en la zona de estudio (Agua Subtropical, Agua Ecuatorial Subsuperficial, Agua

Intermedia Antártica) y se caracterizó la estructura superficial y vertical de la columna de agua (Anexo 6).

Por otro lado, con el objeto de establecer una relación espacio-temporal entre ambienterecurso, se calculó la profundidad de la capa de mezcla (PCM) presentando su variabilidad en invierno (julio-septiembre), otoño (abril-junio), primavera (octubre-diciembre) y verano (enero-marzo), para las tres regiones seleccionadas (Arica, Iquique y Antofagasta). Este análisis también es detallado en el ANEXO 6. Al respecto se observa una alta variabilidad temporal estacional de la PCM en las tres regiones, debido principalmente a la presencia de una termoclina estacional, presentándose una PCM somera (5-8 m en la zona costera y 12-18 m en el sector oceánico) en el período de verano, profundizándose para el período de invierno, por la desaparición de la termoclina estacional.

#### Estructuras de mesoescala

El campo superficial de corrientes geostróficas, obtenidas a través de datos de altimetría satelital, no permiten determinar las corrientes en la zona comprendida entre la costa y los primeros 100 km. Esto se debe principalmente al efecto de la costa y la topografía del fondo sobre las observaciones satelitales de la altura del nivel del mar. Esto constituye una importante limitante en el presente estudio, debido a que los principales recursos pelágicos de la región (sardina y anchoveta) se encuentran dentro de la banda no resuelta por el satélite. A pesar de esta limitante, el campo superficial de corrientes geostróficas derivadas de los datos de altimetría satelital (en adelante mencionados como corrientes geostróficas), permite interpretar de mejor forma muchos aspectos de la variabilidad espacial de la zona oceánica en la región de estudio y nos da algunas luces de las posibles conexiones entre la zona costera y oceánica. En la figura 80 se muestra un caso típico de las características del campo superficial de corrientes geostróficas. Aquí se puede apreciar que la zona oceánica de la región de estudio esta poblada por remolinos de mesoescala, con diámetros del orden de 180 km y corrientes con magnitudes del orden de 20 cm/s. Estos remolinos se desplazan principalmente hacia el oeste, permaneciendo activos durante varios meses. Estas características de los remolinos de mesoescala son típicas de los remolinos observados en la zona de transición costera de los distintos sistemas de corrientes de borde oriental (Chereskin *et al.*, 2000; Hormazabal *et al.*, 2004).

En la figura 80 se presentan algunos aspectos característicos de la región de estudio, cuya interpretación dinámica puede ser facilitada mediante la utilización del campo de corrientes geostroficas. En esta figura se puede apreciar que la distribución superficial de la clorofila satelital es similar a la obtenida a través de mediciones *in situ*, realizada durante un crucero de investigación de la misma época, ejecutado como parte de un proyecto FIP (Fig. 80 a y b). Ambas distribuciones de clorofila (satelital e *in situ*) poseen altas concentraciones en la zona costera, con una mayor extensión hacia fuera de la costa, en la zona de Arica, Iquique y norte de Antofagasta. También se aprecia una intrusión, desde la costa hacia la zona oceánica, de aguas ricas en clorofila, alrededor de los 22°S, y una baja concentración de clorofila alrededor de los 20° y 24°S. La intrusión de aguas costeras hacia la zona oceánica también es evidenciada por la distribución de temperatura superficial del mar, donde aguas frías, con temperaturas cercanas a los 18°C, se extienden desde las cercanías de la costa hacia la zona oceánica (Fig. 80c).

En la figura 80a, las corrientes geostroficas están sobrepuestas sobre la clorofila satelital. Aquí se puede apreciar una buena correspondencia entre el campo superficial de corrientes y la distribución de clorofila. Siguiendo el patrón de las corrientes superficiales, aguas ricas en clorofila se extienden hacia la zona oceánica, alrededor de los 22°S, y aguas pobres en clorofila se extienden hacia la costa, alrededor de los 20-21° S y 23-24°S. De esta forma, el flujo hacia el oeste que se presenta entre dos remolinos de mesoescala, con giros opuestos (23°S-72°W y 21.8°S-73°W), permite extender la influencia de la surgencia costera hacia la zona oceánica, lo cual puede tener fuertes implicancias en la sobreviviencia de los huevos y larvas de las especies pelágicas de la región. Por otra parte, los remolinos de mesoescala, por sus dimensiones espaciales y permanencia en el tiempo, pueden tener un efecto importante sobre el ecosistema de la región. Lamentablemente, la mayoría de los estudios de campo realizados en esta región, no se extienden hasta la zona de mayor influencia de estas estructuras, siendo muy dificil evaluar su efecto en el ecosistema con las actuales mediciones de campo. Estimaciones del campo superficial de la anomalía geopotencial, referida a 500 db (Fig. 80d), pueden constituir un adecuado complemento al estudio del campo de corrientes superficiales, de tal forma de mejorar la interpretación dinámica de la zona de estudio. En la figura 80d, se puede apreciar que las estimaciones del campo de corrientes superficial (satelital e in situ) se pueden complementar relativamente bien, considerando las limitantes de la cobertura espacial de las mediciones de campo, las cuales pueden generar algunas diferencias como las que se aprecian en la región sur del área de estudio.

## 4.1.2.3. Relaciones entre variables bio-pesqueras y ambientales

Para evaluar los efectos del ambiente sobre los recursos, se realiza un análisis que integra la data espacio-temporal bio-pesquera y ambiental. Primero se generan bases de datos espacio-temporales, que integran el ambiente y los recursos; posteriormente se realizaron los análisis exploratorios.

Una primera exploración se realiza con los índices de abundancia de anchoveta, sardina y jurel, y las variables ambientales, como promedios mensuales de cuadrículas de 10\*10 mn.

Así, se estudia la variabilidad estacional de la CPUE de dichos recursos, asociada a factores ambientales, analizando los ciclos anuales característicos de cada variable. Con el objeto de analizar los efectos de los eventos El Niño en la estacionalidad, se generan dos ciclos anuales por variable: uno considerando los años El Niño (1987, 1992 y 1997-98) y otro para los años Normales o La Niña.

Por otro lado se estudian, bajo un enfoque espacial, los efectos de los factores ambientales en la distribución de los recursos mediante un análisis factorial.

# Base de datos espacio-temporal ambiente – recursos

Para integrar la información espacio-temporal pesquera y ambiental en la escala mensual, se aplica el SIG IDRISI para extraer los valores bio-pesqueros y ambientales mediante superposición gráfica entre imágenes mensuales de índices abundancia de los recursos y variables oceanográficas disponibles, considerando una escala local correspondiente a

cuadrículas 10\*10 mn (Fig. 81). Las bases de datos la distancia a la costa (DC) y la subzona (definidas en el proyecto FIP96-03), para cada cuadrícula con información bio-pesquera. De este modo se configuraron tres bases de datos espacio-temporales ambiente-recurso: 1) CPUE – ambiente, 2) Sa – ambiente y 3) huevos/larvas – ambiente.

La base de datos espacio-temporal CPUE-ambiente configurada contiene los siguientes campos: 1) identificador de la cuadrícula de 10\*10 mn (cuad); 2) latitud central de la cuadrícula (lat); 3) longitud central de la cuadrícula (long); 4) captura por unidad de esfuerzo (CPUE); 5) especie capturada (sp); 6) año; 7) mes; 8) estación del año (est); 9) subzona; 10) temperatura superficial del mar promedio en la cuadrícula (TSM); 11) gradiente térmico por cuadrícula (GRT); 12) anomalía de la TSM promedio por cuadrícula (ATSM); 13) concentración de la clorofila promedio por cuadrícula (Cloa);14) distancia a la costa por cuadrícula (DC). Esta base datos comprende el período 1987-2002 y se compone de 6.977 registros de anchoveta, 4.882 de sardina y 4.646 de jurel (Tabla 7).

La base de datos espacio-temporal Sa-ambiente se compone de los siguientes campos: 1) cuad; 2) lat; 3) long; 4) energía acústica (Sa); 5) sp; 6) año; 7) mes; 8) est; 9) subzona; 10) tsm; 11) grt; 12) atsm; 13) cloa;14) dc. La base de datos comprende el período 1994-2001 y se compone de 476 registros (Tabla 8).

Por su parte, la base datos espacio-temporal de abundancia de huevos/larvas de anchoveta y ambiente contiene los siguientes campos: 1) cuad; 2) lat; 3) long; 4) número de huevos de anchoveta (ha); 5) número de larvas de anchoveta (la); 6) año; 7) mes; 8) est; 9) subzona; 10) tsm; 11) grt; 12) atsm; 13) cloa;14) dc. La base datos huevos/larvas – ambiente comprende el período 1996-2002 y se compone de 476 registros (Tabla 9).

		Año																
sp	Datos	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Total
а	Cpue	75	361	461	425	207	310	448	740	581	617	488	143	457	552	509	603	6977
	tsm	75	361	461	425	207	310	448	740	580	615	487	143	457	552	509	595	6965
	gr	75	355	461	418	207	310	441	740	530	525	384	140	457	524	501	603	6671
	atsm	75	361	461	425	207	310	448	740	573	579	488	143	457	552	509	555	6883
	dc	75	361	461	425	207	310	448	740	581	579	488	143	457	552	509	555	6891
	cloa											128	143	457	552	509	603	2392
j	Cpue	379	362	329	378	300	325	324	310	299	416	166	46	171	201	317	323	4646
	tsm	376	347	327	367	298	323	319	298	277	384	152	37	166	191	310	300	4472
	gr	373	350	329	369	296	323	320	300	266	356	126	37	168	189	307	313	4422
	atsm	373	351	329	370	298	323	321	300	278	384	156	37	169	194	312	313	4508
	dc	373	351	329	370	298	323	321	300	279	384	156	37	169	194	312	313	4509
	cloa											58	37	168	194	312	313	1082
s	Cpue	814	826	756	566	331	532	258	182	103	78	17	11	266	72	52	18	4882
	tsm	785	796	742	543	328	525	247	173	82	65	15	6	248	66	41	16	4678
	gr	785	799	747	546	328	525	247	175	81	58	10	10	252	64	47	17	4691
	atsm	785	802	747	548	328	525	248	175	84	63	15	10	252	69	47	17	4715
	dc	785	802	747	548	328	525	248	175	84	63	15	10	252	69	47	17	4715
	cloa											5	10	252	69	47	17	400

Tabla 7. Numero de registros por año de la base de datos CPUE-ambiente por recurso.

Tabla 8. Numero de registros por año de la base datos Sa-ambiente.

		Año							
sp	Datos	1994	1995	1996	1997	1998	2000	2001	Total
а	Sa	112	44	59	26	16	143	76	476
	tsm	112	44	59	26	16	143	76	476
	gr	112	44	50	20	16	143	76	461
	atsm	112	44	59	26	16	143	76	476
	dc	112	44	59	26	16	143	76	476
	cloa				9	16	143	76	244
j	Sa	35	32		3		36	20	126
	tsm	35	32		3		36	20	126
	gr	35	28		3		36	20	122
	atsm	35	31		3		36	20	125
	dc	35	32		3		36	20	126
	cloa				3		36	20	59
S	Sa	55	10	2					67
	tsm	53	10	2					65
	gr	55	10	2					67
	atsm	55	10	2					67
	dc	55	10	2					67
	cloa								

Tabla 9. Numero de registros por año de la base datos ambiente – Huevos y larvas de anchoveta.

	año							
Datos	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Total general
ha	70	83	49	135	133	34	102	606
la	70	83	49	135	133	34	102	606
tsm	70	83	48	135	133	34	102	605
gr	70	83	48	135	133	34	102	605
CLOA		18	48	135	133	34	101	469
atsm	70	83	48	133	133	34	101	602
dist	70	83	48	135	133	34	102	605

Bajo la hipótesis de la alternancia decadal entre la abundancia de anchoveta y sardina (Bakun y Cury, 1999; Yáñez *et al.*, 2001; Chávez *et al*, 2003; Alheit y Ñiquén, 2004) en el Pacífico Sudeste, se debe considerar que el período estudiado (1987-2002) corresponde principalmente a un régimen frío de largo plazo (La Vieja), favorable a la anchoveta que comenzó a inicios de los 90's. En efecto, los resultados obtenidos en el presente proyecto en el análisis temporal de relaciones ambiente – recurso, confirman y complementan esta hipótesis al concluir que altas abundancias de anchoveta se presentan en los períodos fríos de largo plazo caracterizados por una termoclina somera, baja temperatura y alta productividad (Fig. 31).

En las series de tiempo se observa que durante el período estudiado los eventos fríos (La Vieja / La Niña) han afectado positivamente la pesquería de anchoveta, evidenciándose que las capturas de este recurso se han realizado en un ambiente caracterizado por: persistencia de ATSM negativas; tendencia en aumento de los GRT debido a mayores surgencias costeras; disminución de la DC de las capturas, desplazándose hacia aguas frías surgentes; tendencia al aumento de la productividad fitoplanctónica entre 1997 y 2002; y presencia de aguas con menor PCM (Fig. 82). Estas condiciones de termoclina somera, fuertes surgencias y alta productividad, permiten el desarrollo de un hábitat apto para la anchoveta (en términos de temperatura y tamaño de zooplancton), favoreciendo el éxito de los desoves y el reclutamiento (Chávez et al., 2003). Al respecto se evidencia en las series de huevosambiente disponibles para anchoveta para el período 1996-2002, la persistencia de ATSM negativas, aumento de GRT y clorofila después del evento El Niño 1997-98, ambiente favorable para anchoveta que produjo un notable aumento en el número de huevos y larvas desde mediados de 1999 (Fig. 83). Los antecedentes sobre la distribución de huevos de anchoveta advierten que esta se sitúa en zonas de surgencias. Claramunt et al. (1997) indican una relación negativa entre la presencia de huevos y la temperatura superficial (TSM), señalando que ésta y la clorofila serían parámetros relevantes en la distribución. Oliva et al. (2003) indican un rango de TSM en el periodo 1992-2002 entre 12º y 21ºC. El límite superior de este intervalo ocurre en 1997, asociado al evento El Niño 1997-98. Por otra parte, las mayores densidades de huevos se presentan entre 15º y 17ºC (Oliva et al.,

2002, 2003). Otro parámetro importante en la distribución de huevos es la salinidad. La mayor densidad de huevos estaría en el rango de 34,7-34,9 psu. Oliva *et al.* (2002) señalan que la zona de desove se asocia a gradientes térmicos y salinos. Los valores descritos para el gradiente térmico varían entre 0,9 y 1,6°C/2mn. Sobre este valor las densidades decaerían notablemente (Oliva *et al.*, 2002, 2003). Respectos de los gradientes salinos, Oliva *et al.* (2001) indican que en gradientes superiores a 0,09 psu/2mn la densidad de huevos disminuye.

Un monitoreo de las áreas de mayor producción primaria puede obtenerse a partir de imágenes satelitales de clorofila a (cloa a) satelital. En ANEXO 7 se presentan imágenes diarias de clorofila durante los periodos de cruceros MPH entre 1999 y 2002. Un examen visual de las imágenes de cloa-a y la distribución de huevos (Fig. 51 y 52) indicaría una asociación positiva. Las imágenes de cloa presentan una importante variabilidad interanual en la extensión espacial y temporal de las zonas más productivas, que podría afectar la ocurrencia, extensión y éxito del desove. Algunas zonas como el Loa, mantienen una alta producción primaria en todo este periodo. Coincidentemente, numerosos autores señalan esta área como una de las principales zona de desove (Cañón, 1987, Serra et al., 1979, Palma et al., 1992, Claramunt et al., 1996, 1997, Oliva et al., 2000, 2001, 2003). Cabe señalar que otros factores además de las condiciones oceanográficas influven en la extensión de la zona de desove, tales como la condición de la población desovante y la presión pesquera ejercida por la flota previo al periodo de desove. Por ejemplo Claramunt et al. (1997), sugiere una disminución del proceso reproductivo en la zona de Arica en 1996, debido a la intervención de la flota cerquera sobre el stock desovante. También sería importante explorar la relación entre la duración y extensión de los focos de alta producción primaria y el éxito de desove.

En figura 84 se observa que los reclutamientos entre 1994 y 2001 se han mantenido con valores similares de Sa, excepto durante el Niño 1997-98 donde se observaron bajos valores de Sa. Los valores de Sa estuvieron asociados a ATSM negativas, concentraciones de clorofila mayores de 2 mg/m<sup>3</sup> y GRT mayores de 1 °C/10mn. Podemos afirmar entonces que en la zona norte de Chile, la producción está asociada a la surgencia costera inducida por el viento, la cual es fuerte durante condiciones frías (Chávez *et al.*, 2003; Alheit y

Bakun, 2004; Bakun, 2004). La productividad es máxima cerca de la costa y disminuye mar adentro. Cuando la surgencia costera es fuerte, ésta permite una mayor cobertura de las aguas frías costeras, lo que favorece y genera altas biomasas de anchoveta.

No obstante las condiciones ambientales favorables de largo plazo, la pesquería de anchoveta cae drásticamente durante eventos cálidos como El Niño 1997-98. En efecto, durante este evento bajaron drásticamente las capturas y la DC de éstas, caracterizándose el ambiente por: ATSM positivas; bajos niveles de concentración de clorofila; profundización de la termoclina reflejado en un aumento de la PCM (Fig. 82). Además, El Niño 1997-98 produjo una masiva muerte en la población de anchovetas en sus diferentes clases de edad, evidenciándose esto en la drástica disminución de los huevos y larvas (Fig. 83), además de la baja en la biomasa de los reclutas (Fig. 84). Sin embargo, la población se recuperó rápidamente después de 1999, donde se re-establecieron condiciones ambientales favorables para la anchoveta. Esta recuperación y no muerte total de la población, pudo deberse a que parte de la población sobrevivió encontrando un "loophole" (Bakun y Broad, 2003), dentro de las condiciones desfavorables imperantes durante El Niño 1997-98. Durante los años cálidos el área costera productiva es reducida abruptamente, pero las aguas surgentes ricas en nutrientes pueden igual ser observadas (Thomas et al. 1994; Chávez et al. 2002) aunque limitadas a algunas áreas costeras. Estos "loopholes" favorables son refugio para la sobrevivencia de parte de la población de anchoveta durante estos eventos.

Al mismo tiempo, el aumento de surgencias durante regímenes La Vieja / La Niña (Chávez *et al.*, 2003; Alheit y Bakun, 2004; Bakun, 2004) genera un alejamiento de la zona frontal (área convergencia entre las aguas superficial subtropical y aguas frías costeras surgentes) de la plataforma continental, prevaleciendo una condición desfavorable para la sardina, ya que el éxito del desove y reclutamiento es afectado por transporte mar adentro y la dispersión consecuente (Fig. 85). En efecto, las series de la pesquería de sardina – ambiente, evidencian que la abrupta caída en los desembarques a comienzos de los 90's y que dura hasta final del período de estudio, se asocia a la presencia de una condición ambiental fría de largo plazo caracterizada por: ATSM negativas (excepto durante el evento El Niño 1997-98); tendencia al aumento de los GRT debido al aumento de surgencias

costeras; aumento de la productividad (Fig. 85). Por el contrario, un hábitat favorable para la sardina se produce durante los eventos cálidos El Viejo (escala decadal) y El Niño (escala interanual), caracterizados por una profundización de la termoclina, reducción de las surgencias y productividad más baja. Los eventos El Viejo y El Niño producen una fuerte reducción del ambiente apto para anchoveta y aumentan el hábitat favorable para la sardina acercándose hacia la plataforma continental (Yánez *et al.*, 2001; Chávez *et al.*, 2003; Bakun y Broad, 2003; Alheit & Ñiquen, 2004). La sardina es favorecida por los períodos en que se debilitan los vientos alisios (Clarke and Lebedev, 1999) y se reducen las surgencias costeras (Chávez *et al.*, 2003; Alheit y Bakun, 2004).

En la zona norte de Chile y en el sistema de corrientes Chile-Perú la población de sardina ha ido disminuyendo desde mediados de los 80's (Yáñez *et al.* 1998; Lluch-Belda *et al.*, 1992; Csirke *et al.*, 1996; Alheit & Ñiquen, 2004). La primera llegada al colapso de la población de sardina se nota a fines de 1990. Sin embargo, esta tendencia se revierte levemente el evento cálido El Niño 1991-1992 (Fig. 85). Después de 1994 la pesquería colapsa totalmente y la población de sardina es mínima. Este aumento de la abundancia durante el evento cálido 1991-92 se explicaría porque la sardina se acercaría más hacia la costa, siguiendo el flujo de aguas oceánicas y así estaría más disponible para la pesca. Posteriormente el cambio a una condición fría durante 1994, sumado al régimen frío de largo plazo imperante en el ecosistema, producen el colapso del stock de sardina (Fig. 85 y 86), el cual no se recupera hasta el final del período manteniéndose a niveles mínimos. De este modo, la reducida población de sardina existente antes del evento cálido de 1997-98, no permitió sustentar un aumento de las capturas debido a una mayor disponibilidad producida por el acercamiento hacia la costa del recurso.

Un caso aparte sucede con la pesquería de jurel en la zona norte de Chile, cuya población se distribuye en un área mucho más amplia que la anchoveta y la sardina, encontrándose desde el Ecuador hasta la región austral de Chile y desde la costa de Sudamérica hasta Nueva Zelandia y Tasmania (Parrish, 1989; Serra, 1991; Dioses, 1995; Grechina, 1998). Por eso, los desembarques en la zona norte sólo reflejan una visión parcial de la población de jurel. Las capturas que no sobrepasan las 100.000 toneladas mensuales alcanzando un promedio de 19.410 toneladas mensuales para el período 1987-2002 (Fig. 87). Las fluctuaciones en

abundancia y distribución de esta especie se asociarían a una serie de factores abióticos y bióticos (Dioses, 1995; Quiñones *et al.*, 1997; Grechina, 1998; Arcos *et al.*, 2001). El jurel puede habitar en un amplio rango de condiciones oceanográficas y consigue alejarse de inclemencias climáticas moviéndose a zonas favorables.

#### Variabilidad estacional

Al analizar la variabilidad estacional de la CPUE de anchoveta y de los factores ambientales asociados (Fig. 88), podemos indicar en primer término que los mayores rendimientos de pesca se obtienen en verano y otoño. La curva de estacionalidad de la TSM en la cual se captura anchoveta permite detectar que los máximos se registran en verano y los mínimos en invierno - comienzos de primavera. La curva de la estacionalidad en años El Niño tiene una forma similar a la gráfica sin El Niño. Sin embargo, durante los años El Niño los valores son entre 1 y 3°C superiores a los registrados en años normales Esto debido a la presencia de aguas cálidas de origen oceánico. La variabilidad estacional de los valores del GRT donde es capturada la anchoveta no difiere mucho (forma y magnitud) entre años El Niño y normales. Sin embargo, durante El Niño los valores de GRT son mayores en invierno, debido al acercamiento de aguas oceánicas hacia la zona costera. La estacionalidad de los GRT presentan máximos en verano – otoño y mínimos en invierno. La estacionalidad de la DC indica que durante verano-otoño se captura a la mínima DC (17-25 mn), mientras que en invierno-primavera se captura a una DC entre 30-35 mn. Durante invierno – primavera de los años El Niño la anchoveta se captura a una DC entre 5 y 10 mn menor a la efectuada durante los años normales. Esto debido al acercamiento hacia la zona costera de las aguas oceánicas, lo cual genera un desplazamiento del recurso hacia el litoral. La variabilidad estacional de los valores de clorofila (asociados a la capturas) durante años El Niño y normal presenta notables diferencias principalmente durante el verano y otoño. Durante el verano y otoño de años Normales/La Niña las capturas se registran en valores mayores de clorofila que van entre 2 mg/m<sup>3</sup> (otoño) y 4,5 mg/m<sup>3</sup> (verano); mientras que durante El Niño la pesca se realiza en menores concentraciones que varían entre  $0.5 \text{ y1 mg/m}^3$ .

Al analizar en la escala estacional el ciclo anual de la CPUE de sardina y de los factores ambientales asociados (Fig. 88), podemos indicar que los mayores rendimientos de pesca se obtienen en los años El Niño prácticamente duplicando los rendimientos al comaprarlo con años normales y para verano-otoño. La estacionalidad de la TSM en la cual se captura sardina es muy similar a la de anchoveta, alcanzando los máximos valores en verano y los mínimos en invierno – comienzos de primavera. Durante los años El Niño la sardina se pesca en TSM entre 1 y 3°C superiores a los registrados en años normales. Esto debido a la presencia de aguas cálidas de origen oceánico. La variabilidad estacional de los valores del GRT donde es capturada la sardina no difiere mucho entre años El Niño y normales. Sin embargo, los valores del GRT son menores a los cuales se captura la anchoveta, debido a que la sardina se asocia más a la zona frontal oceánica donde los GRT son menores a los de las zona surgente asociada a la anchoveta. La estacionalidad de la DC indica que durante verano-otoño se captura a la mínima DC (25-35 mn), mientras que en invierno-primavera se captura a la máxima DC que varía entre 30-55 mn. Durante invierno - primavera de los años El Niño, la sardina se captura a una DC entre 5 y 20 mn menor a la efectuada durante los años normales. La variabilidad estacional de los valores de Clorofila asociados a la capturas durante años El Niño y normales presenta diferencias principalmente durante el verano

#### Variabilidad espacial: análisis factorial

Se examina en primer lugar la matriz de correlación lineal entre las variables oceanográficas y de distribución espacial. El análisis arrojó una alta correlación entre la LONG y la DC (-0.96), por lo tanto la primera variable se deja fuera del análisis, ya que la DC toma en cuenta la forma de la costa.

Las variables nominales ilustrativas (en color rojo) muestra que la anchoveta se posiciona en un escenario contrario al de la sardina y el jurel (Fig. 89). La primera se asocia a mayores valores de CLOA y a incrementos en la diferencia térmica (GR). La sardina muestra un comportamiento más bien opuesto al de la anchoveta, asociándose a valores más bajos de CLOA y GR, lo que evidencia una diferencia en la distribución espacial de dichos recursos. Yáñez *et al.* (1995) indica que la anchoveta se distribuye preferentemente

dentro de las primeras 60 mn, en tanto la sardina puede alcanzar los 73°W. Estas especies no comparten el mismo nicho ecológico en términos de masas de agua (Bertrand *et al.*, 2004). El jurel se observa intermedio y menos relacionado a las variables oceanográficas (< 0.06 en ambos ejes). Las variables en azul representan la distribución en el espacio factorial de las estaciones del año, donde se observa que la anchoveta se asocia al otoño. Esto se puede relacionar al aumento en el desembarque en junio de 1997, periodo de transición donde las condiciones ambientales cambiaron drásticamente después de abril de 1997 (Carr *et al.*, 2002). La sardina y el jurel se asocian a la primavera. Otoño y primavera tienen características de sistemas altamente productivos (Braun *et al.*, 2000) (Fig. 89).

Se separó el análisis factorial del recurso anchoveta en un período cálido (1997-98) y un periodo frío (1999-02). En ambos periodos el aumento de la CPUE se relaciona con zonas más productivas. Sin embargo, estos se diferencian en que durante el periodo cálido (97-98) existe una preferencia por gradientes de TSM altos; la clase con el mayor rendimiento no es la costera sino la que se relaciona con un GR promedio más alto . En el segundo periodo el peso de la variable GR es menor, y la TSM y la ATSM mayores. La clase de mayor CPUE sigue siendo la que en promedio se relaciona con un valor alto de GR (Tabla 10, ANEXO 8).

Se cartografía la clase 1 (>CPUE) del análisis jerárquico del periodo 1997-98. En esta se observa que existen dos focos de concentración de pesca, el primero entre Arica–Pisagua en las primeras 20 mn de las costa y el segundo entre Iquique-Tocopilla preferentemente en las primeras 10 mn. Tal como lo mencionara Yáñez *et al.* (1995), estas zonas se relacionan con focos permanentes de surgencia. La cartografía de las cuadriculas más visitadas del periodo indican la presencia de tres focos de interés para las embarcaciones: a) Arica –Pisagua, b) 20,5°S-Tocopilla, y c) alrededores de Mejillones (en las primeras 20 mn) (Fig. 90).

La distribución de la CPUE se concentró en dos focos específicos frente a la costa norte del país, cuyos rangos de TSM van de 18,89°C a 22,85°C, con una media de 20,87°C. los valores de CLOA se mueven desde los 0,71 a los 3,35 mg/m<sup>3</sup> con una media de 2,03 mg/m<sup>3</sup> (Tabla 11).

El resultados del análisis jerárquico del periodo 1999-02 arroja que: a) la CLOA es mayor en la costa y al sur; b) la TSM (0,27) y la ATSM (-0,36) muestran una mayor influencia en el modelo, su valor es mayor en la zona oceánica y al norte; c) la relación es positiva entre CLOA y CPUE (Tabla 11).

		1997-98		1999-02				
	com 1	Com 2	com 3	com 1	com 2	com 3		
TSM	-0,03	-0,06	0,01	-0,27	0,11	0,02		
GR	0,44	-0,02	-0,34	0,34	0,00	-0,22		
ATSM	0,09	0,01	0,01	-0,36	0,14	0,06		
CLOA	0,42	0,13	-0,22	0,34	0,13	-0,29		
CPUE	0,46	0,87	0,17	0,42	0,86	0,28		
LAT	-0,73	0,41	-0,55	-0,69	0,49	-0,54		
DC	-0,76	0,12	0,61	-0,78	0,03	0,62		

Tabla 10. Correlación de las variables activas e ilustrativas con los 4 primeros ejes principales

	I	Periodo 1997-9	8	Periodo 1999-2002					
variables	clase1	clase2	clase3	clase1	clase2	clase3			
LAT	-19.87	-21.41	-19.10	-20.73	-21.53	-19.40			
LONG	-70.38	-70.32	-70.71	-70.41	-70.40	-70.78			
CPUE	30	12	11	48	16	16			
TSM	20.88	21.12	21.04	18.44	18.05	19.17			
sA	1764	1883	2353	1971	1364	1560			
GR	1.85	1.78	1.02	1.55	1.45	1.08			
ATSM	1.73	1.79	1.52	-0.95	-1.03	-0.51			
DC	14.19	11.93	30.45	16.88	17.22	36.57			
CLOA	2.04	1.57	0.84	3.97	3.08	1.73			

Tabla 11. Promedio de las variables oceanográficas y pesqueras por clase.

La cartografía de la CPUE de la clase 1muestra 4 zonas de mayor rendimiento: a) entre Arica y Pisagua, dentro de las primeras 60 mn de la costa, con preferencia en las primeras 40 mn; b) frente a Iquique en las primeras 20mn; c) alrededores del Loa hasta las 40mn, con valores mayores en las primeras 20mn; y d) entre Mejillones y Antofagasta en las primeras 20 mn. Estas zonas son cercanas a la costa, pero se extienden hacia las 40 e incluso las 60 mn a diferencia del periodo anterior que no supera las 20 mn (Fig 91).

Esto se puede explicar por el periodo frío que provoca que la anchoveta se disperse frente a la costa, aunque si bien toma una distribución más amplia sigue estando asociada a focos de surgencia. Si observamos la cartografía de las cuadrículas más visitadas de periodo, vemos que los focos encontrados en cada una de las imágenes se diferencian en la zona frente a Iquique. En este periodo el recurso se encuentra en una posición más costera en un rango de TSM de 16,76-20,10° C, con una media de 18,43°C. El rango de CLOA es de 0,78-7,16 mg/m<sup>3</sup>, con una media dde 3,97 mg/m<sup>3</sup>.

El ACP de la matriz de datos de huevos de anchoveta arrojó que las variables con una mayor correlación son TSM(-0,91), GR (-0,65) y CLOA (-0,93).

El espacio factorial muestra una relación positiva entre la presencia de huevos (HA) y la CLOA, y negativa entre DC y HA, evidenciando una distribución costera y cercana a los focos de surgencia. Además se insinúa una relación negativa con la TSM, lo que coincide con Claramunt *et al* (1997). Se observa una relación negativa entre HA y LAT; es decir, que hay una mayor concentración al norte de la zona de estudio. A su vez, la relación entre LAT y DC indica que además la distribución en el norte es más oceánica (Fig. 92).

El análisis jerárquico muestra cuatro clases (Fig. 92). Las clases 1 y 4 son bajas en el número de huevos (Fig. 93), están formadas por datos del periodo 1996-98; ambas tienen una distribución costera y latitudinal similar, con un rango promedio de CLOA cercano (clase  $1 = 1,08 \text{ mg/m}^3$ ; clase  $4 = 1,13 \text{ mg/m}^3$ ). Sin embargo, la variación en la presencia de huevos es alta. Los parámetros oceanográficos que varian notablemente son la TSM (clase  $1 = 16,44^{\circ}$ C; clase  $4 = 17,36^{\circ}$ C), la ATSM (clase 1 = -0,63; clase 4 = 0,40) y el GR (clase 1 = 0,76; clase 4 = 1,28) (Fig. 93). La TSM promedio es alta en la clase 4; esto demuestra la relación negativa entre la TSM y presencia de huevos (Claramunt *et al.*, 1997).

Las clases 2 y 3 registran un mayor número de huevos, compuestas por datos del periodo 2000-02. Los antecedentes sobre la distribución de huevos de anchoveta advierten que esta se sitúa en zonas de surgencia (Claramunt *et al.*, 1997). El primer grupo de datos (clase 2) se encuentra distribuido principalmente entre Iquique y el Loa, con un segundo foco menos definido entre Arica y Pisagua. Se registra además el máximo de huevos de las cuatro

clases (N = 106), el mayor de CLOA (3,19 mg/m<sup>3</sup>) y el valor promedio de TSM más bajo (16,11 °C) (Fig. 94). El periodo 1999-02 fluctuó entre una condición fría moderada y una neutra; es decir, estaría caracterizada por condiciones favorables para procesos de surgencia y el incremento de la productividad primaria (Carr *et al.*, 2002). El Loa se caracteriza por ser una de las áreas principales de desove (Cañón *et al.*, 1987; Serra *et al.*, 1979; Palma *et al.*, 1992; Claramunt *et al.*, 1996, 1997; Oliva *et al.*, 2000, 2001, 2003). Esto explica la distribución de la clase 2 cuyo foco de desove se encuentra en la desembocadura del Loa hacia el norte, con valores altos de HA promedio (Fig. 94).

Es difícil hacer un análisis detallado de la sardina, ya que los datos para este recurso son escasos. En 1994 la población de sardina mostró un descenso drástico que no se ha recuperado (Fig. 10), esto se puede explicar por la presencia de un periodo frío de largo plazo, desfavorable para la sardina. Durante un periodo frío de largo plazo la productividad es más alta (Chavez *et al.*, 2003). Esto es favorable a la anchoveta (en términos de la temperatura, el tamaño del plancton, etc.), favoreciendo el éxito del reclutamiento y menos favorable a la sardina afectando el éxito del desove y el reclutamiento.

#### Efecto de las ondas planetarias sobre la distribución vertical de anchoveta

Para evaluar el efecto de las ondas planetarias (ondas de Rossby y ondas atrapadas a la costa), sobre la distribución vertical de anchoveta, se analizan registros ambientales que muestran la presencia de estas ondas. Luego se comparan estos registros con modelos simples de generación de ondas y posteriormente se analiza el efecto de estas ondas sobre la distribución vertical del recurso en cuestión. Se combina información de nivel del mar, temperatura del mar y corrientes provenientes de análisis publicados en diversos trabajos (Shaffer *et al.*, 1997; Hormazábal *et al.*, 2002; Hormazábal, 2003; Thomas *et al.*, 2001), además de información de cruceros hidroacústicos realizados desde 1996 (Castillo *et al.*, 2002).

En la figura 95a se presentan dos índices del El Niño, el espectro de potencias de wavelets correspondiente a la componente a lo largo de la costa de la corriente hacia el polo, medida frente a la zona de Coquimbo (30°S), y la diferencia de fase obtenida del espectro cruzado

de wavelets entre la componente paralela a la costa del flujo hacia el polo y el nivel del mar en Caldera. Esta información se utiliza en forma complementaria al análisis de la zona de estudio (I y II Regiones), para demostrar que las ondas planetarias que se observan a lo largo de la costa de Chile corresponden en algunos casos a ondas de Rossby y en otros casos a ondas atrapada a la costa.

La corriente subsuperficial de Perú-Chile presenta fuertes oscilaciones intraestacionales (30-90 días) durante la época de primavera-verano y muy débiles o prácticamente imperceptibles durante la época de invierno (Fig. 95b). Estas perturbaciones son aun mas intensas durante los periodos de El Niño (Fig. 95b). Durante el periodo de mediciones, el ciclo estacional de esta corriente posee una variación importante con periodos de predominio de la señal semi-anual (180 días) y otro con predominio de la señal anual (365 días). Clasificando el periodo de mediciones en periodos cálidos y periodos fríos, de acuerdo a la anomalía de la temperatura del mar en la región Niño 3.4, se encuentra que en esta banda de frecuencias, durante los periodos cálidos predomina la señal semianual y durante los periodos fríos predomina la señal anual (Fig. 95). Esto sugiere que la variabilidad del flujo hacia el polo, el cual es responsable del transporte de aguas ricas en nutrientes hacia el sur, esta fuertemente ligada a las fluctuaciones del océano Pacifico Ecuatorial.

Para entender la dinámica presente en las fluctuaciones de la corriente, se realizo un análisis de wavelets de coherencia y fase entre la componente a lo largo de la costa de la corriente subsuperficial Perú-Chile y el nivel del mar en Caldera (Fig. 95c). Dentro de la banda intraestacional (30-90 días), la relación que existe entre las fluctuaciones del nivel del mar y la corriente es de aproximadamente 180°. Esto significa que cuando la perturbaciones del nivel del mar incrementan, se intensifica el flujo hacia el polo y cuando disminuye se debilita o se invierte. La interpretación física de esta relación se puede obtener a partir de la solución general para una onda Kelvin, donde el flujo a lo largo de la costa esta dado por:

$$v=-\frac{g}{c}\eta$$

donde g es la gravedad, es el desplazamiento de la superficie del mar, y c es la velocidad de una onda larga de gravedad.

De acuerdo a esta solución, las fluctuaciones del nivel el mar fluctúan con un desfase de 180° respecto del flujo a lo largo de la costa, siendo esta una de las características de la presencia de ondas atrapadas a la costa (ondas internas tipo Kelvin). De acuerdo al análisis de wavelets, este tipo de relaciones se presenta en periodos inferiores a 120 días (Fig. 95c). Por otra parte, para periodos mayores a 120 días la diferencia de fase entre el nivel del mar y la corriente a lo largo de la costa es de aproximadamente 90°. Al revisar la teoría, se encuentra que partiendo de la solución general para ondas de Rossby, el flujo a lo largo de la costa esta dado por:

$$v = -\frac{f^2}{\beta c^2} \frac{g}{\left|f\right|} \frac{\partial \eta}{\partial t}$$

donde f es el parámetro de Coriolis y es el gradiente latitudinal de f.

De acuerdo a esta expresión, en el caso de una onda de Rossby, el flujo a lo largo de la costa debe tener un a diferencia de fase de 90° con el nivel del mar, tal como se observa en el análisis de wavelet. Esto significa que dentro de la banda intraestacional las perturbaciones de la corriente y nivel del mar están asociadas principalmente a una dinámica de ondas atrapadas a la costa, en cambio para periodos mayores a 120 días, las perturbaciones estarían mas vinculadas a un dinámica de ondas de Rossby.

Para ver si estas ondas están relacionadas con la dinámica de ondas ecuatoriales se implemento un modelo lineal de ondas Kelvin ecuatoriales.

De acuerdo a esta ecuación, la diferencia de fase cercana a 90°, obtenida entre la corriente y nivel del mar, a través del análisis de wavelets, indica que las fluctuaciones con periodos mayores a 120 días se asocian principalmente a la dinámica de ondas de Rossby.

El origen de las ondas atrapadas a la costa frente a Chile ha sido ampliamente estudiado, encontrándose que en la banda intraestacional estas ondas son forzadas principalmente por las fluctuaciones del viento a lo largo del ecuador, las cuales generan ondas Kelvin ecuatoriales que se propagan hacia el este siguiendo la línea del ecuador. Una vez que estas ondas llegan a la costa de Sudamérica, parte de su energía se propaga hacia el polo como ondas atrapadas a la costa y otra se refleja hacia el oeste como ondas de Rossby.

Comparación de observaciones y resultados de modelos de ondas kelvin ecuatoriales han demostrado que esta dinámica explica una fracción significativa de la variabilidad intraestacional observada frente a Chile (Enfield, 1987; Shaffer *et al.*, 1997; Hormazábal *et al.*, 2002).

Por otra parte, para determinar el origen de las ondas de Rossby con periodos entre 120 y 512 días, se utilizó un modelo lineal de ondas Kelvin ecuatoriales para forzar ondas de Rossby en la zona costera frente a Chile. El modelo de ondas de Kelvin ecuatorial corresponde a un modelo lineal forzado por los vientos a lo largo del ecuador forzadas por el esfuerzo del viento a lo largo de la zona ecuatorial (Gill y Clarke, 1974; Mcphaden y Yu, 1999). El modelo de ondas de Rossby forzadas por las ondas de Kelvin ecuatoriales esta dado por:

$$v = -\frac{f^{2}}{\beta c^{2}} \frac{g}{\left|f\right|} \frac{\partial \eta}{\partial t}$$

donde f es el parámetro de Coriolis, es el gradiente latitudinal de f

De acuerdo a esta expresión, en el caso de una onda de Rossby, el flujo a lomo se observa en el análisis de wavelet. Esto significa que dentro de la banda intraestacional las largo de la costa debe tener una diferencia de fase de 90° con el nivel del mar, tal con perturbaciones de la corriente y nivel del mar están asociadas principalmente a una dinámica de ondas atrapada a la costa, en cambio para periodos mayores a 120 días, las perturbaciones estarían mas vinculadas a un dinámica de ondas de Rossby.

Para ver si estas ondas están relacionadas con la dinámica d ondas ecuatoriales se implemento un modelo lineal de ondas Kelvin ecuatirales, es el desplazamiento de la superficie del mar producido por las ondas Kelvin ecuatoriales a 82°W. La comparación de la corriente obtenidas con este modelo y la corriente observada en la zona de Coquimbo se presenta en la figura 96. Este modelo de ondas de Rossby permite capturar bastante bien la

variabilidad de la corriente hacia el polo durante los periodos cálidos (SST en la región Niño 3.4); sin embargo la fase no es correcta, probablemente por un efecto de la variación de la estratificación y de la fricción de fondo que no ha sido considerada en el modelo. En cambio este modelo no logra explicar la variabilidad de las corrientes frente a Chile durante los periodos fríos, sugiriendo que deben existir otros factores locales, tales como el esfuerzo del viento en la zona costera, que contribuyen significativamente en la generación de ondas de Rossby en la región.

En la banda intraestacional, este modelo simple logra explicar una fracción significativa de la varianza de la corriente y nivel del mar, quedando clara la importancia del forzamiento ecuatorial en esta banda de frecuencia (ver trabajo de Shaffer et al., 1997; Hormazabal et al., 2002). Para periodos entre 140 y 512 días, donde se aprecia un dinámica vinculada a ondas de Rossby, se utilizo este modelo de ondas Kelvin ecuatoriales para forzar ondas de Rossby en la zona costera.

Como se demostró anteriormente las fluctuaciones del nivel del mar y de la corriente subsuperficial de Perú-Chile están fuertemente moduladas por la dinámica de ondas ecuatoriales. A frecuencias intraestacionales dominan las onda atrapadas a la costa forzadas ecuatorialmente. Dentro de frecuencias mayores que la banda intraestacional (140-512 días), se presentan periodos en que predominan las ondas de Rossby forzadas ecuatorialmente (periodos cálidos), y otros periodos en que las ondas de Rossby son forzadas por una combinación de forzantes locales y remotos (periodos fríos). El nivel del mar observado en las estaciones mareográficas refleja bastante bien esta dinámica. En la figura 97 se muestran las fluctuaciones del nivel del mar en Arica y Antofagasta, y un diagrama con la evolución tiempo-profundidad de la temperatura el mar y su anomalía frente a Iquique (figura adaptada de Thomas et al., 2001). Fuertes oscilaciones semianuales en la profundidad de las isotermas están en fase opuesta a las oscilaciones del nivel del mar, lo cual es característico de la dinámica de ondas internas. Debido a la frecuencia de las fluctuaciones de la termoclina, estas fluctuaciones corresponden a perturbaciones generadas por ondas de Rossby forzadas por ondas de Kelvin ecuatoriales, tal como se demostró en el análisis anterior.

109

Durante el Niño 1997-98, las ondas de Rossby semianuales y las ondas atrapadas a la costa con periodos intraestacionales, son las principales responsables de la profundización de las isotermas en varias decenas de metros. Su origen ecuatorial queda de manifiesto en la figura 98a, donde las perturbaciones de la isoterma de 20°C a 110°W en la zona ecuatorial, son seguidas por isoterma de 15° en la zona de Iquique. Algunas diferencias se presentan entre ambas curvas debido a que la información de la zona ecuatorial es diaria, en cambio en la zona de Iquique es cercana al mes. Sin embargo su correspondencia es bastante buena y refleja la fuerte conexión con la dinámica ecuatorial.

Durante el periodo en que estas ondas producen la mayor profundización de las isotermas (El Niño 1997-98), la distribución vertical de los cardúmenes de anchoveta cambia drásticamente, alcanzando profundidades cercanas a los 140 m, con una mayor densidad alrededor de los 60 m. Habitualmente la mayor densidad de cardúmenes se presenta a una profundidad media de 15 m con una excursión vertical que no sobrepasa los 50 m. Por otra parte, durante El Niño 1997-98 el índice de determinación se mantiene con valores similares a los observados en periodos anteriores; sin embargo, éste cambia significativamente el índice de cobertura (IC), indicando una mayor dispersión del recurso debido de una expansión de su hábitat. La mayor dispersión del recurso, debido a una mayor excursión vertical debe modificar significativamente la disponibilidad de este recurso a las artes de pesca, lo cual se puede reflejar en una menor captura durante este periodo.

Las relaciones que se observan entre la profundidad de la termoclina y la distribución vertical de los cardúmenes y su dispersión, durante El Niño 1997-98, también se observan en el resto de los registros, pero con fluctuaciones mas débiles. Es decir, desde fines de 1999 hasta el termino del periodo de estudio la termoclina ecuatorial tiende a profundizarse, en tanto el limite inferior de la distribución de anchoveta incrementa y aumenta su dispersión (I.C.). No se aprecia una relación directa entre las fluctuaciones de la profundidad de la termoclina y la cantidad de biomasa del recurso. Es probable que otros factores, aparte de la expansión y compresión vertical del hábitat, estén jugando un rol importante en las fluctuaciones de la biomasa del recurso.

# 4.2. Caracterizar los patrones espacio-temporales del reclutamiento de los recursos pelágicos en relación con los parámetros del hábitat que han definido su éxito o fracaso (Objetivo específico 3).

# 4.2.1. Índices de abundancia

Sobre la base de la revisión de estudios FIP y BID, se ha compilado un conjunto de índices de abundancia para el stock de anchoveta de la zona norte de Chile, que se resumen en la Tabla 12.

	xx · 1 1	D · 1		
Indice	Unidad	Periodo	Descripción	Fuente
CPUE	t/(dm*m³)	1957-1977	Captura por unidad de esfuerzo estándar. Esfuerzo	Yáñez (1998)
			de pesca expresado en día en la mar por metros	
			cúbicos de capacidad de bodega.	
CPUE	t/vcp	1987-2002	Captura por unidad de esfuerzo estándar. El	Este proyecto
	<sup>^</sup>		esfuerzo de pesca se expresa en viajes con pesca.	
CPUE	t/vt	1986-2001	Captura por unidad de esfuerzo estándar. Las	GTE (2002)
CPUE	t/vcp	1986-2001	tasas de captura fueron estandarizadas mediante	
	_		MLG con factores: año, mes, zona de pesca y la	
			capacidad de bodega. Se utilizó enfoque de	
			Stefansson (1996) para corregir la CPUE	
			estimada con los viajes con pesca por la	
			probabilidad de éxito de pesca, lo que permite	
			incorporar los viajes sin pesca.	
Índice	número	1984-2002	Número de larvas en el área de estudio durante la	Braun <i>et al</i> .
larval			época invernal, estimada según metodología de	(2004a)
(L)			Smith y Richardson (1979)	
SSB	Т	1992-2003	Biomasa desovante, evaluada por el método de la	Braun <i>et al</i> .
			producción diaria de huevos (MPDH).	(2004b)
${}^{h}B$	Т	1995-2002	Biomasa total, evaluada por hidroacústica.	ej. Castillo et al.
				(2002)
<sup>h</sup> R	número	1995-2002	Reclutamiento en número del grupo de edad cero	ej. Castillo et al.
			(juveniles menores a 12 cm de longitud total),	(2002)
			como fracción de la biomasa acústica	
			transformada a número por la estructura de tallas.	
R	número	1984-2002	Reclutamiento en número del grupo de edad 0,	GTE (2002)
			evaluado por el Grupo de Trabajo de Evaluación	
			conjunta entre IFOP e IMARPE.	
В	Т	1984-2002	Biomasa total, evaluada por el Grupo de Trabajo	GTE (2002)
			de Evaluación conjunta entre IFOP e IMARPE.	
BD	Т	1984-2002	Biomasa desovante, evaluada por el Grupo de	GTE (2002)
			Trabajo de Evaluación conjunta entre IFOP e	
			IMARPE.	
BA	Т	1984-2002	Biomasa adulta, evaluada por el Grupo de Trabaio	GTE (2002)
			de Evaluación conjunta entre IFOP e IMARPE.	× /

Tabla 12. Índices de abundancia para el stock de anchoveta de la zona norte de Chile.

Las series de tiempo de cada uno de estos índices involucran diferentes procesos, y se grafican en la Figura 99 y 100, comparándose con los cambios relativos en las capturas anuales como patrón de referencia.

Usualmente la captura por unidad de esfuerzo se relaciona con la biomasa explotable del stock. El índice larval es un indicador de la intensidad del periodo reproductivo (Braun *et al.*, 2004a), y podría estar relacionado con la biomasa del stock desovante si se asume proporcionalidad entre la biomasa desovante, la producción de huevos y la abundancia larval. La biomasa evaluada acústicamente se ha realizado a fines de año o comienzos de cada año, tratando de evaluar el reclutamiento (grupo de edad 0).

Los índices de abundancia que cubren el periodo más reciente (1984-2002) corresponden a la CPUE e índice larval, existiendo una buena asociación entre estos dos índices (Fig. 101, Tabla 13).

Tabla 13. Correlaciones (coeficiente de correlación de Pearson) entre los índices de abundancia disponibles para el periodo 1984-2002. El asterisco en la cpue (t/vcp) se refiere al índice calculado en el presente proyecto. Valores subrayados son estadísticamente significativos (p=0,05).

a) escala original				
	cpue (t/vcp)*	cpue (t/vt)	cpue (t/vcp)	Indice Larval
cpue (t/vt)	0,448			
cpue (t/vcp)	0,973	0,276		
Indice Larval	0,567	<u>0,744</u>	0,427	
B. Expl.	0,186	0,780	0,030	0,161
b) valores log-trans	sformados			
	cpue (t/vcp)*	cpue (t/vt)	cpue (t/vcp)	Indice Larval
cpue (t/vt)	0,312			
cpue (t/vcp)	<u>0,982</u>	0,249		
Indice Larval	0,598	<u>0,650</u>	0,522	
B. Expl.	0,166	<u>0,890</u>	0,084	0,430

Se observa que la CPUE calculada en este estudio se correlaciona significativamente con la CPUE del grupo de trabajo en evaluación conjunta Ifop-Imarpe (GTE, 2002), ya que ambos índices tienen las mismas unidades y un tratamiento estadístico similar. El índice larval se correlaciona significativamente con la CPUE calculada por el GTE (2002), particularmente

con el índice que incorpora el éxito de pesca y que involucra los viajes sin pesca. Este es el único índice que se relaciona bien con la biomasa explotable, evaluada por el GTE (2002) ya que fue el índice utilizado como información auxiliar en la evaluación edad-estructurada.

## 4.2.2. Modelos de dinámica poblacional

Se realizó un análisis de la dinámica poblacional de anchoveta sobre la base del índice CPUE (t/vt) obtenido y utilizado por el GTE (2002). La función R calculada por este índice de abundancia se presenta en la Figura 102, en función de la abundancia del año anterior (dimensión 1). Aunque la relación es significativa, la abundancia del año anterior explica sólo 38,6% de la función R.

Los Modelos GAM indican que ninguna de las variables ambientales hasta ahora analizadas, ej. temperatura superficial del mar anual (SST), SST invernal (SSTw, julio-agosto), ni el índice de oscilación del sur (SOI), fueron capaces de explicar parte del componente estocástico de la función R representada por este índice de abundancia (Tabla 14). Para este índice de abundancia, los resultados indican que una estructura de retroalimentación de dimensión 1, ligeramente no-lineal, fue el modelo con más parsimonia (Fig. 103) y que ni los efectos climáticos directos ni indirectos producen un relación significativa en la dinámica poblacional de la anchoveta, en términos globales.

No obstante los resultados hasta aquí encontrados, se destaca que el GTE (2002) consideró una relación no-lineal entre la biomasa explotable y la CPUE (t/vt). Por lo tanto, es factible que los resultados aquí encontrados con el índice de abundancia utilizado no reflejen adecuadamente la dinámica de la población de anchoveta.

# 4.2.3. Modelos de reclutamiento

La Tabla 15 resume la abundancia del grupo de edad 0 y la biomasa desovante de anchoveta obtenida por el GTE (2002) para el periodo 1984-2002. El reclutamiento está representado el número de individuos, mientras que la biomasa desovante corresponde a la

biomasa que sobrevive hasta la época de desove. La relación stock-recluta se muestra en la Figura 104, observándose que el reclutamiento se relaciona casi linealmente con la biomasa desovante.

Tabla 14. Comparación preliminar de modelos de dinámica poblacional de anchoveta utilizando el índice CPUE (t/vt) del GTE (2002). Los modelos alternativos se comparan con el primer modelo utilizando el Criterio de Información de Akaike y el Criterio Bayesiano de Schwartz (SBC, S-plus 2000). Los parámetros de los modelos fueron estimados mediante Modelos Aditivos Generalizados con suavizadores de dispersión natural spline. Nt-1 = abundancia del año anterior, SSTw = temperatura superficial del mar invernal, SST = temperatura superficial del mar anual, SOI = índice de oscilación del sur, Pr = probabilidad del modelo en relación con el primero.

Modelos	AIC	BIC	Pr
$R_t = f(N_{t-1})$	35,19	38,02	
$R_t = f(N_{t-1}) + g(SSTw_t)$	36,80	41,05	0.672
$R_t = f(N_{t-1}) + h(SSTw_{t-1})$	38,39	42,64	0,880
$R_t = f(N_{t-1}) + g(SST_t)$	36,97	41,21	0,690
$R_{t} = f(N_{t-1}) + h(SST_{t-1})$	38,37	42,62	0,867
$R_t = f(N_{t-1}) + g(SOI_t)$	38,22	42,47	0,845
$R_t = f(N_{t-1}) + h(SOI_{t-1})$	35,68	39,93	0,569

La relación stock-recluta incorporando factores densidad-independientes se analizó con modelos aditivos generalizados, con suavizadores de dispersión natural spline (Tabla 16). La temperatura superficial del mar durante el periodo de desove (julio-agosto) no presentó una contribución importante en reducir la deviance del modelo S-R, y se relacionó positivamente con el reclutamiento. En cambio, un índice climático como el índice de la oscilación del sur se relacionó inversamente con el reclutamiento (Figura 105), produciendo una reducción importante en la deviance y un ajuste mejor. Estos resultados se interpretan que condiciones cálidas producirían un incremento en el reclutamiento de anchoveta.

No obstante, los modelos más interesantes resultaron al incorporar el índice de surgencia y de turbulencia primaveral, produciendo una relación no-lineal con el reclutamiento a la forma de una ventana ambiental óptima (Fig. 106 y 107).

Años	Capturas	Biomasa	Biomasa	Biomasa	Reclutas
	$(10^6 t)$	total	adulta	desovante	$(10^{9})$
		$(10^6 t)$	$(10^6 t)$	$(10^6 t)$	
1984	0,006	3,496	2,036	1,431	524,867
1985	0,071	3,481	2,565	1,919	188,193
1986	1,395	4,880	2,927	1,512	392,475
1987	0,234	8,336	3,057	1,945	661,628
1988	0,812	7,156	4,653	2,556	314,425
1989	1,374	5,972	3,741	1,639	506,423
1990	0,670	6,983	3,226	2,028	707,030
1991	0,638	12,532	5,722	3,882	766,709
1992	1,021	14,809	6,845	3,226	1466,594
1993	1,258	19,645	9,659	6,437	1224,642
1994	2,233	15,473	10,088	4,776	786,029
1995	1,788	13,925	7,455	3,691	1085,602
1996	1,012	13,844	8,367	5,862	776,069
1997	1,453	19,027	8,181	3,445	1302,383
1998	0,200	11,134	7,187	4,167	759,356
1999	0,885	10,691	7,120	4,782	560,697
2000	1,230	14,172	7,059	3,946	701,847
2001	0,675	8,246	5,719	2,797	445,407
2002	1,246	7,163	4,674	1,451	438,678

Tabla 15. Capturas, biomasa total, adulta, desovante y reclutas de edad 0 de anchoveta en el stock sur de Perú – Norte de Chile. Fuente: GTE (2002).

# 4.2.4. Sobrevivencia densidad-dependiente

Se analizó los datos de abundancia relativa por grupos de edad (CPUE) en el período 1986-2001 del Grupo de Evaluación Conjunta IFOP-IMARPE (GTE, 2002). Estos datos se utilizaron para obtener índices de abundancia según el método utilizado por Hayman et al. (1980), que consiste en sumar la abundancia relativa de una misma cohorte, desde la edad en que aparece en las capturas hasta que desaparece de la pesquería, lo que es un indicador de la fortaleza de las clases anuales. La CPUE representa el número de individuos por unidad de esfuerzo estándar del GTE (2002).

Con el objeto de analizar el efecto del reclutamiento y del stock adulto sobre la tasa de sobrevivencia edad-específica, se calculó un índice de abundancia relativa edad-específico

basado en los datos de captura en número por unidad de esfuerzo (Tabla 17). A partir de los datos de esta tabla se calculo la sobrevivencia por edad, la que se relacionó con la abundancia de reclutas y del stock adulto considerando dos formas funcionales (Tabla 18).

Tabla 16. Modelos stock-recluta de anchoveta incorporando factores ambientales. Los modelos alternativos se comparan con el primer modelo utilizando el Criterio de Información de Akaike y el Criterio Bayesiano de Schwartz (SBC, S-plus 2000). Los parámetros de los modelos fueron estimados mediante Modelos Aditivos Generalizados con suavizadores de dispersión natural spline. Rt = reclutamiento, SSBt = biomasa desovante, SSTw = temperatura superficial del mar invernal, SST = temperatura superficial del mar anual, SOI = índice de oscilación del sur, IS = índice de surgencia primaveral (septiembre-diciembre), IT = índice de turbulencia primaveral (septiembre-diciembre; Pr = probabilidad del modelo en relación con el primero.

Modelos	AIC	BIC	Pr
$R_t = f(SSB_t)$	272,45	276,22	
$R_t = f(SSB_t) + g(SSTw_t)$	272,99	278,66	<0,001
$R_t = f(SSB_t) + g(SOI_t)$	267,43	273,10	<0,001
$R_t = f(SSB_t) + g(IS_t)$	268,06	273,73	<0,001
$R_t = f(SSB_t) + g(IT_t)$	269,87	275,54	<0,001

Tabla 17. Indice de abundancia relativa de anchoveta por grupos de edad basado en la captura en número por edad (nº/vt), aplicando el método de Hayman *et al.* (1980). Período: 1986-2001.

Edad	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
0	1003	3171	1978	2471	2383	3436	5478	5936	3187	3769	3322	4352	3702	3980	3558	3541
1	916	1003	3132	1859	2260	2236	3428	5419	4871	2816	3587	3226	4312	2677	3749	3303
2	1214	163	997	1504	828	1452	1849	1691	4089	2793	1740	2904	1674	3478	935	2133
3	538	111	51	232	175	33	77	116	182	349	198	378	270	600	1259	506
4	13	9	1	1	9	2	1	3	5	2	6	16	34	25	94	66
							1083	1316	1233			1087		1076		
Total	3684	4456	6159	6066	5655	7158	2	4	5	9729	8853	6	9992	0	9596	9549
Adulta	2681	1286	4181	3596	3272	3722	5355	7227	9148	5960	5531	6524	6290	6779	6037	6008

Los resultados indican que la sobrevivencia del grupo de edad 0 es afectada negativamente por la abundancia del stock adulto. A su vez, la sobrevivencia del grupo de edad 1 está positiva y no-linealmente con la abundancia de reclutas y al mismo tiempo negativa y no-linealmente con la abundancia del stock adulto (Tabla 18, Figura 108). La sobrevivencia de
la edad 2 y 3 es independiente de la abundancia de reclutas y del stock adulto, probablemente más influenciada por el efecto de la pesca como factor extrínsico.

En consecuencia, un stock adulto abundante determinará una disminución en la tasa de sobrevivencia del grupo de edad 0 y 1, aspecto que en el caso del grupo de edad 1 se vería compensado por un efecto positivo de la abundancia de reclutas sobre la sobrevivencia del grupo de edad 1. Esta interacción está relacionada con la interacción entre cohortes como intra-cohortes.

Estas relaciones apoyan la idea de que en el stock de anchoveta los mecanismos densidaddependientes están presentes y pueden ser determinantes en la dinámica de la población, más que los factores densidad-independientes. Al parecer, factores ambientales asociados con anomalías intensas relacionadas con fenómenos El Niño-Oscilación del Sur están más relacionados con la distribución del recurso y uso del hábitat más bien que con la dinámica de la abundancia.

# 4.2.5. Análisis de sincronía de tres stocks de anchoveta

Las fluctuaciones de capturas de los tres stocks más importantes de anchoveta se presentan en la Figura 109. Se observa que las capturas más importantes ocurren en el stock centronorte de Perú, siendo el stock menos productivo aquel que se distribuye frente a la zona centro-sur de Chile. No obstante en los tres stocks se advierte un periodo de baja producción pesquera entre 1976 y 1984 aproximadamente, y dos periodos de mayor abundancia, uno entre 1960 y 1972 y otro entre 1985 y 2002. Así lo confirman las tendencias obtenidas con loess (Figura 110). Por lo general el coeficiente de determinación basado en loess fue mayor que el de la tendencia lineal, lo que se interpreta la importancia de fluctuaciones de baja frecuencia contenidos en los datos. Nótese que el coeficiente de determinación loess más bajo ocurrió en el stock Sur de Perú-Norte de Chile, lo que se interpreta como un stock más influenciado por variabilidad de alta frecuencia. Tabla 18. Selección de modelos que describen efectos densidad-dependientes sobre la tasa de sobrevivencia de anchoveta ( $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\mu$ ). Se utilizan dos formas funcionales: lineal y log-lineal, en una escala logit con estructura de error binomial (enlace logit).

Modelo		Efecto del	Efecto stock	D	AIC
	Intercepto	reclutamiento	adulto		
	β	γ	μ		
Edad 0					
Lineal	4,679 (1,274)	-0,000377 (0,00035)	-	34,63	61,12
	5,624 (1,047)	-	-0,000433 (0,00019)	26,89	57,33
	5,623 (1,274)	5,94×10 <sup>-7</sup> (3,8×10 <sup>-4</sup> )	-0,000433 (0,00023)	26,90	59,33
Log-lineal	15,520 (7,854)	-1,504 (0,972)	-	31,86	59,87
	17,546 (6,786)	-	-1,675 (0,801)	28,24	58,06
	20,697 (8,378)	-0,762 (1,082)	-1,355 (0,947)	27,22	59,51
Edad 1					
Lineal	-0,147 (1,170)	0,000234 (0,00032)	-	29,20	58,56
	1,861 (1,054)	-	-0,000233 (0,00019)	27,26	57,53
	0,798 (1,137)	0,000612 (0,00034)	-0,000435 (0,00021)	21,43	55,92
Log-lineal	-7,997 (7,284)	1,072 (0,902)	-	27,41	57,61
	12,898 (6,164)	-	-1,448 (0,728)	23,30	55,18
	1,823 (5,255)	2,550 (0,679)	-2,570 (0,594)	10,71	45,51
Edad 2					
Lineal	-1,724 (0,810)	-1,58×10 <sup>-5</sup> (2,2×10 <sup>-4</sup> )	-	13,99	47,52
	-1,969 (0,754)	-	3,689×10 <sup>-5</sup> (1,4×10 <sup>-4</sup> )	13,92	47,45
	-1,853 (0,914)	-6,71×10 <sup>-5</sup> (2,7×10 <sup>-4</sup> )	5,899×10 <sup>-5</sup> (1,7×10 <sup>-4</sup> )	13,85	49,37
Log-lineal	-2,949 (5,195)	0,145 (0,643)	-	13,94	47,47
	-2,060 (4,777)	-	0,033 (0,564)	13,99	47,53
	-2,792 (5,995)	0,169 (0,774)	-0,041 (0,678)	13,94	49,47
Edad 3					
Lineal	-4,552 (0,668)	0,000336 (0,00018)	-	9,53	41,77
	-4,448 (0,626)	-	0,000203 (0,000113)	9,61	41,88
	-4,835 (0,730)	0,000222 (0,00022)	0,000129 (0,00013)	8,84	42,63
Log-lineal	-11,372 (4,278)	0,988 (0,530)	-	9,45	41,65
	-11,283 (3,841)	-	0,932 (0,453)	9,05	40,98
	-13,914 (4,636)	0,606 (0,599)	0,665 (0,524)	8,33	41,75

Los residuos indicativos de cambios de largo plazo en la captura, mostró cambios similares con el tiempo para los tres stocks de anchoveta (Fig. 111a). En el caso de componente de variación de corto plazo (alta frecuencia), solamente se observó un patrón similar y dominante en los stocks Centro-Norte de Perú y Sur de Perú-Norte de Chile (Fig. 111b).

El componente de variación de baja frecuencia fue significativo y muy relacionado en los tres stocks de anchoveta (Fig. 112), lo que sugiere un patrón de fluctuaciones de largo plazo en sincronía de la abundancia. No obstante, se encontraron divergencias en los últimos años de la serie, desde mediados de los años 90, aspecto que puede estar relacionado con las regulaciones pesqueras que imponen ciertas restricciones a la actividad pesquera.

En el caso del componente de alta frecuencia, solamente los residuos a corto plazo del stock Sur de Perú-Norte de Chile fueron significantes y relacionados con los residuos a corto plazo del stock Centro-Norte de Perú ( $r^2=0.471$ , p < 0.05), pero no hubo ninguna relación entre los residuos a corto plazo con el stock de la zona centro-sur de Chile ( $r^2 = 0.045$ , P>0,5; Fig. 113). A su vez, el impacto de fenómenos El Niño-Oscilación del Sur que se presentan durante la primavera del año anterior, se relacionaron inversa y significativamente con los residuos de corto plazo de los stocks Centro Norte de Perú y Sur de Perú-Norte de Chile, mientras que tales cambios no tienen relación alguna con el componente de corto plazo del stock de anchoveta de la zona centro-sur de Chile (Fig. 114). No obstante, la relación es más bien débil y fortalecida solamente debido a la influencia de eventos El Niño de gran magnitud, con anomalías positivas por sobre 2.

El stock Centro-Norte de Perú y Sur de Perú-Norte de Chile de anchoveta presentan un componente de variabilidad a corto plazo más similar entre sí, mientras que el stock de la zona centro-sur de Chile presenta un patrón de fluctuación interanual diferente. Los stocks norteños están mucho más relacionados entre sí y, por ende, impactados por los factores medioambientales similares, no relacionados necesariamente con aquellos que ocurren en la zona centro-sur de Chile. Además, los stocks norteños de anchoveta podrían tener una mayor probabilidad de mezcla que con el stock de la zona centro-sur de Chile. Por lo general, las poblaciones en los límites de su rango geográfico generalmente exhiben comportamientos diferentes frente a la variabilidad ambiental que aquellos y más

susceptibles a regulación por factores densidad-dependientes que aquellos distribuidos muy cerca del centro de su distribución (Myers, 1998).

Aunque la variación interanual de la abundancia de anchoveta podría ser explicada por eventos El Niño-La Niña, el componente de fluctuación de alta frecuencia sólo fue débilmente explicada por las anomalías de la temperatura superficial del mar en la Región Niño 1+2 calculadas para la primavera del año anterior. En este contexto, sólo eventos El Niño de gran magnitud podrían tener consecuencias para el reclutamiento un año después, siendo de mayor importancia los problemas relacionados con la capturabilidad y disponibilidad del recurso en general, y otras causas como la intensidad de pesca o el viento podrían estar determinando cambios de corto plazo en la abundancia de la anchoveta (Yáñez et al., 2001).

Desde un punto de vista de largo plazo, el periodo de baja abundancia en los tres stocks de anchoveta se inicia desde 1968-69 hasta mitad de los años 80, con un periodo de baja abundancia entre 1977 y 1984 principalmente. Coincidentemente, en dicho periodo la abundancia de sardina domina en toda la región. Los puntos de cambio, se reconocen fácilmente de un cambio de régimen de anchoveta al otro: uno habría ocurrido en 1968-69 y otro en 1984-85, determinando cambios evidentes sólo a contar desde 1976 en el primer caso y probablemente desde 1987 en el segundo. El análisis de las series de tiempo de capturas revela un punto de cambio a fines de los años 90, probablemente después de 1997-98. Sin embargo este punto de cambio no es muy bien definido pues es probable que las series de captura en el periodo más reciente estén afectadas por mecanismos de regulación impuestos a la actividad pesquera (vedas, cuotas de captura, entre otros).

No obstante lo anterior, el análisis revela que los stocks de anchoveta exhiben importantes fluctuaciones de corto y largo plazo. Las fluctuaciones de alta frecuencia podrían estar relacionadas con la variabilidad ambiental interanual y otros procesos densidad-dependientes (reclutamiento) o el factor humano a través de la pesca. Sin embargo, los cambios sincrónicos en el componente de variación de baja frecuencia en los tres stocks de anchoveta podrían estar relacionado con la variabilidad climática de gran escala (decadal e interdecadal) que se describe para el Pacífico (Beamish, 1995; Hare *et al.*, 2000).

Desafortunadamente, las series de tiempo del reclutamiento de anchoveta son cortas, y no permiten un análisis como el realizado para los últimos 30 años. No obstante, el patrón sincrónico de baja frecuencia que ha ocurrido en los tres stocks de anchoveta, está fuera de fase con los cambios de gran amplitud de la población de sardina (Lluch-Belda et al., 1989, 1992). En este contexto, la variabilidad climática decadal en interdecadal parece ser la mayor causa de fluctuaciones en los peces pelágicos pequeños. La información existente, en términos de la evaluación de stock y las herramientas de administración actuales, puede ser adecuada y suficiente para responder a los cambios de corto plazo en las fluctuaciones del reclutamiento. Sin embargo, los cambios de régimen de gran amplitud pueden ser mucho más importantes ya que dichos cambios afectan la estructura, dimensión y dinámica de pesquerías enteras por varios años.

# 4.3. Desarrollar un modelo conceptual explicativo que permita integrar la variabilidad del ambiente marino y la dinámica de poblaciones de recursos pelágicos de la zona norte de Chile (Objetivo específico 4)

# 4.3.1. Antecedentes bibliográficos

De acuerdo con Bernal *et al.* (1983), "la mayor variabilidad de los stocks de peces pelágicos que habitan los ecosistemas altamente productivos de los márgenes orientales de los océanos, aparte de los factores poblacionales intrínsicos, pareciera estar también asociada a la variabilidad oceanográfica de gran escala observada en dichos sistemas". En efecto, en los sistemas de California y de Chile-Perú ha sido posible demostrar que, aparte de la clara estacionalidad, existen fluctuaciones de baja frecuencia observadas tanto en la dinámica biológica como en la física, existiendo algún grado de acoplamiento entre ambas dinámicas (Bernal, 1979; Chelton, 1981; Chelton *et al.*, 1982; Bernal *et al.*, 1983; Yáñez y Barbieri, 1988; Pizarro *et al.*, 1994; Yáñez, 1998; Yáñez *et al.*, 2001, 2003; Montecinos *et al.*, 2003, 2005; Pizarro y Montecinos, 2004).

Bernal *et al.* (1983) también indican que "existe una abundante evidencia acumulada que muestra el impacto que tienen cierto tipo de eventos oceanográficos semi-períodicos sobre las poblaciones de peces en explotación, por ejemplo las alteraciones sobre el reclutamiento de la anchoveta peruana (*Engraulis ringens*) causadas por el fenómeno El Niño. La predicción de estos eventos es un objetivo significativo en si mismo para el manejo pesquero de la región. En este sentido, es notable el incremento de la capacidad predictiva que se adquiere respecto de los stocks de peces pelágicos, al incorporar estimaciones parametrizadas de la variabilidad oceanográfica en modelos pesqueros. Un ejemplo lo encontramos en el trabajo de Parrish y MacCall (1978), quienes encuentran que las relaciones stock-recluta de la caballa de California (*Scomber japonicus*) explicaban cerca de 24% de la varianza total. En cambio, al incorporar variables oceanográficas la explicación aumentaba al 75%; estas variables son del tipo altura del nivel del mar, indices de surgencia costera y de divergencia oceánica, y la temperatura superficial del mar, todas indicativas de procesos oceanográficos dominantes en los sistemas de margen oriental".

En el sistema de Chile-Perú los eventos El Niño son fenómenos de la interacción océanoatmosfera y de mayor importancia en la variabilidad interanual. En términos oceanográficos son invasiones masivas de aguas cálidas al sistema, alterando la dinámica de sus flujos y la distribución de sus masas de agua. Los cambios en la distribución de las masas de agua en el sistema durante períodos calidos y fríos son discutidos por Robles (1979). Cabe señalar que durante los El Niño, el centro de altas presiones del Pacífico Sureste (Tahiti) y el centro de bajas presiones de Indonesia (Darwin) se encuentran menos desarrollados, situación que

se manifiesta en claras disminuciones del IOS (Fig. 18a).

Como lo habíamos enunciado, el sistema de corrientes de Chile-Perú es uno de los regímenes oceanográficos que presenta los más altos niveles de producción biológica. Esta riqueza biológica se produce esencialmente por: las surgencias costeras provocadas por vientos predominantes del sur y sureste en el centro y sur de Perú, y del sur y suroeste en el norte y centro de Chile; y la acción de los flujos advectivos de nutrientes. Estos procesos presentan una marcada señal estacional. En Chile las surgencias costeras son máximas en primavera-verano; en tanto que en la costa peruana son máximas en invierno, por los vientos predominantes y la dirección de la costa.

Así, este ecosistema ha sustentado la gran pesquería peruano-chilena de anchoveta (Fig. 4a). Sin embargo, el ecosistema ha experimentado cambios significativos en su composición ictica pelágica después del fenómeno El Niño de 1972-73, que marca la gran disminución de anchoveta que se mantiene hasta mediados de los 80. En tanto que desde mediados de los 70 aumentan notablemente los desembarques de sardina (Fig. 4b), y en menor medida los de jurel (Fig. 5c) y caballa (con 88.000 t/año entre 1976-02). Un segundo gran cambio se observa después de 1985, representado principalmente por la notable recuperación de anchoveta y disminución de sardina primero en Chile y años después en Perú (Fig. 4b).

Los cambios en la dinámica y distribución de las masas de agua del sistema debido a condiciones anómalas, deben tener consecuencias biológicas inmediatas en las condiciones y estructura espacial del hábitat de las especies pelágicas (Bernal *et al.*, 1983). En el nécton deben tener desplazamientos poblacionales importantes en respuesta a la distribución de las

masas de agua. En tanto que las poblaciones planctónicas debido a su menor capacidad de movimiento pueden experimentar un deterioro de su hábitat, provocando mortalidades elevadas. Cambios en salinidad, temperatura, nivel de turbulencia y estratificación pueden ser letales para las larvas, en forma directa o alterando la disponibilidad (concentración) y calidad (composición y tamaño) del alimento.

La anchoveta y sardina se caracterizan por utilizar los centros de surgencia y áreas adyacentes como hábitat preferido, ocupándolos tanto durante la época de desove, y como centros de alimentación para juveniles y adultos (Bernal, 1990). Estas especies son eminentemente planctófagas. La larva de primera alimentación es fitoplanctófaga y altamente selectiva en el tamaño del alimento, las larvas de más de una semana depredan sobre el microzooplancton, y los juveniles y adultos sobre zooplancton adulto, preferentemente. Juveniles y adultos jóvenes pueden eventualmente alimentarse de fitoplancton en altas concentraciones locales.

Los procesos oceanográficos que afectan el modo de vida de las especies ejercen su acción a diferentes escalas espaciales y temporales; éstas escalas forman un continuo desde pocas horas a siglos y desde centímetros a miles de kilómetros Haury *et al.*, 1978; IOC, 1985; Bernal, 1990; Levin, 1992).

En relación con otros modelos conceptuales, Perry *et al.* (2000) postulan que la capturabilidad de los peces en pesca comercial y de investigación puede fluctuar en diversas escalas espaciales y temporales. Estas variaciones pueden reflejar cambios que ocurren en similares escalas espaciales y temporales, tanto en el ambiente físico y biológico. De esta forma postula un diagrama conceptual de escalas de tiempo (de 1 a 10.000 km) y espacio (desde el día a la centuria), características de procesos y actividades en el ambiente marino físico y biológico, y en las actividades pesqueras.

Chávez *et al.* (2002) estudian los impactos del El Niño 1997-98 en las aguas de California central y definen un modelo conceptual de los cambios ecosistémicos asociados (Fig. 2). El modelo describe en la escala interanual las relaciones establecidas entre la abundancia y la

distribución de los recursos en sus diferentes estados de desarrollo, y los niveles de temperatura, salinidad, clorofila, altura del mar y zooplancton, entre otros.

Por otra parte, Chavez *et al.* (2003) estudian los cambios de largo plazo (50 años) de la anchoveta y sardina, asociados a grandes cambios de la condición ambiental del Océano Pacífico (Fig. 3). El modelo conceptual se refierere a la variabilidad de indicadores ecosistémicos y a cambios de régimen en una escala multidecadal similar a la abordada en el presente trabajo (1950-2002).

Finalmente, Bertrand *et al.* (2004) proponen un contexto integrador de factores que, ocurriendo a diferentes escalas espacio-temporales, pueden ser considerados para interpretar el efecto de un evento El Niño en poblaciones de peces pelágicos. Las escalas temporales van desde el día a la década y las espaciales desde lo local al océano.

#### 4.3.2. Modelo conceptual

Tomando en cuenta las consideraciones antes mencionadas, se adaptó un modelo conceptual integrador de los diferentes fenómenos locales y de gran escala que afectan el ambiente marino del norte de Chile, y la distribución y abundancia de los principales recursos pelágicos (Fig. 115). Este modelo adaptado toma en cuenta los análisis que a las distintas escalas se realizan (ver subcapítulo 4.1), tomando en cuenta las bases de datos ambientales, biológicos y pesqueros recuperados durante el desarrollo del proyecto (ver subcapítulo 3.2).

Este modelo muestra como las fluctuaciones interdecadales (asociadas a cambios de regimen) e interanuales (asociadas a los eventos El Niño) que se desarrollan en el Océno Pacífico, se manifiestan en el Pacífico Sudeste y por ende en la zona norte de Chile, afectando además el ciclo anual, la dinámica de las ondas ecuatoriales y la surgencia costera. En lo biológico, el hecho más notable es la secuencia de la sustitución de las especies en cuestión (anchoveta-sardina-anchoveta), siendo más favorables en términos de desembarque los períodos de anchoveta para Perú y el de sardina para Chile (Fig. 4).

### Escala interdecadal

En efecto, en el período interdecadal analizado (1950-02) se observan en la zona de estudio tres períodos, asociados a dos cambios de regímenes (Fig. 30 y 33). El primer cambio de régimen de mediados de la década del 70, se habría iniciado después del evento El Niño de 1972-73; y el segundo producido cerca de 1990, habría comenzado a mediados de los 80. Para caracterizar los períodos en cuestión, se consideraron las fluctuaciones temporales de variables ambientales y bio-pesqueras del período interdecadal (Fig. 116).

El primer período (1950-75), particularmente favorable a la pesquería de anchoveta por los altos esfuerzos de pesca (ESF AN) y desembarques (DES AN) después de 1960 (Fig. 5a), se caracteriza por valores positivos del IOS y un ambiente comparativamente frío (por la TA y la TSM), con un nivel del mar en la costa (NMM) que tiende a disminuir, una termoclina somera (Zb) y vientos moderados reflejados en el TE e IT (Fig. 116a).

El segundo período (1976-89) se vuelve favorable a la pesquería de sardina por los altos niveles del esfuerzo de pesca (ESF SAR) y del desembarque (DES SAR); aunque los desembarques de anchoveta son también importantes desde 1986 (Fig. 4). En este período el IOS en general disminuye, el ambiente es comparativamente cálido, el NMM es mayor y la Zb se profundiza (Fig. 116b). En en tanto los vientos locales aumentan notablemente, provocando que el transporte (TE) y la turbulencia (IT) alcancen los mayores valores del período de estudio (Fig. 17c y d).

El tercer período (1990-2002) vuelve a ser favorable a la anchoveta, dado los altos niveles de biomasa (B-AN), reclutamiento (R-AN), esfuerzo de pesca (ESF AN) y desembarque (DES AN), contrarios a los de sardina (Fig. 116c). Aunque la TA no tiende a recuperar los niveles fríos y el IOS tiende a recuperar valores positivos solo al final del período (salvo los del 88-89), las características son más bién de un ambiente frío, con las variables locales (TSM, NM, TE e IT) que tienden a claramente a disminuir (Fig. 17).

#### Escala interanual

En la escala interanual se reconocen entonces los significativos cambios producidos por los eventos El Niño, que hacen que en forma aperiódica se produzcan "calentamientos" en un ambiente con características más bien frías. Aunque, como lo hemos visto, también en la escala interdecadal decadal se observan períodos cálidos y fríos de larga duración. Entonces los fenómenos El Niño se amplifican al desarrollarse durante el período cálido de largo plazo (1976-1990), lo que se destaca en la TSM, NMM y TA durante el evento de 1982-83; sin desconocer los altos valores que estas variables presentan durante el gran evento El Niño de 1997-98 (Fig. 17a, b y e).

Así, durante los eventos El Niño el IOS disminuye, y la temperatura es alta en el Ecuador (Niño 1-2 y Niño 3-4) y en la zona de estudio (por la TSM y TA) (Fig. 117a). El NMM aumenta (lo mismo que sucedería con el TE y el IT; ver Fig. 17c y d), en tanto que Zb se profundiza. En estas condiciones la abundancia de anchoveta medida por acústica (sA) disminuiría (a lo menos en 1997; ver Fig. 45), al igual que la cantidad de huevos y la distancia a la costa (DC), incrementando por esto su dispersión y distribución vertical. Al mismo tiempo disminuyen notablemente el esfuerzo de pesca (ESF AN) y los desembarques de anchoveta (DES AN) (Fig. 4a). Los altos desembarques de sardina se relacionan más bien con el establecimiento del período cálido de largo plazo (1976-90), que con los eventos El Niño que se suceden en dicho período (Fig. 5b).

Durante los años normales-fríos las condiciones se invierten completamente (Fig. 117b). El IOS se fortalece, en tanto las temperaturas (TA y TSM) y NMM disminuyen, lo mismo que la intensidad del IT y TE; en tanto el Zb se hace más somero. En estas condiciones, particularmente durante los períodos fríos de largo plazo (antes de 1976 y después de 1990), la anchoveta aumenta su biomasa, la cantidad de huevos, la DC, el ESF AN y los DES AN; aunque también aumentaría su vulnerabilidad por efecto del Zb más superficial (Fig. 98).

#### Escala estacional

De acuerdo con Bernal *et al.* (1983), en los sistemas de borde oriental aparte de las fluctuaciones de baja frecuencia existe una clara y estadísticamente definible estacionalidad. En el presente trabajo esta variabilidad se conceptualiza empleando los análisis de la base de datos ambiente-recursos georreferenciados del período 1987-2002 (Fig. 88). Para los efectos se consideran los recursos en años normales/fríos y durante eventos El Niño del período considerado (Tabla 19).

Para las tres especies la TSM promedio es más alta durante todos los meses del año durante los eventos El Niño (Fig. 88a, b y c). En verano la TSM es alta, tiende a la disminución en otoño, para alcanzar los niveles más bajos en invierno y tender a recuperarse en primavera. En años normales/fríos la Clorofila es más alta en verano y mínima en invierno; en tanto que durante los eventos El Niño los máximos de verano disminuyen notablemente.

Los gradientes en la distribución de anchoveta son mayores en primavera-verano y menores en invierno, particularmente durante años normales/fríos (Fig. 88a). En la distribución de sardina los gradientes son mayores en verano-otoño, particularmente en años normales/fríos; después disminuyen y se mantienen hasta fin de año (Fig. 88b). Salvo en verano, los gradientes durante eventos El Niño son menores, particularmente en invierno-primavera. Para el jurel los gradientes son en general altos en verano-otoño y bajos en invierno-primavera (Fig. 88c)

Tabla 19. Características ambientales y bio-pesqueras en la escala estacional durante años normales/fríos y El Niño, para anchoveta y sardina en 1987-02.

Años Normal/Fríos	DES	CPUE	IT	TE	GRT	DC	TSM	CLOA
verano	1	<b>↑</b>	<b>≜</b>	1	•	•	1	1
otoño	1	×	T T		1			1
invierno	X	X	<b>↓</b>	•	l ↓		↓	
primavera	↓ ↓	↓ ↓	Ť	<b>I</b> ↑	×	×	1	1
Años El Niño	DES	CPUE	IT	TE	GRT	DC	TSM	CLOA
verano	<b>↑</b>	<b>↑</b>	<b>↑</b>	+	<b>I ↑</b>	↓	1	+
otoño	1	↗	¥	<b>↑</b>	×	↓	$\mathbf{X}$	+
invierno	1	×	¥	<b>I</b> ↑	1	↓	+	1
primavera	×	×	Ť	↓	×			×

DES	CPUE	IT	TE	GRT	DC	TSM	CLOA
X	×	<b>↑</b>	<b>≜</b>	×	↓	1	↑
X	×	+	↓ ↓	×	×	×	×
×	×	•	•	$\mathbf{X}$	×	×	•
≯	×	<b>1</b>	<b>↑</b>	×	↑	<b>I</b> ↑	×
DES	CPUE	IT	TE	GRT	DC	TSM	CLOA
1	×	<b>1</b>	+	×	↓	1	•
1	×	+	<b>≜</b>	×	↓	×	•
*	×	+	<b>I</b> ↑	$\mathbf{X}$	×	×	
×	×	Ť	•	X	×		
	DES	DES CPUE	DES CPUE IT	DES CPUE IT TE	DES CPUE IT TE GRT	DES CPUE IT TE GRT DC	DES CPUE IT TE GRT DC TSM

La anchoveta se distribuye en promedio dentro de las 25 mn de la costa en verano-otoño; en invierno-primavera aumenta notablemente su distancia de la costa (DC), alcanzando las 35 mn (Fig. 88a). En tanto que durante los eventos El Niño la distribución es bastante costera en verano y posteriormente sobrepasa en ocasiones las 25 mn de la costa.

En años normales/fríos la DC promedio de sardina se presenta entre los 25 y 35 mn de la costa en verano-otoño, y en los 45-55 en invierno-primavera (Fig. 88b). Durante los eventos El Niño la sardina se encuentra igualmente en los 25-35 mn en verano-otoño, pero en invierno-primavera su distribución es más costera al ubicarse entre las 30-45 mn. El jurel presenta la misma estacionalidad de la DC que sardina, pero en general es un tanto más costero que la sardina (Fig. 88c). Se destaca entonces la segregación espacial de las especies y la concentración a la costa de éstas durante los eventos El Niño, particularmente en invierno-primavera.

La CPUE de anchoveta no muestra una clara estacionalidad en el período de estudio, aunque ésta es ligeramente mayor en verano (Fig. 88a). Durante los eventos El Niño la CPUE es ligeramente mayor en verano-otoño-invierno, que durante años normales/fríos. La CPUE de sardina presenta durante períodos normales/fríos sus más altos valores en primavera (Fig. 88b). En tanto que durante los eventos El Niño ésta se eleva notablemente en verano-otoño-invierno, indicando una mayor disponibilidad producto del acercamiento de aguas más cálidas. En tanto el jurel presenta los valores más bajos de CPUE, sin diferencias notables entre meses, y entre períodos fríos y cálidos (Fig. 88c).

#### Escala intraestacional

Las fluctuaciones del nivel del mar y de la corriente subsuperficial de Perú-Chile están fuertemente moduladas por la dinámica de ondas ecuatoriales. En la frecuencia intraestacional dominan las ondas atrapadas a la costa y en frecuencias mayores se presentan periodos en que predominan las ondas de Rossby forzadas ecuatorialmente (periodos cálidos), y otros periodos en que éstas ondas son forzadas por una combinación de forzantes locales y remotos (periodos fríos).

Durante eventos El Niño las ondas de Rossby semianuales y las ondas atrapadas a la costa con periodos intraestacionales serían las principales responsables de la profundización de las isotermas y de la distribución de anchoveta (Fig. 98). Habitualmente las mayores densidades de anchoveta se presentan a una profundidad media de 15 m, con una excursión vertical que no sobrepasa los 50 m. Entonces una mayor profundización de la anchoveta debe modificar significativamente su disponibilidad a las artes de pesca, lo cual en alguna medida debe reflejarse en las disminuciones de capturas observadas normalmente durante estos periodos cálidos (Fig. 4a). Esto al margen de las disminuciones asociadas a los bajos reclutamientos producidos por el efecto negativo de estos períodos cálidos en la reproducción, y en la sobrevivencia de huevos y larvas.

#### Escala diaria-semanal

En la zona norte de Chile las surgencias costeras prevalecen durante todo el año, debido a la predominancia de vientos del sur y suroeste; éstos presentan características similares en Arica, Iquique y Antofagasta, con valores máximos durante el período cálido (entre noviembre y marzo) y mínimos en invierno (Pizarro *et al.*, 1994). Las surgencias tienen una duración de 4 a 15 días y la extensión alcanza las 40 mn; las de mayor duración se producen a fines del verano e inicios de otoño, y las de menor tiempo en invierno-primavera (Barbieri *et al.*, 1995).

Entonces en primavera-verano las surgencias serían más intensas debido a la mayor intensidad de los vientos favorables, la termoclina (Zb) más somera, los gradientes térmicos más marcados y la productividad más concentrada a la costa (Fig. 118). Esta situación favorecería la reproducción de anchoveta, el reclutamiento que se produce antes del año y la vulnerabilidad a las artes de pesca.

En tanto que en invierno los vientos son más débiles, la Zb se profundiza, los gradientes térmicos disminuyen en intensidsd y la productividad se presenta más dispersa. En estas condiciones la anchoveta se distribuye en una zona más amplia y más dispersa, siendo menos vulnerable.

Estas condiciones se acentúan durante los años fríos y se modifican notablemente durante los eventos El Niño y períodos cálidos de largo plazo. Los El Niño aumentarían la mortalidad de anchoveta durante los primeros estadíos, por cambios en la calidad del alimento debidos a surgencias menos efectivas; y disminuirían su vulnerabilidad, por cambios en su distribución horizontal y vertical. Estos efectos se reflejarían en las notables disminuciones de captura durante dichos eventos. La recuperación de las capturas al año siguiente se debería a la gran capacidad de reproducción de la anchoveta frente a condiciones favorables y a una mayor vulnerabilidad del stock adulto. Durante los períodos cálidos de largo plazo se acentúan estas condiciones desfavorables para la anchoveta, al aumentar la turbulencia (que dispersa el alimento) y el transporte de Ekman (que advecta elementos reproductivos hacia el oeste). La cercanía y permanencia de aguas cálidas en la zona favorecería el acercamiento de la sardina, el aumento de su abundancia en estas condiciones que le serían favorables y por ende el desarrollo de la pesquería.

# 4.4. Identificar variables proxies en el medio ambiente marino y biológico para la detección temprana de posibles cambios en el ecosistema debido a fluctuaciones ambientales (Objetivo específico 2).

# 4.4.1. Antecedentes bibliográficos

Las proxies son variables que sin ser parte directa del sistema bajo estudio tienen relación con alguna de las variables que sí lo afectan y que por alguna razón, ya sea metodológica o temporal, no es posible medir. Desde luego que entre más alejado esta el proxy de la variable de interés, mas cuestionable será su uso. Una variable se convierte en proxy cuando indica una determinada información sobre una realidad que no se conoce completa o directamente, y cuando permite una lectura comprensible y científicamente válida del fenómeno a estudiar.

Los proxies son variables que si bien no se relacionan directamente con hechos, permiten inferir sobre el mismo dadas sus ingerencias e impactos. Estas variables deben identificarse para cada sistema y sustentar su influencia sobre la variable de interés, con evidencias científicas, disponibilidad de datos históricos sobre éstas y simplicidad en la obtención de nuevos datos.

En pesquerías, un proxy de la abundancia del stock se estima como la captura media de los barcos en un período, o captura por unidad de esfuerzo (CPUE) (Alvarez *et al.*, 2001; GLOBEC, 2001; Silva *et al.*, 2002; Yáñez *et al.*, 2003;). Este proxy es utilizado normalmente como un "índice de la abundancia relativa" del stock. Otros autores han utilizado "la media geométrica de la captura por viaje de un subconjunto de barcos que pescaron durante todos los meses del año.(Eggert *et al.*, 2000).

Otras variables proxies en pesquerías se estiman e identifican examinando su relación con los recursos; por ejemplo, la turbulencia con la sobrevivencia de larvas (Bailey y Macklin 1994). La temperatura también se utiliza como proxy ambiental de la producción de huevos y larvas de peces (Lambert *et al.*, 2003). En otros estudios, la TSM y el índice de surgencia se consideran como variables ambientales potenciales que se pueden utilizar como proxies

para predicciones a corto plazo del reclutamiento (GLOBEC, 2001); además la TSM podría ser relacionado directamente con la abundancia de pequeños pelágicos en el Golfo de Tailandia (Penjan *et al.*, 2000). Cabe señalar que la TSM y vientos (utilizados particularmente para estimar parámetros como turbulencia, surgencia y transporte) fueron seleccionados como proxies con el propósito de realizar estudios comparativos de sistema de borde oriental (Barange *et al.*, 2001). La TSM se considera como la mejor variable física del océano en escalas de tiempo climáticas, ya que está fuertemente correlacionada con la presión atmosférica; por esto, sus variaciones se tratan de acoplar a las variaciones de los ecosistemas (Bakun y Broad, 2001). Por lo tanto, la TSM puede considerarse un buen proxy.

Cuando se analizan variables ambientales con el objeto de explicar las fluctuaciones de los recursos, éstas se están considerando como proxies de dichas fluctuaciones, ya sea de la abundancia o de la distribución. Es importante que estas proxies sean medibles y de fácil comprensión por el usuarios (Degnbol, 2003). La variación de éstas ayuda a comprender conceptualmente el sistema que se estudie, y si el aumento o disminución de un parámetro es normal o no para el sistema (Parrish *et al.*, 2000).

#### 4.4.2. Identificación de variables proxies

Se confeccionan tablas con el listado de variables ambientales involucradas en el análisis de relaciones entre variables ambientales y bio-pesqueras, separadas según el estado de madurez de los recursos (Tabla 20 y 21). Después de analizar dichos resultados, se identifican las variables ambientales de mayor importancia.

En relación con la abundancia del recurso es necesario tener un indicador. Se cuenta con estimaciones de biomasa estimada por hidroacústica (1994-2002) y biomasa estimada por APV (1984-2002), los que se consideran indicadores directos (Kennet *et al.*, 1997). Sin embargo, dichas estimaciones corresponden a periodos relativamente cortos. Por esta razón, es necesario utilizar una variable proxy de la abundancia del recurso. En pesquerías, un proxy muy utilizado de la abundancia es la CPUE; ésta es relativamente económica de obtener, pero también muy cuestionada.

Al respecto, la figura 10 muestra que la tendencia de la CPUE anual de anchoveta resulta opuesta a la biomasa estimada por VPA. Por otra parte, la relación entre la CPUE y la biomasa estimada por el método de producción de huevos (BMPH) indica que existiría un sesgo si se considera la CPUE proporcional a la abundancia. A pesar de ser ampliamente utilizada como un índice de abundancia relativa, este comportamiento contrario indicaría que la CPUE no sería un buen proxy de la abundancia de anchoveta en la zona norte de Chile, descartándola como un proxy de su abundancia. Sin embargo, esto se podría mejorar tomando en cuenta que la relación entre la CPUE y la abundancia podría estar influenciada por el incremento de la vulnerabilidad a la pesca ante escenarios ambientales adversos (Alheit y Ñiquen, 2004), o el efecto de cambios tecnológicos de la flota no del todo considerados en los modelos de estandarización (Punt, 2000).

El desembarque es otra variable y representa la serie pesquera más larga del análisis. En el análisis FOE aplicado a los desembarques y fluctuaciones interdecadales del ambiente, la serie es una de las que mejor se simulan, con una correlación de 0,94 entre la serie observada y la reconstruida (Fig. 31). Por otra parte, los desembarques presentan claras fluctuaciones interdecadales e interanules que podrían estar directamente relacionadas con la abundancia del recursos (Fig. 4a). Luego, se propone el desembarque como proxy de la abundancia de anchoveta en la zona norte de Chile.

Los resultados para la sardina muestran que la tendencia anual de la CPUE se comporta en forma similar a la biomasa estimada por VPA, con una correlación de 0,99. Además se correlaciona positivamente con las estimaciones del desembarque (0,95). Estos resultados nos permiten considerar la CPUE de sardina como un proxy de su abundancia.

Es importante mencionar la relación inversa entre la presencia de sardina y anchoveta, con correlaciones negativas entre los desembarques (Fig. 15), lo que también se observa en la componente estacional. Este comportamiento contrario responde a cambios en las condiciones ambientales, favorables (desfavorables), para una (otra) especie. Luego, las variables ambientales más representativas de estos cambios podrían ser consideradas como proxies de los recursos anchoveta y sardina (Barange *et al.*, 2001).

#### Adultos

El ambiente es un factor importante para explicar las variaciones de los recursos pelágicos (Yáñez *et al.*, 1998): Para evaluar estas variaciones, cuando no se posee información directa, se utilizan variables proxies. Los resultados del objetivo 1 (ver subcapítulo 4.1) y consideraciones del grupo de trabajo SPACC/IOC, Barange (2001), permiten identificar variables proxy de la abundancia de anchoveta y sardina.

El sistema pelágico de la zona norte de Chile se caracteriza por variables ambientales que se modulan en el tiempo y el espacio, tales como: temperatura, salinidad, turbulencia, concentración de nutrientes, velocidad y dirección del viento, entre otras. Las variables consideradas en este estudio corresponden a la temperatura superficial del mar (TSM), clorofila (CLOA), temperatura del aire (TA), nivel medio del mar (NMM), índice de turbulencia (IT) y transporte de Ekman (TE). Cada variable influiría de manera distinta sobre los recursos: en su distribución provocando migraciones verticales y horizontales, y en su abundancia afectando la reproducción, la sobrevivencia larval y el reclutamiento.

Para evaluar los efectos del ambiente en la anchoveta y la sardina se consideran, además de las series temporales de variables ambientales y bio-pesqueras, los resultados de los análisis multivariados en escala interdecadal (Análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (FOE)) y espacial-interanual (Análisis de Componentes Principal (ACP)) como indicadores de la relación entre las variables antes mencionadas.

En el FOE de anchoveta (FOE<sup>1</sup>-AN), con el ambiente definido por los vientos locales (Fig. 30a), la explicación de la variabilidad de la pesquería de anchoveta por las variables ambientales TE e IT es de 65 y 55% respectivamente. En tanto que en el FOE<sup>2</sup>, con el ambiente definido por el forzamiento remoto ecuatorial (Fig. 33), la variabilidad es explicada independientemente por las siguientes variables ambientales: TSM (0,90), Zb (0,93), NMM (0,84), TE (0,84) e IT (0,80). Observando estos resultados, las variables que explican un mayor porcentaje de la variabilidad son la TSM y el Zb (Tabla 20). Las fluctuaciones de estas variables se relacionan con las fluctuaciones del desembarque de anchoveta, observándose dos periodos donde la TSM disminuye y la termoclina es menos

profunda. Por lo tanto, estas dos variables se pueden considerar como proxies de la abundancia de anchoveta en la zona norte de Chile.

Sin embargo, en el análisis sobre la distribución vertical de la anchoveta, la dinámica de la Zb afectaría directamente la posibilidad de que el recurso sea capturado, posibilidad determinada por la naturaleza del arte de pesca y el comportamiento del recurso que tiende a profundizarse y a aumentar su dispersión a medida que la termoclina ecuatorial se profundiza. Esta dinámica afecta directamente la vulnerabilidad del recurso al arte de pesca (Fig. 98). Por lo tanto, el Zb se puede considerar como un proxy de la vulnerabilidad de dicho recurso.

Por otro lado en la escala interdecadal, la TSM refleja variaciones ambientales relacionadas con cambios en la Zb y el NMM; así como con la variación del IT y el TE. Además, los datos de TSM están fácilmente disponibles; por ejemplo, en estaciones costeras (temporales) y en imágenes satélites (espacio-temporales). De lo anterior se desprende entonces que la TSM puede considerarse un proxy de la abundancia de anchoveta .

En relación con la sardina, el análisis  $FOE^1$ -SA (Fig. 30b) indica que la variabilidad de la pesquería es explicada por las variables ambientales TSM (48%) y TE (52%) respectivamente (Tabla 21).

Los resultados del análisis interanual espacio-temporal corresponde al periodo 1987-02 (principalmente periodo frío de largo plazo). Este periodo es favorable a la pesquería de anchoveta, que normalmente disminuye notablemente durante eventos como El Niño 1997-98, caracterizado por altas TSM; bajos niveles de CLOA; profundización de Zb, reflejada en el aumento de la PCM (Fig. 82). En esta escala los periodos fríos afectan positivamente a la pesquería de anchoveta, con las mayores capturas en un ambiente caracterizado por: anomalías de TSM negativas, termoclina somera, vientos favorables a las surgencias y alta productividad. Al caracterizar los periodos cálidos y normales/fríos según las anomalías, podemos considerar la TSM como un proxy de la anchoveta en esta escala (Tabla 20 y 21). La sardina en este periodo también se ve afectada por El Niño, pero en forma positiva, esto se observa en El Niño 1991-1992 (Fig. 85).

#### Reclutamiento

El reclutamiento de anchoveta presenta una la relación inversa con el TE (Fig. 27b), lo mismo que sucede entre la biomasa y el TE (Fig. 27a). El incremento del TE provocaría un aumento en la advección de huevos y larvas lejos de la costa; en tanto que el aumento del IT (relacionado positivamente con el TE), dificultaría las condiciones de alimentación (Cole & McGlade, 1998). Estos dos efectos provocarían una mayor mortalidad de huevos y larvas, y por ende del reclutamiento (Bernal *et al.*, 1983; Santander y Flores, 1983). De acuerdo con éstos resultados, el TE (e IT) podría (n) considerarse como variable (s) proxy (ies) del reclutamiento de anchoveta.

#### Huevos

Claramunt *et al.* (1997) señalan que la TSM y la CLOA serían parámetros relevantes en la distribución de huevos de anchoveta, situándose en zonas de surgencia. La alta productividad de estas zonas favorecen el éxito de los desoves (Chávez *et al.*, 2003). En las cartografías de huevos se destaca la importancia de la zona del río Loa como área de desove. Al comparar estas cartografías con imágenes satelitales de CLOA, se observa una relación positiva (Fig. 51 y 52).

Para la anchoveta del norte de Chile existen diferencias entre rangos de temperatura asociados a los desoves; éstas indican que la temperatura podría ser considerado como un proxy. Sin embargo, el análisis espacial muestra una relación positiva entre la presencia de huevos de anchoveta (HA) y la CLOA, y una relación contraria con la TSM- En efecto, en los años (fríos) posteriores al El Niño 1997-98, se registra un notable aumento en los desoves de anchoveta, con altos niveles de CLOA, explicando la TSM 90% y la CLOA 93% (Tabla 20). Si bien las dos variables caracterizan un ambienta favorable para la producción de huevos, la separación entre clases realizado por el análisis jerárquico muestra que la variable de mayor importancia al separar las clases con mayor número de huevos es la CLOA (Fig. 94). Con respecto al GRT, Oliva *et al.* (2002) señalan que las zonas de desove se asocia a gradientes térmicos; los resultado del presente trabajo indican que el GRT explica 65% del primer componente (Tabla 20). Tomando en cuenta lo anterior

y los estudios realizados por GLOBEC (1999) en California, que indican que sólo la temperatura no es suficiente como una variable proxy para la determinación del área de desove, se puede considerar la CLOA como una variable proxy de la abundancia de huevos de anchoveta.

Tabla 20. Identificación de variables proxies para la abundancia de anchoveta en sus distintas etapas de madurez. Los resultados de la columna de relaciones entre variables ambientales y bio-pesqueras se obtienen de los análisis multivariados en escala interdecadal (FOE<sup>1</sup> y FOE<sup>2</sup>), y espacial-interanual (Análisis de Componentes Principal (ACP)) y las series de tiempo en escala interdecadal.

Abundancia	Escala	Periodo	Variable	Observaciones Objetivo 1	Respuesta del recurso	Relación ambiente/bio-	Proxy
						pesquera	
			TA	Disminuye - aumenta - se mantiene.			TSM
			TSM	Disminuye - aumenta - disminuye.		FOE <sup>2</sup> :0,90	
			NMM	Disminuye - aumenta - disminuye.	Aumento-	FOE <sup>2</sup> :0,84	
Adultos	Interdecadal	1950-2002	IT	Se mantiene - aumenta - disminuye.	disminución-	FOE <sup>2</sup> :0,80	
7 Iduitos	Interdecadar	1750 2002			aumento de los	FOE <sup>1</sup> -AN:0,55	
			TE	Se mantiene - aumenta - disminuye.	desembarques	FOE <sup>2</sup> :0,84	
						FOE <sup>1</sup> -AN:0,65	
			Zb	Se levanta - profundiza - se levanta.		FOE <sup>2</sup> :0,93	
			TA	Comportamiento de TA similar a TSM.	La pesquería de	Fig. 82	TSM
			TSM	La TSM aumento en eventos El Niño.	anchoveta cae	Fig. 82	Zb
Adultos	Interanual	1987-2002	NMM	El NMM disminuye en eventos el Niño.	durante eventos El	Fig. 82	
1 Iuuroo		1907 2002	Zb	Se profundiza con eventos el Niño.	Niño (se recupera	Fig. 82	
					normales/fríos)		
			TE	Relación inversa entre reclutamiento y TE	Desfavorable a la	$R^2 0,63$	TE
Reclutas	Interanual	1984-2002			producción de	, i	
					anchoveta		
			TSM	Relación negativa entre TSM y número de		ACP:-0,91	
				huevos			
					Aumenta la	ACP:-0.65	
Huevos	Interanual	1996-2002	GRT		abundancias de	,	CLOA
			CLOA		huevos y larvas de	A CD: 0.02	-
			CLUA	imágenes CLOA y distribución de huevos	anchoveta	ACP: -0,93	
				inagenes ererry distribution de nuevos			

FOE<sup>1</sup>-AN: f (captura, esfuerzo de pesca, TE e IT) FOE<sup>2</sup>: f (desembarque de anchoveta y sardina, TSM, Zb, NMM) Tabla 21. Identificación de variables proxies para la abundancia de sardina en sus distintas etapas de madurez. Los resultados de la columna de relaciones entre variables ambientales y bio-pesqueras se obtienen de los análisis multivariados en escala interdecadal ( $FOE^1$  y  $FOE^2$ ), y espacial-interanual (Análisis de Componentes Principal (ACP)) y las series de tiempo en escala interdecadal.

Abundancia	Escala	Periodo	Variable	Observaciones Objetivo 1	Respuesta del recurso	Relación	Proxy
		1950-2002	ТА	Disminuye - aumenta - se mantiene	Disminución-		TSM
Adultos	Interdecadal		TSM	Disminuye - aumenta – disminuye	aumento-colapso de la pesquería de	FOE <sup>2</sup> :0,90 FOE <sup>1</sup> -SA:0,48	
			NMM	Disminuye - aumenta – disminuye	sardina en el norte	FOE <sup>2</sup> :0,84	
			IT	Se mantiene - aumenta – disminuye	de Chile (Fig. 17)	FOE <sup>2</sup> :0,80	
			TE	Se mantiene - aumenta - disminuye		FOE <sup>2</sup> :0,84 FOE <sup>1</sup> -SA:0,52	
			Zb	Profundización de la termoclina	Uábitat favorabla	Fig. 82	TSM
Adultos	Inteanual	1097 2002	TA	Comportamiento de TA similar a TSM.	naultat lavolable	Fig. 82	
		1987-2002	TSM	Aumento de la TSM?	para la salulla	Fig. 82	
			NMM	El NMM disminuye en eventos el Niño.		Fig. 82	
Reclutas	Interanual	1984-2002	TE	Aumenta TE y disponibilidad de alimento	Mayor número de reclutas	$R^2 0,80$	TE

FOE<sup>1</sup>-SA: f (reclutamiento, biomasa, TSM y TE) FOE<sup>2</sup>: f (desembarque de anchoveta y sardina, TSM, Zb, NMM)

# 4.5. Diseñar indicadores que integren las componentes oceanográficas, biológicas y pesqueras orientadas a apoyar la toma de decisiones de administración pesquera de los recursos pelágicos en la zona norte de Chile (Objetivo específico 5).

### 4.5.1. Antecedentes bibliográficos

La idea de utilizar indicadores en el manejo de pesquerías nace de las teorías que incluyen los efectos del ecosistema en las pesquerías y de las pesquerías en los ecosistemas. El desarrollo de indicadores y puntos de referencia bajo el enfoque ecosistémico en pesquerías es un área activa de investigación. En la actualidad existen una serie de organizaciones abordando el tema "Indicadores ecosistémicos para el manejo pesquero", ya sea desde el punto de vista de la investigación, como del manejo operacional.

Al respecto, FAO (1999) y García *et al.* (2000) publican las orientaciones técnicas para el diseño de indicadores necesarios para el desarrollo sostenible de pesquerías. En el 2000 se forma el grupo GLOBEC-SPACC/IOC que desarrolla el tema del uso de índices ambientales en el manejo de poblaciones de peces pelágicos (Barange, 2001). Por otro lado, en 2001 se crea el grupo de trabajo SCOR/IOC 119 dedicado al estudio de indicadores ecosistémicos cuantitativos para el manejo de pesquerías (Cury y Christensen, 2001). Estos grupos se dedican a desarrollar teorías para evaluar cambios en ecosistemas marinos, desde perspectivas ambientales, ecológicas y pesqueras.

En la zona norte de Chile se han utilizado indicadores ambientales retrospectivos para evaluar su efecto en la abundancia y distribución de recursos pelágicos, tales como anchoveta, sardina y jurel. Dentro de los indicadores ambientales están: temperatura superficial del mar (TSM), índice de surgencia (IS), índice de turbulencia (IT), nivel del mar (NMM), temperatura del aire (TA), índice de la Oscilación del Sur (IOS) y concentración de clorofila (Bernal *et al.*, 1983; Yáñez y Barbieri, 1988; Yáñez *et al.*, 1994; Barbieri *et al.*, 1995; Serra *et al.*, 1998); Yáñez *et al.*, 1998, 2001; Nieto *et al.*, 2001; Yáñez *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2002; Yáñez *et al.*, 2003).

#### 4.5.2. Diseño de indicadores ecosistémicos

Una primera etapa en el diseño de indicadores ecosistémicos, para la administración de las pesquerías pelágicas de la zona norte, fue la creación de diferentes elementos necesarios para el desarrollo e implementación de éstos. A continuación se detallan los elementos generados:

a) *Objetivos sociales*. Necesidades de toma de decisiones en la administración pesquera de recursos pelágicos de la zona norte de Chile.

*b) Modelo conceptual tiempo-dependiente*. Se usa como base el modelo conceptual explicativo desarrollado en el Objetivo específico 4, el cual describe la variabilidad espacio-temporal del ambiente y la dinámica de poblaciones de recursos pelágicos en la zona norte de Chile. El modelo conceptual se basa en las relaciones ambiente–recursos descritas y formuladas en los Objetivos específicos 1 y 3 de este proyecto. El modelo conceptual describe los efectos del ambiente en los indicadores de abundancia y disponibilidad de los recursos.

*c) Múltiples dimensiones.* Se incorporan múltiples dimensiones en el sistema, incluyendo indicadores que para este caso corresponden a las principales especies de recursos pelágicos (anchoveta, sardina y jurel) de la zona norte de Chile.

*d) Incorporar la variabilidad*. Se incorpora la variabilidad en el modelo conceptual y por lo tanto en el sistema. De este modo, la variabilidad de los indicadores ecosistémicos se describe en diferentes escalas temporales (decadal, interanual, estacional e intraestacional) y espaciales (Océano Pacífico, Pacífico Sudeste, Zona Norte y locales).

*e) Datos de programas de monitoreo*. Para establecer las relaciones ambiente-recursos necesarias para desarrollar el modelo conceptual y diseño de indicadores, se utilizaron los datos disponibles de programas de monitoreo, tanto de las pesquerías pelágicas como del ambiente marino. Estos datos de monitoreo provienen de diferentes fuentes, tales como: Dirección Metereológica de Chile, Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada,

Subsecretaria de Pesca, Fondo de Investigación Pesquera, Servicio Nacional de Pesca, Empresa CORPESCA S.A., Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Universidad de Concepción, International Research Institute y NOAA.

*f) Marco para la implementación de los indicadores*. La información debe ser sintetizada para una presentación clara y convincente a la administración pesquera (Schiller *et al.,* 2000). Se pueden seguir distintas orientaciones; no obstante, para este proyecto se aplica el enfoque del Sistema de Referencia para el Desarrollo Sustentable (SRDS), propuesto por FAO (1999). Debido a la gran cantidad de indicadores (que se utilizan y que podrían utilizarse), se requiere construir un sistema para elaborar, organizar y utilizar un conjunto de indicadores, con el fin de seguir los progresos con respecto al desarrollo sostenible (FAO, 1999).

# 4.5.2.1. SRDS para las pesquerías pelágicas de la zona norte de Chile

La estructura y ámbito del SRDS depende del tamaño y complejidad del sistema al que se va aplicar, así como de los usos y usuarios a los que se destina la información. En este caso, el sistema corresponde a las principales pesquerías pelágicas (anchoveta, sardina y jurel) de la zona norte de Chile (I y II Región), las que se ven afectadas por las condiciones ambientales imperantes en el ecosistema. La finalidad general del SRDS es contar con una herramienta de apoyo para la toma de decisiones de administración pesquera de los recursos pelágicos y zona en cuestión. El usuario del SRDS corresponde a la Subsecretaría de Pesca, institución responsable de la administración pesquera en Chile. Uno de los temas que han de afrontarse y considerar en la elaboración del SRDS, es la alta variabilidad del ambiente y de los recursos, que se manifiestan en las distintas escalas espaciales (Océano Pacífico, Pacífico Sureste, zona, localidad) y temporales (interdecadal, interanual, estacional, intraestacional, diaria-semanal).

Se opta por un marco o estructura para seleccionar y organizar los indicadores y puntos de referencia. El marco se basa en un conjunto de dimensiones que resaltan las necesidades y finalidades del SRDS. Se definen las dimensiones del SRDS, para visualizar los efectos del

medio ambiente sobre los recursos pesqueros. Se consideran las dimensiones biológicas, pesqueras, medio ambientales e institucionales.

Se definen los criterios, que son componentes del SRDS, cuyo comportamiento puede describirse por medio de indicadores y puntos de referencia. Estos están determinados por las dimensiones del marco y, dentro de cada dimensión, se definen varios para la selección de objetivos, indicadores y puntos de referencia. De este modo se definen los objetivos de los criterios de cada dimensión (Tabla 22), para luego identificar los correspondientes indicadores y puntos de referencia. En este caso, los objetivos se formulan basándose en los Términos Básicos de Referencia del Proyecto.

Dimensión	Criterios	Objetivos
Biológica	Abundancia de especies	Caracterizar la distribución y abundancia de los
	objetivo.	recursos pelágicos pequeños y/o de sus estadios
		tempranos de desarrollo.
Pesquera	Capacidad de captura.	Caracterizar el esfuerzo de pesca.
Ambiental	Dinámica ambiental.	Describir la dinámica del ambiente oceánico de la zona norte de Chile identificando cambios de régimen, cambios decadales, interanuales estacionales e intra-estacionales.
	Efectos del ambiente en	Describir las relaciones entre la dinámica
	los recursos.	ambiental y la abundancia de los recursos pelágicos.
Institucional de Gobierno	Régimen de aplicación de medidas de administración pesquera.	<ul> <li>Evaluar la aplicación de vedas extractivas</li> <li>Robustecer una línea de investigación bio- oceanográfica y su aplicabilidad directa en la fundamentación de medidas de administración.</li> <li>Apoyar la toma de decisiones en la administración pesquera, con el uso de indicadores que integren las componentes oceanográficas, biológicas y pesqueras.</li> </ul>
	Derechos de propiedad.	Evaluar la aplicación de cuotas individuales transferibles.

Tabla 22. Objetivos de los criterios del SRDS.

Para identificar y cuantificar los indicadores ecosistémicos apropiados para el manejo sustentable de las pesquerías pelágicas de la zona norte, se utiliza como base el modelo conceptual integrado (Fig. 115), el cual describe las relaciones espacio-temporales entre el ambiente y los recursos. El modelo conceptual integrado describe los efectos del ambiente en los indicadores de abundancia y disponibilidad de los recursos.

#### 4.5.2.2. Indicadores ecosistémicos en la escala interdecadal

De acuerdo con el modelo conceptual desarrollado, en la escala interdecadal se observan tres períodos en el período 1950–2002, asociados a dos cambios de régimen. El primer cambio de régimen se observa a mediados de la década del 70, cuyo proceso físico se habría iniciado con el evento El Niño 1972-73. En este cambio de régimen se pasa de una fase interdecadal caracterizada por un ambiente frío a un período de largo plazo cálido. El segundo cambio de régimen representa la transición de un ambiente cálido a uno frío, el cual se establece a inicios de los 90, pero cuyo proceso físico habría comenzado a mediados de los 80. Estos cambios de régimen se asocian a una sustitución de especies o alternancia entre anchoveta y sardina; en los períodos de largo plazo fríos domina la anchoveta, mientras que durante las fases cálidas lo hace la sardina.

Para la anchoveta los indicadores ecosistémicos y puntos de referencia fueron calculados para el período de estudio (1957-2002), como también para los dos períodos de largo plazo (1957-71 y 1986-2002) que le son favorables y para el período desfavorable (1972-85). Debido a que la anchoveta es una especie de vida corta, cuya abundancia y disponibilidad disminuye rápidamente debido a la presencia de condiciones ambientales desfavorables, se considera que el período negativo para esta pesquería se inicia cuando comienza el proceso físico asociado al evento El Niño 1972-73; mientras que la fase fría favorable se inicia cuando empieza el proceso a mediados de los 80. En efecto, a partir de 1972 y hasta 1985 los desembarques anuales de anchoveta son menores al promedio de largo plazo equivalente a 558.042 t (Tabla 23).

Essals Internet			Puntos de Referencia											
Escala Interd	lecadal	1957-	-2002	1957	-1971	1972	-1985	1986-2002						
Criterio	Indicador	Media	DS	Media	DS	Media	DS	Media	DS					
Abundancia de anchoveta	DES-AN	558.042	537.718	396.766	385.011	171.526	144.367	1.066.087	522.617					
	RECL-AN							84	33					
	BIOM-AN							135	57					
	CPUE-AN	103	57	155	64	63	30	90	28					
Capacidad de captura	ESF-AN	1.156	878	894	624	632	396	1.820	963					
Dinámica ambiental	TA-est	16,48	0,57	16,22	0,43	16,58	0,72	16,72	0,48					
	IT-est	130,7	41,7	96,5	23,9	171,8	30,0	141,1	31,1					
	TE-est	0,57	0,14	0,47	0,10	0,70	0,12	0,61	0,09					
	IOS	-0,12	0,72	0,06	0,64	-0,17	0,76	-0,33	0,78					
	TSM-est	17,46	0,58	17,22	0,35	17,83	0,73	17,45	0,55					
	Zb	-2,27	11,89	2,95	10,80	-3,45	15,18	-6,52	7,88					
	NMM-est	0,71	0,04	0,72	0,04	0,72	0,04	0,70	0,03					
Ambiente - recursos	FOE-AN	0,002	2,30	0,85	0,96	-2,49	1,69	1,30	1,98					

Tabla 23. Criterios, indicadores y puntos de referencia bio-pesqueros de anchoveta y del ambiente en la escala interdecadal.

El primer período (1957-71) favorable a la pesquería de anchoveta presentó desembarques, CPUE y esfuerzos de pesca promedios de 396.766 t, 155 t/vcp y 894 vcp respectivamente. Cabe destacar que durante este período el desembarque promedio es menor al desembarque medio de largo plazo, debido a que en esta fase se inicia la pesquería con un numero menor de embarcaciones y tecnología menos avanzada. Al comparar los puntos de referencia de los indicadores ecosistémicos de esta fase fría con los del período de largo plazo, podemos afirmar que éste se caracteriza por un ambiente más frío (TA = 16,2°C; TSM = 17,2°C; IOS = 0,06) que el promedio (TA = 16,5°C; TSM = 17,5°C; IOS = -0,12), una termoclina somera (Zb = 2,95) y vientos moderados (IT = 96,45 y TE = 0,47). Para describir los efectos de la variabilidad de largo plazo del ambiente y la pesquería de anchoveta, se diseñó el indicador multivariado FOE-AN, que integra variables bio-pesqueras (desembarques y esfuerzos de pesca) y ambientales (IT y TE). Durante este primer período favorable a la pesquería de anchoveta, el indicador multivariado FOE-AN presentó un valor medio positivo (+0,9) y mayor al FOE-AN medio de largo plazo (+0,002).

El segundo período (1972-85) es desfavorable para la pesquería de anchoveta, por el bajo nivel medio del desembarque (171.526 t), CPUE (63 t/vcp) y esfuerzo de pesca (632 vcp). Durante este período el ambiente es comparativamente cálido (TA =  $16,6^{\circ}$ C; TSM =  $17,8^{\circ}$ C; IOS = -0,17), el NMM = 0,72 y la termoclina se profundiza (Zb = -3,45); mientras

que los vientos locales aumentaron considerablemente, alcanzando el IT y TE valores medios de 172 y 0,7 respectivamente. El efecto negativo del ambiente sobre la pesquería de anchoveta durante este período cálido se evidencia en el indicador multivariado FOE-AN, el cual presentó un valor medio negativo (-2,5).

El tercer período (1986-2002) vuelve a ser favorable a la anchoveta, lo cual se evidencia en los altos niveles medios de los siguientes indicadores de abundancia: desembarque (DES-AN = 1.066.087 t), biomasa (BIOM-AN =  $135*10^5$  t), reclutamiento (RECL-AN =  $84*10^7$  ind) y captura por unidad de esfuerzo (CPUE = 90 t/vcp). Además, aumenta notablemente la capacidad de captura de la flota, registrándose el mayor nivel medio de esfuerzo de pesca (ESF-AN = 1820 vcp). Aunque la TA no tiende a recuperar los niveles fríos, las características ambientales tienden a una condición fría. La TSM media del período es igual a  $17,5^{\circ}$ C, siendo igual a la TSM media de largo plazo. Por otro lado, los vientos locales (IT = 141,1 y TE = 0,61) y el nivel del mar (NMM = 0,7) tienden a disminuir. El efecto positivo del ambiente sobre la pesquería de anchoveta durante este período frío se evidencia en el indicador multivariado FOE-AN, el cual presentó un valor medio positivo (+1,3).

Para la sardina los indicadores ecosistémicos y puntos de referencia fueron calculados para todo el período (1957-2002), como así también para el período de largo plazo favorable (1977-92) y períodos desfavorables (1957-76 y 1993-2002). La sardina es una especie de vida bastante más larga que la anchoveta, cuya abundancia y disponibilidad disminuye más lentamente debido a la presencia de condiciones ambientales desfavorables. Se considera entonces que el período positivo para esta pesquería se inicia cuando se produce el cambio de régimen (es decir después de 1976) y no necesariamente cuando comienza el proceso físico-biológico. De igual forma, se considera que el término del período favorable para esta pesquería se produce junto con el cambio de régimen a inicios de la década del 90. En efecto, a partir de 1977 y hasta 1992 los desembarques anuales de sardina son mayores al promedio de largo plazo equivalente a 583.985 t (Tabla 24).

El primer período (1957-76) desfavorable a la pesquería de sardina presentó desembarques y esfuerzos de pesca promedios de 36.492 t y 2.437 vcp respectivamente. Estos valores son bastante menores al desembarque medio de largo plazo. Al comparar los puntos de

referencia de los indicadores ecosistémicos de esta fase fría, con los del período de largo plazo, podemos afirmar que éste se caracteriza por un ambiente más frío (TA = 16,2°C, TSM = 17,2°C; IOS = 0,13), una termoclina somera (Zb = 4,54) y vientos moderados (IT = 107,3 y TE = 0,49). Para describir los efectos de la variabilidad de largo plazo del ambiente y la pesquería de sardina, se diseñó el indicador multivariado FOE-SA, el cual integra la biomasa y el reclutamiento del recursos, la TSM y el TE. Durante este período desfavorable a la pesquería de sardina, el indicador multivariado FOE-SA presentó un valor medio negativo (-0,9) y menor al FOE-SA medio de largo plazo (+0,77).

Essala Inter		Puntos de Referencia											
Escala Intel	raecadai	1957-	-2002	1957-	1976	1977-	1992	1993-2002					
Criterio	Indicador	Media	DS	Media	DS	Media	DS	Media	DS				
Abundancia de sardina	DES-SA	583.985	842.026	36.492	75.109	1.563.119	734.239	112.359	130.399				
	RECL-SA					23	17	1	1				
	BIOM-SA					2.986	1.610	38	29				
	CPUE-SA					135	31	36	21				
Capacidad de captura	ESF-SA	6.666	4.890	2.437	1.289	10.553	3.134	2.139	1.596				
Dinámica ambiental	TA-est	16,48	0,57	16,18	0,44	16,85	0,50	16,69	0,59				
	IT-est	130,7	41,7	107,3	33,9	174,7	21,1	123,4	29,2				
	TE-est	0,57	0,14	0,49	0,11	0,73	0,07	0,54	0,05				
	IOS	-0,12	0,72	0,13	0,67	-0,47	0,66	-0,26	0,75				
	TSM-est	17,46	0,58	17,22	0,35	17,85	0,64	17,45	0,69				
	Zb	-2,27	11,89	4,54	11,15	-8,44	11,69	-7,38	3,24				
	NMM-est	0,71	0,04	0,72	0,04	0,72	0,04	0,69	0,03				
Ambiente - recursos	FOE-SA	0,76	2,51	-0,89	1,84	1,71	2,14	-2,61	0,27				

Tabla 24. Criterios, indicadores y puntos de referencia bio-pesqueros de sardina y del ambiente en la escala decadal.

El segundo período (1977-92) es favorable a la sardina, lo cual se evidencia en los altos niveles medios de los indicadores de abundancia de este recurso: desembarque (DES-SA = 1.563.119 t), biomasa (BIOM-SA =  $2.985*10^3$  t), reclutamiento (RECL-SA =  $23*10^6$  ind) y captura por unidad de esfuerzo (CPUE-SA = 135 t/vcp). Además, se observó un considerable aumento en la capacidad de captura, registrándose el mayor nivel medio de esfuerzo de pesca (ESF-SA = 10.553 vcp). En este período, el ambiente es comparativamente cálido (TA =  $16,9^{\circ}$ C, TSM =  $17,9^{\circ}$ C; IOS = -0,47), el nivel del mar es mayor (NMM = 0,72) y la termoclina se profundiza (Zb = -8,4); en tanto que los vientos aumentan considerablemente (IT = 174,7 y TE = 0,73), alcanzando los máximos valores del período de estudio. El efecto positivo del ambiente sobre la pesquería de sardina durante

este período cálido se evidencia en el indicador multivariado FOE-SA, el cual presentó un valor medio positivo (+1,71).

El tercer período (1993-2002) vuelve a ser desfavorable a la pesquería de sardina, lo cual se evidencia en los bajos niveles medios de los siguientes indicadores de abundancia: (DES-SA = 112.359 t), biomasa (BIOM-SA =  $38*10^3$  t), reclutamiento (RECL-SA =  $0,65*10^6$  ind) y captura por unidad de esfuerzo (CPUE-SA = 36 t/vcp). Durante este período el esfuerzo de pesca promedio (ESF-SA = 2.139 vcp) fue bastante menor al promedio de largo plazo. Aunque la TA no tiende a recuperar los niveles fríos, las características ambientales tienden a una condición fría. La TSM media del período es igual a  $17,5^{\circ}$ C, siendo igual a la TSM media de largo plazo. Por otro lado, los vientos locales (IT = 123,5 y TE = 0,54) y el nivel del mar (NMM = 0,7) tienden a disminuir. El efecto negativo del ambiente sobre la pesquería de sardina durante este período frío se evidencia en el indicador multivariado FOE-SA, el cual presentó un valor medio negativo (-2,6).

#### 4.5.2.3. Indicadores ecosistémicos en la escala interanual

De acuerdo con el modelo conceptual adaptado, en la escala interanual se observan significativos cambios en el ambiente y los recursos, producidos por los eventos El Niño que generan un calentamiento anómalo del área marina. En efecto, durante los eventos El Niño la temperatura es bastante alta en el Ecuador (Niño 1-2 y Niño 3-4) y en la zona de estudio (TSM y TA); el NMM aumenta, al igual que el IT y TE; en tanto que el IOS disminuye y la Zb se profundiza. Los efectos de estos eventos sobre las pesquerías de anchoveta y sardina dependerán del período de largo plazo en que se generan.

Durante el período (1972-85), desfavorable a la anchoveta, no existen diferencias significativas en los efectos de los años El Niño y normal/La Niña sobre la abundancia (Tabla 25). Los niveles medios de los indicadores de abundancias (desembarques y CPUE) de anchoveta se mantuvieron bajos durante este período, independiente de si era un año El Niño (DES-AN = 173.783 t y CPUE = 59 t/vcp) o normal/La Niña (DES-AN = 169.834 t y CPUE = 66 t/vcp). Sin embargo, se encuentran diferencias en las variables ambientales; durante los eventos El Niño de este período se registran los mayores valores de los indicadores ambientales (TA = 16,9°C; TSM = 18,1°C; IT = 176,19; TE = 0,71; NMM =

0,73 m; IOS = -0,6); mientras que la termoclina (Zb = -8,15) se profundiza. También se registran altos valores en los índices El Niño (Niño1-2 = 23,9°C; Niño3-4 = 27,4°C). Los eventos El Niño amplifican sus efectos si estos se desarrollan durante períodos cálidos de largo plazo.

Tabla 25. Criterios, indicadores y puntos de referencia bio-pesqueros de anchoveta y del ambiente en la escala interanual.

							Puntos de Re	ferencia						
Escala Inter	anual	1957-2002			1972-1985				1986-2002					
		Normal/La Niña*		El Ni	El Niño**		Normal/La Niña		El Niño		Normal/La Niña		El Niño	
Criterio	Indicador	Media	DS	Media	DS	Media	DS	Media	DS	Media	DS	Media	DS	
Abundancia de anchoveta	DES-AN	739.079	558.972	391.743	402.926	169.834	130.335	173.783	174.345	1.214.839	459.929	709.081	533.942	
	RECL-AN									78	34	97	28	
	BIOM-AN									135	63	135	47	
	CPUE-AN	109	58	91	55	66	28	59	36	95	28	78	24	
	Huevos-AN									2.701	3.043	201	228	
Capacidad de captura	ESF-AN	1.342	934	808	656	787	377	425	344	2.008	1.022	1.369	688	
Dinámica ambiental	TA-est	16,32	0,39	16,94	0,65	16,34	0,52	16,91	0,86	16,49	0,18	17,27	0,57	
	IT-est	137,1	35,1	144,8	39,3	168,6	25,2	176,2	37,5	143,0	31,1	136,7	34,4	
	TE-est	0,60	0,11	0,62	0,12	0,69	0,11	0,71	0,13	0,61	0,09	0,60	0,10	
	IOS	0,10	0,59	-0,72	0,55	0,15	0,62	-0,60	0,75	-0,05	0,71	-1,02	0,45	
	TSM-est	17,28	0,47	17,84	0,67	17,64	0,59	18,08	0,89	17,24	0,39	17,97	0,55	
	Zb	0,32	11,37	-6,57	12,34	0,08	12,66	-8,15	18,11	-4,16	8,22	-12,20	2,33	
	NMM-est	0,70	0,03	0,73	0,05	0,71	0,02	0,73	0,06	0,69	0,03	0,71	0,04	
	Niño 1+2-boy	22,62	0,42	24,00	0,88	22,69	0,48	23,90	1,10	22,71	0,43	24,37	0,95	
	Niño 3+4-boy	26,69	0,50	27,55	0,51	26,58	0,46	27,35	0,61	26,78	0,64	27,78	0,59	
Ambiente - recursos	FOE-AN	0,43	2,28	-0,80	2,20	-2,39	1,60	-2,62	1,95	1,67	1,81	0,41	2,30	

\* Años Normal/La Niña \*\* Años El Niño

Durante el período (1986-2002) de largo plazo favorable para la pesquería de anchoveta, se observan diferencias significativas en los efectos de los años El Niño y normales/La Niña sobre la abundancia de anchoveta (Tabla 25). Durante los años El Niño del período, los niveles medios de los indicadores de abundancias (DES-AN = 709.081 t; CPUE-AN = 78 t/vcp; Huevos-AN = 201) fueron considerablemente menores a los registrados en los años normales/La Niña (DES-AN = 1.214.839 t; CPUE-AN = 95 t/vcp; Huevos-AN = 2701). Esta disminución también se refleja en el indicador del esfuerzo de pesca (ESF-AN). Sin embargo, la biomasa media (BIOM-AN =  $135*10^5$  t) no presenta diferencias entre un evento cálido y uno frío; mientras que el reclutamiento aumenta durante los eventos El Niño.

Los puntos de referencia de los indicadores de la dinámica ambiental presentan diferencias durante años El Niño y normales/La Niña. Durante El Niño se registran mayores valores en la mayoría de los indicadores ambientales (TA =  $17,3^{\circ}$ C; TSM =  $18^{\circ}$ C; IT = 136,7; TE = 0,6; NMM = 0,71 m; Niño 1-2; Niño 3-4, IOS = -1,02); la termoclina está más profunda;

<sup>1959, 60, 61, 62, 64, 66, 67, 68, 70, 71, 74, 75, 78, 79, 80, 81, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 93, 94, 95, 96, 99, 00, 01, 02</sup> 1957, 58, 63, 65, 69, 72, 73, 76, 77, 82, 83, 87, 91, 92, 97, 98

151

mientras que los vientos (IT y TE) no sufren variaciones significativas. El indicador multivariado FOE-AN, que integra la variabilidad ambiental y de los recursos, es considerablemente mayor durante los años normales/La Niña (FOE-AN = 1,67) que en El Niño (FOE-AN = 0,41).

Los efectos de los eventos El Niño sobre la pesquería de sardina dependen del período de largo plazo en el cual se encuentra. Durante el período (1977-92), de características cálidas y favorables a la pesquería, existen ciertas diferencias en los efectos de los años El Niño y normales/La Niña sobre la abundancia del recurso (Tabla 26). Los altos niveles del esfuerzo de pesca (ESF-SA), desembarque (DES-SA), reclutamiento (RECL-SA), biomasa (BIOM-SA) y CPUE alcanzados durante este período, se relacionan más bien con el establecimiento de una fase cálida de largo plazo que con los eventos El Niño. Los niveles medios de los indicadores de abundancia de sardina son menores en los años El Niño (DES-SA = 1.393.292 t; RECL-SA =  $24*10^6$  ind; BIOM-SA =  $2.478*10^3$  t; CPUE-SA = 120), que en los años normales/La Niña (DES-SA = 1.665.015 t; RECL-SA =  $25 \ 10^6$  ind; BIOM-SA =  $3.291*10^3$  t; CPUE-SA = 144). En tanto se encuentran diferencias en algunas variables ambientales. Durante los eventos El Niño de este período se registran mayores valores de temperatura (TA =  $17,3^{\circ}$ C; TSM =  $18,2^{\circ}$ C; Niño $1-2 = 24^{\circ}$ C; Niño $3-4 = 27,8^{\circ}$ C); el IOS es negativo (-1,18) y el NMM = 0,74; mientras que la termoclina (Zb = -17,2 m) se profundiza. En años normales/La Niña se registran menores valores de temperaturas (TA =  $16,6^{\circ}$ C, TSM = 17,7°C; Niño1-2 = 22,8°C; Niño 3-4 = 26,7°C); el IOS = -0,04; NMM = 0,71; y Zb (-3,2 m) es más somera. Sin embargo, no se registran diferencias significativas en los índices de vientos al comparar los años El Niño con los normales/La Niña, manteniéndose los valores del IT y TE cercanos a los 175 y 0,73 respectivamente. El indicador multivariado de la sardina es mayor durante los años normales/La Niña (FOE-SA = 1,81), que durante El Niño (FOE-SA = 1,54).

Durante el período (1993-2002), de características frías y desfavorables para la pesquería de sardina, se observa una notable disminución en los indicadores de abundancia al compararlos con el período favorable de 1977-92 (Tabla 26). Durante los años El Niño del período se registran menores niveles medios de abundancias (DES-SA = 17.922 t y CPUE-SA = 24 t/vcp), que los obtenidos en los años normales/Fríos (DES-SA = 135.968 t y
CPUE-SA = 39,3 t/vcp). Esta disminución también se refleja en el indicador esfuerzo de pesca (ESF-SA). Sin embargo, el reclutamiento y biomasa media aumentaron durante los eventos El Niño. Los indicadores de la dinámica ambiental presentan diferencias durante años El Niño y normales/La Niña. Durante los El Niño se registran mayores TA, TSM, NMM, Niño 1-2 y Niño 3-4, la termoclina está más profunda, mientras que el IT y TE disminuyen.

Escala Interanual		Puntos de Referencia											
		1957-2002				1977-1992				1993-2002			
		Normal/La Niña*		El Niño**		Normal/La Niña*		El Niño**		Normal/La Niña*		El Niño**	
Criterio	Indicador	Media	DS	Media	DS	Media	DS	Media	DS	Media	DS	Media	DS
Abundancia de sardina	DES-SA	603.902	855.285	546.643	842.902	1.665.015	674.955	1.393.292	861.355	135.968	136.643	17.922	6.346
ł	RECL-SA					25	14	24	22	0	0	2	1
	BIOM-SA					3.291	1.552	2.478	1.716	31	29	63	16
	CPUE-SA					144	28	120	32	39	22	24	13
Capacidad de captura	ESF-SA					10.745	2.530	10.233	4.213	2.542	1.525	524	353
Dinámica ambiental	TA-est	16,32	0,39	16,94	0,65	16,58	0,24	17,28	0,53	16,45	0,17	17,66	0,79
	IT-est	137,1	35,1	144,8	39,3	175,0	11,7	174,3	33,0	129,5	29,7	99,2	2,7
	TE-est	0,60	0,11	0,62	0,12	0,74	0,04	0,72	0,10	0,55	0,04	0,49	0,04
	IOS	0,10	0,59	-0,72	0,55	-0,04	0,39	-1,18	0,21	-0,15	0,78	-0,69	0,55
	TSM-est	17,28	0,47	17,84	0,67	17,67	0,46	18,17	0,81	17,19	0,45	18,46	0,55
	Zb	0,32	11,37	-6,57	12,34	-3,17	10,60	-17,22	7,71	-6,24	2,46	-11,95	0,40
	NMM-est	0,70	0,03	0,73	0,05	0,71	0,03	0,74	0,05	0,69	0,03	0,70	0,05
	Niño 1+2-boy	22,62	0,42	24,00	0,88	22,75	0,41	23,96	0,91	22,75	0,49	25,29	0,52
	Niño 3+4-boy	26,69	0,50	27,55	0,51	26,71	0,47	27,79	0,37	26,85	0,66	27,59	0,98
Ambiente - recursos	FOE-SA					1,81	2,04	1,54	2,49	-0,98	0,27		

Tabla 26. Criterios, indicadores y puntos de referencia bio-pesqueros de sardina y del ambiente en la escala interanual.

\* Años Normal/La Niña \*\* Años El Niño 1959, 60, 61, 62, 64, 66, 67, 68, 70, 71, 74, 75, 78, 79, 80, 81, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 93, 94, 95, 96, 99, 00, 01, 02 1957, 58, 63, 65, 69, 72, 73, 76, 77, 82, 83, 87, 91, 92, 97, 98

#### 4.5.2.4. Indicadores ecosistémicos en la escala estacional

Los indicadores y puntos de referencia bio-pesqueros y ambientales, de las pesquerías de anchoveta y sardina en la escala estacional, se diseñaron y cuantificaron con la base datos ambiente-recurso georreferenciada del período 1987-2002. Los puntos de referencia corresponden a los valores promedio de las variables por estación para años El Niño y normales/La Niña.

Durante los años normales/La Niña la anchoveta registra un considerable aumento en los niveles medios del desembarque de verano (DES-AN = 105.544 t), invierno (DES-AN = 68.853 t) y primavera (DES-AN = 90.231 t), comparado con los niveles durante los eventos El Niño (verano DES-AN = 80.075 t; invierno DES-AN = 49.235 t; primavera DES-AN = 26.904 t) (Tabla 27). Sin embargo, en otoño de años El Niño se registran mayores niveles medios de desembarque (DES-AN = 117.424 t), que durante los años normales/La Niña

153

(DES-AN = 104.911 t). Por otro lado, los rendimientos de pesca (CPUE-AN) aumentan durante verano, otoño e invierno de los años El Niño, lo que coincide con el acercamiento a la costa del recurso, reflejado en los menores valores medios de la DC registrados durante la ocurrencia de dichos eventos cálidos.

En verano, otoño, invierno y primavera de los años El Niño la anchoveta es capturada en TSM 1,1-2°C mayores que las registradas en años normales/La Niña (Tabla 27). En ambos escenarios ambientales la TSM tiene una marcada estacionalidad, siendo alta en verano con una tendencia a la disminución en otoño, para alcanzar los niveles más bajos en invierno y tender a recuperarse en primavera. Los gradientes en los cuales se captura la anchoveta son mayores en primavera-verano-otoño y menores en invierno. Estos GRT son levemente mayores durante verano y otoño de los años normales/La Niña; mientras que éstos son mayores durante invierno y primavera de los años El Niño. Los altos GRT de verano, otoño y primavera coinciden con altos valores de clorofila; mientras que los mínimos valores de estos indicadores de frentes térmicos y productividad se registran invierno. En verano, otoño y primavera de los años normales/La Niña, las altas capturas de anchoveta son realizadas en niveles de clorofila considerablemente mayores que los registrados durante los eventos El Niño. En condiciones normales/La Niña, los máximos valores de desembarques (DES-AN = 105.544 t) y CPUE de anchoveta se obtienen en verano en aguas cercanas a la costa (DC = 19.3 mn) y asociadas a las máximas temperaturas superficiales (TSM = 20,8°C), gradientes (GRT = 1,4 °C/10mn) y clorofila (4,3 mg/m<sup>3</sup>) como indicador de productividad. En otoño hay una tendencia a disminuir de los desembarques, rendimientos de pesca, temperaturas, gradientes y clorofila, y un alejamiento de la costa de las capturas. En invierno se obtienen los mínimos valores de abundancias (DES-AN = 68.853 t) y máximas distancias a la costa (DC = 30,8 mn) de las capturas, asociados a mínimas temperaturas (TSM =  $16,8^{\circ}$ C), gradientes (GRT =  $0,6^{\circ}$ C/10mn) y clorofila (1,6  $mg/m^3$ ).

Escala Estacional		Puntos de Referencia 1987-2002										
		Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Invierno	Primavera			
		Criterio	Indicador	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media
Abundancia de anchoveta	DES-AN	88.330	105.544	104.911	68.853	90.231	80.075	117.424	49.235	26.904		
	CPUE-AN	28	38	25	24	24	41	31	31	20		
Dinámica ambiental	TSM-sat	19,20	20,84	18,91	16,83	19,19	22,00	20,98	18,24	21,15		
	GRT-sat	1,02	1,35	1,08	0,60	1,04	1,33	1,03	0,90	1,16		
	DC	25,8	19,3	26,1	30,7	27,3	18,5	22,3	22,0	21,8		
	CLOA-sat	2,56	4,26	2,43	1,63	2,50	0,73	1,09	1,74	1,66		
* Años Normal/La Niña	1988, 89, 90, 91,	93, 94, 95, 96,	99, 00, 01, 02	2								

Tabla 27. Criterios, indicadores y puntos de referencia bio-pesqueros de anchoveta y del ambiente en la escala estacional.

\*\* Años El Niño 1987, 92, 97, 98

El período estudiado (1987-2002) corresponde principalmente a una fase de largo plazo de características frías favorables a anchoveta; no obstante, desde 1987 a 1992 se encuentran abundancias moderadas de sardina y posteriormente se mantienen niveles mínimos. Durante los años normales/La Niña (verano DES-AN = 42.674 t; otoño DES-AN = 23.867 t; invierno DES-AN = 24.503 t; primavera DES-AN = 52.838 t) y a escala estacional, la sardina registra menores valores en los indicadores de abundancias en años El Niño (verano DES-AN = 49.205 t; otoño DES-AN = 72.609 t; invierno DES-AN = 28.282 t; primavera DES-AN = 61.741 t) (Tabla 28). Este aumento en los indicadores de abundancia durante un evento El Niño está asociado a los siguientes efectos en los indicadores ambientales: aumento de la temperatura superficial del mar, disminución de los gradientes, menor productividad en términos de concentración de clorofila y acercamiento a la costa de las capturas.

Tabla 28. Criterios, indicadores y puntos de referencia bio-pesqueros de sardina y del ambiente en la escala estacional.

Escala Estacional		Puntos de Referencia 1987-2002										
		Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Invierno	Primavera			
		Criterio	Indicador	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media
Abundancia de sardina	DES-SA	40.218	42.674	23.867	24.503	52.838	49.205	72.609	28.282	61.741		
	CPUE-SA	52	35	30	37	68	79	72	55	63		
Dinámica ambiental	TSM-sat	19,50	21,26	19,04	16,80	19,33	22,54	20,19	17,87	20,30		
	GRT-sat	0,66	0,93	0,82	0,44	0,59	0,81	0,69	0,50	0,55		
	DC	40,8	30,4	35,1	50,3	50,5	32,7	30,4	38,7	38,1		
	CLOA-sat	2,06	3,24	1,27	0,85	1,97	0,56	1,11		1,96		

\* Años Normal/La Niña \*\* Años El Niño 1988, 89, 90, 91, 93, 94, 95, 96, 99, 00, 01, 02 1987, 92, 97, 98

## 5. CONCLUSIONES

a) En primer lugar se realiza una extensa revisión bibliográfica sobre el estado del arte internacional, en directa relación con los objetivos específicos del proyecto (5). En total se consideran 58 artículos, los cuales se sintetizan en los alcances que sobre tres temas se entregan en el anexo 2. Luego, concluidos los análisis correspondientes, se contabilizan cerca de 200 citas bibliográficas (ver Referencias Bibliográficas). La revisión fue fundamental para conocer y adaptar conceptos y análisis realizados sobre la zona de estudio y, principalmente, sobre otras regiones de borde oriental.

**b)** Al mismo tiempo se realizó un intenso trabajo de recolección de datos, configurando bases de datos ambiente-recursos que implicaron considerar archivos oceanográficos de diferentes fuentes (estaciones costeras, cruceros de investigación, satelitales e Internet) y bio-pesqueros recolectados por diferentes instituciones (públicas del sector y Universidades involucradas en el proyecto). En general, los datos e información recolectada permitieron realizar los análisis comprometidos; sin embargo, habría que realizar un análisis sobre formas de perfeccionar la recolección para configurar bases de datos más afines y representativos en el espacio tridimensional y el tiempo.

c) En relación con el objetivo específico 1 (relaciones ambiente-recursos):

- Escala estacional. El ciclo anual de la biomasa de anchoveta presenta un máximo en verano y otro secundario en invierno; mientras que la sardina muestra valores máximos entre invierno y primavera, con un máximo secundario en marzo. Durante condiciones normales la anchoveta se distribuye dentro de las primeras 20 mn; en tanto que la sardina presenta una distribución más oceánica. La anchoveta presenta su distribución mas costera entre diciembre y abril, y más oceánica entre septiembre y noviembre. La sardina se distribuye ampliamente en enero, reduciendo su distribución hacia la costa entre febrero y mayo, y hacia el norte de los 21°S en el periodo mayo-octubre.

Las condiciones oceanográficas muestran valores de temperatura superficial del mar (TSM) y nivel medio del mar (NMM) máximos durante el verano y mínimos durante el invierno.

Las estaciones meteorológicas costeras muestran vientos de componente norte-sur positivos durante todo el año, con un máximo en verano y un mínimo en invierno; mientras que los vientos satelitales próximos a la costa muestran un ciclo inverso. Este patrón estacional del viento puede producir levantamiento y profundización de la termoclina (Zb) debido al bombeo de Ekman que contrarrestaría la señal anual de la surgencia costera. De acuerdo con el análisis de la altimetría satelital, la región oceánica (y posiblemente costera) de la región de estudio se caracteriza por la presencia de remolinos de mesoescala, con dimensiones del orden de cientos de kilómetros y periodos activos de varios meses. Asociado a estos remolinos se observa la advección de aguas ricas (pobres) en clorofila desde (hacia) la costa hacia (desde) regiones más oceánicas.

- Escala intraestacional. Las fluctuaciones del NMM mar y de la corriente subsuperficial de Perú-Chile en el norte de Chile están fuertemente moduladas por la dinámica de ondas ecuatoriales. A frecuencias intraestacionales (30-90 días) dominan las ondas atrapadas a la costa forzadas remotamente por fluctuaciones intraestacionales del viento a lo largo del Pacifico ecuatorial. En frecuencias mayores que la banda intraestacional (140-512 días), se presentan periodos en que predominan las ondas de Rossby forzadas ecuatorialmente (periodos cálidos en el Pacifico ecuatorial central), y otros en que éstas son forzadas por una combinación de forzantes locales y remotos (periodos fríos en el Pacifico ecuatorial central). Por otra parte, la clorofila satelital también muestra un intensa variabilidad intraestacional, probablemente forzada remotamente (ondas internas) y localmente (viento).

Durante periodos en que estas ondas producen la mayor profundización de las isotermas (por ejemplo durante El Niño 1997-98), la distribución vertical de la anchoveta cambia drásticamente, alcanzando profundidades cercanas a los 140 m, con una mayor densidad alrededor de los 60 m. Habitualmente la mayor densidad de cardúmenes se presenta a una profundidad media de 15 m, con una excursión vertical que no sobrepasa los 50 m. La mayor dispersión del recurso, debido a una mayor excursión vertical, modifica la disponibilidad del recurso a las artes de pesca, lo cual se refleja en menores captura. Estas relaciones se mantienen, con menor intensidad, durante periodos caracterizados por fluctuaciones intraestacionales débiles.

- Escala interanual. En general las pesquerías de anchoveta y sardina presentan intensas fluctuaciones interanuales. Ambos recursos muestran distribuciones más costeras que lo habitual durante eventos El Niño. En tanto, las condiciones oceanográficas y atmosféricas del norte de Chile presentan las típicas fluctuaciones asociadas al ciclo El Niño-Oscilación del Sur (ENOS): anomalías positivas (negativas) de TSM, NMM, profundidad de Zb en la costa, disminución (aumento) del gradiente térmico (GRT) este-oeste durante eventos El Niño (La Niña).

- Escala interdecadal. El sistema océano-atmósfera del Pacifico suroriental presenta fluctuaciones en la escala interdecadal, caracterizada por periodos decadales, bidecadales y pentadecadales. A lo largo de la costa norte de Chile, las fluctuaciones de TSM, NMM, TA y Zb son remotamente forzadas por cambios del viento en la franja ecuatorial. Estas fluctuaciones ambientales aparecen desacopladas de las fluctuaciones del viento en la costa. Sin embargo, es posible que el aumento (disminución) del índice de turbulencia y del transporte mar afuera sean condiciones favorables para el desarrollo de la pesquería de anchoveta (sardina).

Así, los desembarques de anchoveta presentan dos periodos en que domina la pesquería pelágica en el norte de Chile. El primero desde la década del sesenta hasta mediados de los setentas, y el segundo desde mediados de los ochenta hasta el presente, periodos caracterizados por anomalías negativas de TSM y una Zb relativamente mas somera en el Pacifico ecuatorial oriental y a lo largo del Pacifico suroriental. En tanto, la pesquería de sardina se desarrolla principalmente entre mediados de los setentas y comienzos de los noventas, cuando se observa un periodo con anomalías positivas de TSM, una Zb relativamente mas profunda en el Pacifico ecuatorial oriental y a lo largo del Pacifico suroriental y a lo largo del Pacifico suroriental, y vientos que aumentan significativamente las estimaciones de turbulencia (IT) y del transporte de Ekman (TE). La sardina se distribuye ampliamente en el norte de Chile hasta 1992; a partir de entonces disminuye drásticamente su área de distribución. En tanto la anchoveta muestra un aumento del área de distribución, aunque con intensas fluctuaciones interanuales asociadas a los eventos El Niño. De acuerdo con la información espacio-temporal disponible desde 1987, la fase fría de la oscilación interdecadal iniciada a fines de los ochenta se caracteriza por una mayor persistencia de anomalías negativas de

TSM, un aumento de los GRT este-oeste debido a una mayor intensidad de la surgencia costera, y un aumento de la productividad fitoplanctónica frente a las costas del norte de Chile. En tanto que en las series temporales se observa una clara disminución del IT y TE a valores moderados. Estas condiciones permiten el desarrollo de un hábitat apto para la anchoveta, favoreciendo el éxito de los desoves y el reclutamiento de esta especie sobre la sardina.

En base a observaciones satelitales, se observa un enfriamiento de las condiciones térmicas superficiales a lo largo de la costa norte de Chile a partir de mediados de 1998, mientras que en el sector más oceánico no se observa este proceso, incrementando el gradiente esteoeste en esta región. Además, se observa un aumento de la clorofila satelital en la zona costera a partir de 1997. Estas condiciones favorecen la presencia de anchoveta.

d) En relación con el objetivo específico 3 (reclutamiento):

Desde el punto de vista de la dinámica poblacional de anchoveta, gran parte de los indices de abundancia disponibles para conformar una serie temporal están referidos al periodo más reciente. En particular, el índice larval constituye un indicador que abarca desde 1984. Sin embargo, este indicador no se encuentra validado en términos de si está reflejando la biomasa adulta o desovante ni en que forma (lineal o no-lineal). El único indice disponible para inferir cambios en la abundancia de la fracción explotable es la captura por unidad de esfuerzo. Se utilizó la CPUE del grupo de trabajo de evaluación conjunta IFOP-IMARPE, para analizar los cambios en la biomasa explotable. Se encontró que la dinámica de tales cambios, a través de la tasa de crecimiento realizada (R<sub>t</sub>), es función lineal de la abundancia del año anterior reflejando una dinámica de dimensión 1, que explica solamente 38,6% de los cambios ocurridos entre 1986 y 2001. Esto quiere decir que los factores densidaddependientes son débiles, pero ningun factor desidad-independiente contribuyó en la explicación de los cambios poblacionales observados. De esta manera, se concluye que la dinámica de la anchoveta en la zona norte (al menos la fracción explotable) esta siendo regulada mayormente por fuerzas estocásticas y débilmente por factores densidaddependientes. El orden de la dimensión indica que los cambios poblacionales son más bien de alta frecuencia, pero estos son débilmente explicados por factores densidadindependientes. A su vez, al utilizar la técnica de modelos aditivos generalizados se encontró una relación no-lineal para la función R de naturaleza convexa, muy próxima a la lineal en abundancias bajas, aspecto que no modifica la conclusión anterior.

No obstante lo anterior, la abundancia del grupo de edad 0 (reclutamiento) es explicada casi linealmente por la biomasa adulta y al menos por una relación no-lineal con el índice de turbulencia y de surgencia primaveral (Agosto-Diciembre, periodo prerrecluta). En consecuencia, la variabilidad que ha determinado el éxito o fracaso del reclutamiento de anchoveta en la zona norte se debe a la ocurrencia de primaveras con una excesiva o débil actividad del viento. Los mecanismos involucrados con los efectos de la actividad del viento sobre la sobrevivencia de larvas y juveniles prerreclutas pueden inferirse de acuerdo con los mecanismos subyacentes en la hipótesis de ventana ambiental óptima. Sin embargo, varias interrogantes deben ser resueltas primero. En efecto, se desconoce si la actividad del viento medida en Antofagasta refleja bien el transporte fuera de la costa versus el bombeo de Ekman, o más bien está constituyendo un proxy de los efectos de la turbulencia sobre la sobrevievncia de los estados prerreclutas.

Desde el punto de vista de los efectos densidad-dependientes de la abundancia de reclutas, se encontró que la sobrevivencia del reclutamiento (grupo de edad 0) está afectada por la abundancia del stock adultos. A su vez, el stock adulto influye negativamente en la sobrevivencia del grupo de edad 1, pero la sobrevivencia de éste a su vez se relaciona con la abundancia de reclutas. En otras palabras, una clase anual abundante determina una mejor sobrevivencia del grupo de edad 1, no obstante tal efecto se compensa por los efectos contrarios que determina la abundancia del stock adulto. En tanto, la sobrevivencia de la edad 2 y 3 es independiente de la abundancia de reclutas y del stock adulto, probablemente más influenciada por el efecto de la pesca como factor extrínsico. En consecuencia, un stock adulto abundante determinará una disminución en la tasa de sobrevivencia del grupo de edad 1. Estos efectos densidad-dependientes están relacionados con la interacción entre cohortes como intra-cohortes, aspectos que deben seguir estudiandose en el stock de anchoveta pues

la naturaleza fluctuante de la especie se podría explicar más bien por estos factores más que por efectos climáticos directos o indirectos.

La abundancia del stock adulto de anchoveta es consecuencia de los cambios en el reclutamiento anuale que se explica al menos por algunos factores ambientales como la actividad del viento, que más bien son una respuesta local. Los efectos de factores ambientales asociados con anomalías intensas relacionadas con fenómenos El Niño-Oscilación del Sur están más relacionados con la distribución del recurso y uso del hábitat que con la dinámica de la abundancia de la fracción explotable.

Desde una perspectiva de largo plazo, en los tres stocks de anchoveta que se distribuyen en el Pacífico suroriental se encontró que el componente de variación de baja frecuencia fue mucho más significativo y estrechamente relacionado, lo que sugiere un patrón de fluctuaciones de largo plazo en sincronía de la abundancia. El componente de alta frecuencia solamente se relacionó en forma significativa entre el stock Centro-Norte de Perú y el stock Sur de Perú-Norte de Chile. A su vez, el impacto de anomalías intensas relacionadas con eventos El Niño-Oscilación del Sur que se presentan durante la primavera del año anterior, determinaron una relación inversa y significativamente con los residuos de corto plazo de los stocks Centro Norte de Perú y Sur de Perú-Norte de Chile, mientras que tales cambios no tienen relación alguna con el componente de corto plazo del stock de anchoveta de la zona centro-sur de Chile. No obstante, la relación es más bien débil y fortalecida solamente debido a la influencia de eventos El Niño de gran magnitud, con anomalías positivas por sobre 2. En consecuencia, se concluye que eventos El Niño-La Niña (variación interanual), de gran magnitud podrían tener consecuencias para el reclutamiento un año después, siendo de mayor importancia los problemas relacionados con la capturabilidad y disponibilidad del recurso en general, y otras causas como la intensidad de pesca o el viento podrían estar determinando cambios de corto plazo en la abundancia de la anchoveta.

#### e) En relación con el objetivo específico 4 (modelo conceptual):

La revisión bibliográfica sobre la variabilidad bio-pesquera y oceanográfica de ecosistemas de bordes orientales del Pacífico, la concepción de modelos conceptuales afines y los resultados del objetivo específico 1 del presente trabajo, permitieron adaptar un modelo conceptual integrador de los diferentes fenómenos locales y de gran escala que afectan el ambiente marino del norte de Chile, y la distribución y abundancia de los principales recursos pelágicos.

Este modelo muestra como las fluctuaciones interdecadales (asociadas a cambios de régimen) e interanuales (asociadas a los eventos El Niño) que se desarrollan en el Océano Pacífico, se manifiestan en el Pacífico Sudeste y por ende en la zona norte de Chile, afectando el ciclo anual, la dinámica de las ondas ecuatoriales y la surgencia costera. En lo biológico, el hecho más notable es la secuencia de la sustitución de las principales especies explotadas en la zona (anchoveta-sardina-anchoveta), siendo más favorables en términos de desembarque los períodos de anchoveta para Perú y de sardina para Chile.

Las fluctuaciones que se manifiestan en las diferentes escalas espacio-temporales, se relacionarían a través de la continuidad de lo que sucede diariamente en la zona de estudio hasta décadas, y desde lo que sucede localmente hasta la cuenca del Pacífico. Sin desconocer la investigación pesquera que con carácter operativa se realiza, ésta visión holística que se visualiza a través del modelo conceptual en cuestión imagina la dimensión del trabajo que es necesario impulsar para permitirnos el desarrollo de un manejo pesquero considerando el enfoque ecosistémico propuesto en la literatura.

f) En relación con el objetivo 2 (proxies):

Se descarta la CPUE como proxy de la abundancia de anchoveta, ya que su tendencia difiere de las que muestran las estimaciones directas de biomasa (VPA y BMPH). Se propone entonces el desembarque como proxy de la abundancia de este recurso en el norte de Chile, dado que representa la data más larga del análisis y notables fluctuaciones (en todas las escalas) que se asociarían al recurso (en cuanto a su abundancia y disponibilidad).

Para la sardina se propone la CPUE como proxy de la abundancia, debido a su buena correlación con las estimaciones de biomasa (VPA) y desembarque.

Se propone la TSM como un proxy ambiental de la abundancia de anchoveta y sardina, por estar en fase con las variaciones de dichos recursos. Además refleja variaciones relacionadas con cambios en otras variables ambientales (Zb, NMM, TE, IT), y las bases de datos son de fácil adquisición.

La dinámica de Zb afectaría directamente las posibilidades de captura de anchoveta, debido a la tendencia del recurso a profundizarse y aumentar su dispersión cuando la termoclina se profundiza. Por lo tanto, Zb puede considerarse como un proxy de la vulnerabilidad de la anchoveta.

El reclutamiento de anchoveta y el TE presentan una buena correlación negativa. El efecto desfavorable del incremento del TE sobre el reclutamiento se debería al aumento de la advección de huevos y larvas lejos de la costa, y por ende de la mortalidad natural. Se propone entonces el TE como una variable proxie del reclutamiento de anchoveta.

A pesar de la existencia de diferencias entre rangos de temperatura asociados a los desoves, que indican que la ésta podría ser considerado como un proxy, el análisis espacial de los huevos de anchoveta realizado con ACP indica que la variable de mayor importancia al definir zonas con mayor número de huevos es la CLOA, por lo que se propone como proxie del desove.

g) En relación con el objetivo específico 5 (indicadores):

Las pesquerías, al igual que otras actividades económicas, están íntimamente relacionadas con el ambiente natural. No obstante, aspectos fundamentales de la ecología de los recursos pesqueros y su interacción con el ambiente no son aún bien comprendidos. En efecto, el detalle de los procesos que conducen el medio ambiente y la presión de pesca en distintos ecosistemas no son bien entendidos. Además, las pesquerías en Chile son llevadas a cabo bajo diversas condiciones climáticas y geográficas, y controladas por una variedad de

fuerzas ambientales, tecnológicas, económicas, sociales y gubernamentales. Luego, no conocemos en forma precisa los efectos de largo plazo de las medidas de administración pesquera y de la variabilidad ambiental sobre los recursos. En el contexto de estas incertidumbres y considerando el enfoque ecosistémico de FAO, se utiliza gran cantidad de datos, información y métodos de análisis disponibles, para proponer indicadores ambientales y bio-pesqueros sobre las principales pesquerías de la zona norte del país.

En base al modelo conceptual integrador propuesto y a las relaciones ambiente-recurso establecidas en las distintas escalas de la variabilidad espacio-temporal, se diseñaron y cuantificaron indicadores bio-pesqueros (DES, RECL, BIOM, CPUE, ESF y Huevos), ambientales (TA, IT, TE, IOS, TSM, Zb, NMM, Niño1+2, Niño3+4, GRT, CLOA y DC) y multivariados (considerando variabilidad bio-pesquera y ambiental). Los resultados del proyecto demuestran la aplicación del SRDS de FAO a grandes bases de datos. Sin embargo, en este trabajo faltó incorporar importante información (biológica básica y oceanográfica más fina), de la cual se requiere más investigación. Es necesaria investigación para afinar análisis y aplicar modelos con mayor precisión; también se debe mejorar la fineza y confiabilidad de los datos de entrada en la identificación de indicadores.

No obstante, son motivantes los resultados de este proyecto sobre el particular. Los indicadores que se presentan son sensibles a cambios en el ambiente y estrategias de pesca en diversas escalas espacio-temporales. Estos establecen una línea base sobre la cual se pueden comparar futuras evaluaciones y pueden ser de gran utilidad para evaluar medidas de administración pesquera y para direccionar futuras investigaciones.

### 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alheit, J. & A. Bakun, 2004. Comparison of synchronous ecological regime shifts in Humboldt and Kuroshio Currents. PICES 13th Annual Meeting, Honolulu, Hawaii, U.S.A., October 14-24, 2004.
- Alheit, J. & M. Ñiquen. 2004. Regime shift in the Humboldt Current ecosystem. Progress in Oceanography, 60: 201-222.
- Allan, R.J., N. Nicholls, P. D. Jones & I. J. Butterworth. 1991. A further extension of the Tahiti-Darwin SOI, early ENSO events and Darwin pressure. J. Climate, 4, 743-749.
- Alvarez A. 2001. Different proxies for unmeasured fish stock in fishing production functions. Dept. of Economics. University of Oviedo, Spain.
- Arcos, D., L. Cubillos & S. Núñez. 2001. The jack mackerel fishery and El Niño effects off Chile. Progress in Oceanography, 49: 597-617.
- Atkinson, D.B., G.A. Rose, E.F. Murphy & C.A. Bishop. 1997. Distribution changes and abundance of northern cod (*Gadus morhua*), 1981-1993. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 54 (Suppl. 1): 132-138.
- Bailey, K.M. & S.A. Mcklin. 1994. Analysis of patterns in larval walleye pollock *Theragra chalcogramma* survival and wind mixing events in shelikof strait. Gulf of Alaska. Mar. Ecol. Prog. Ser. 113.
- Bakun, A. & K. Broad. 2003. Environmental 'loopholes' and fish population dynamics: comparative pattern recognition with focus on El Nino effects in the Pacific. Fisheries Oceanography 12, 458–473.
- **Bakun, A. & P. Cury. 1999.** The "school trap": a mechanism promoting large amplitude out-of-phase oscillations of small pelagic species. Ecology Letters 2, 349–351.
- Bakun, A. & R.H. Parrish. 1982. Turbulence, transport, and pelagic fish in the California and Peru current systems. CalCOFI Rep., Vol. XXIII: 99-112.
- **Bakun, A. 1990.** Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. Science 247, 198-2001.
- **Bakun, A. 1995.** Global climate variations and potential impacts on the Gulf of Guinea sardinella fishery. *In*: Dynamics and use of sardinella resources from upwelling off Ghana and Ivory Coast. F.X. Bard & K.A. Koranteg (Eds.), Editions ORSTOM, Paris, 60-85 pp.
- Bakun, A. & K. Broad. 2003. Environmental 'loopholes' and fish population dynamics: comparative pattern recognition with focus on El Niño effects in the Pacific. Fish. Oceanogr. 12: 415-458.
- **Bakun, A., 2004.** Regime shifts. In: Robinson and Brink (eds.), The Sea, Chapter 25, Vol. 13, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Bakun, A., D.R. McLain & F.V. Mayo. 1974. The mean annual cycle of coastal upwelling off western North America as observed from surface measurements. Fish. Bull., U.S. 72 (3): 843-844.
- Barange, M. (ed.) 2001. Report of the 1st meeting of the SPACC/IOC Study Group on "Use of environmental indices in the management of pelagic fish populations (3-5 September 2001, Cape Town, South Africa). GLOBEC Special Contribution N° 5, 122 p. (http://www.pml.ac.uk/globec/)

- Barbieri, M. A., M. Bravo, M. Farias, A. González. O. Pizarro & E. Yañez. 1995a. Fenómenos asociados a estructuras térmicas superficiales del mar observados a través de imágenes satelitales en la zona norte de Chile. Invest. Mar., 23:99-122.
- Barbieri, M.A., A. González & E. Yáñez. 1995b. Time-space variability of sea surface temperature and pelagic resources in northern Chile (1987-92). *In*: Quantitative Remote Sensing for Science and Applications, T. Stein (Ed.), IGARSS'95, Vol. I, 300-302.
- Barbieri, M.A., M. Bravo, M. Farías, A. González, O. Pizarro & E. Yáñez. 1995 Fenómenos asociados a la estructura térmica superficial del mar observados a través de imágenes satelitales en la zona norte de Chile. Invest. Mar., Valparaíso, 23: 99-122.
- Barría, P., A. Aranís, S. Mora, G. Böhm, R. Serra, C. Martinez, V. Catasti, H. Reyes, G. Muñoz & A. Gómez. 2003. Diagnóstico de la pesquería chilena de jurel (*Trachurus symmetricus murphyi*). *In*: Actividad Pesquera y de Acuicultura en Chile, E. Yáñez (Ed.), Escuela de Ciencias del Mar, PUCV, Valparaíso, 123-141.
- Barría, P., A. Zuleta, G. Böhm, V. Catasti, M.A. Barbieri, E. Yáñez, A. González, K. Nieto, C. Silva & F. Espíndola. 1999. Análisis de la dinámica del patrón de explotación de la flota cerquera en la zona norte y su relación con el medio ambiente. Informe Final Proyecto FIP N° 96-03, IFOP-UCV, 120 pp. + Figs. y Anexos.
- Beamish, R.J. (Ed.) 1995. Climate change and northern fish populations. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 121: 739.
- Bernal, P. 1979. Large-sacle biological events in the California Current. CALCOFI Rep. 20: 89-101.
- Bernal, P. 1990. La oceanografía del sistema de corrientes de Chile-Perú en relación a las pesquerías pelágicas. *In*: Perspectivas de la Actividad Pesquera en Chile. M.A. Barbieri (Ed.), Escuela de Ciencias del Mar, Universidad Católica de Valparaíso, 35-48.
- Bernal, P., F. Robles & O. Rojas. 1983. Variabilidad física y biológica en la región meridional del sistema de corrientes Chile-Perú. FAO Fish. Rep., (291) Vol. 3: 683-711.
- Berryman, A.A. & Gutierrez, A.P. 1999. Dynamics of insect predator-prey interactions. In: Ecological entomology. John Wiley and Sons, pp. 425-462.
- **Berryman, A.A. 1999.** Principles of population dynamics and their application. Stanley Thornes Publishers Ltd., Chleteham, UK.
- Bertrand, A, M., Segura, M., Gutiérrez & L., Vásquez. 2004. From small-scale habitat loopholes to decadal cycles: a habitat-based hypothesis explaining fluctuation in pelagic fish populations off Peru. Fish and Fisheries 5, 296–316.
- Bjørnstad, O.N., Fromentin, J.M., Stenseth, N.C. & Gjøsæter, J. 1999. Cycles and trends in cod populations. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 96, 5066-5071.
- Blanco, J. L., A. C. Thomas, E. Carr & P. T. Strub. 2001. Seasonal climatology of hydrogrphyc conditions in the upwelling region off northern Chile. J. Geosphys. Res. 106 (C6): 11451-11467.
- Böhm, G., M.A. Barbieri, E. Yáñez, A. González, C. Canales & V. Catasti. 1996a. Análisis de la captura, del esfuerzo de pesca de las unidades de pesquería de sardina española y anchoveta de la zona norte. Informe Final Proyecto FIP 93/21, IFOP-UCV, 111 pp. y Anexos.

- Böhm, G., M.A. Barbieri, E. Yáñez, V. Catasti & A. González. 1996b. Análisis de la captura, del esfuerzo de pesca de las unidades de pesquería del jurel de la zona centrosur y norte. Informe Final Proyecto FIP 93/22, IFOP-UCV, 122 pp. y Anexos.
- Böhm, G., V. Catasti, P. Barría, R. Serra, G. Rosson, L. Caballero, & C. Fonfach. 1998. Análisis de la captura y del esfuerzo de pesca en lasunidades de pesquerías pelágicas de sardina española y anchoveta de la I a IV regiones. Informe Final Proyecto FIP N°96/05, IFOP, 60 pp y Anexos.
- **Brandhorst, W.1971**. Condiciones oceanográficas estivales frente a la costa de Chile. Rev. Biol. Mar.,14(3):45-84.
- Braun, M., G. Claramunt, H. Reyes, V. Catasti, C. Montenegro, V. Baros, E. Díaz, J. Pizarro & P. Pizarro. 2004a. Evaluación del stock desovante de anchoveta en la I y II Regiones, año 2003. Pre-informe Final FIP 2003-07.
- Braun, M., H. Reyes, V. Valenzuela, J. Castillo, J. Osses & V. Catasti. 2004b. Monitoreo de las condiciones bio-oceanográficas en la I y II Regiones, año 2002. Informes Técnicos FIP-IT/2002-01.
- Braun, M., J. Castillo, J. Blanco, S. Lillo & H. Reyes. 1995. Monitoreo hidroacústico y oceanográfico de los recursos pelágicos en la I y II regiones. Informe Técnicos FIP N°93/15, 172 pp.
- Braun, M., Reyes, J., Osses, J., Castillo, V. & Catasti. 2000. Monitoreo de las condiciones bio-oceanográficas en la I y II Regiones, año 2000. Informes Técnicos FIP-IT/2000-01.
- **Bravo, L.A. 2003.** Variabilidad anual e interanual de la profundidad de la capa de mezcla y de la termoclina de la zona norte de Chile (18°20'S-24°S). Tesis para optar al titulo de Ocenografo. 77 Pag.
- Burnham, K.P. & Anderson, D.R. 1998. Model selection and inference: a practical information theoretic approach. Springer-Verlag, New York.
- **Cañón, J.R. 1978.** Distribución de la anchoveta (*Engraulis ringens*) en el norte de Chile en relación a determinadas condiciones oceanográficas. Invest. Pesq. (Chile) 30: 1-122.
- **Cañón, J.R. 1986.** Variabilidad ambiental en relación con la pesquería nerítica pelágica de la zona norte de Chile. *In*: La Pesca en Chile, P. Arana (Ed.), Escuela de Ciencias del Mar, Universidad Católica de Valparaíso, 195-205.
- Carpenter, J.H. 1965. The Chesapeake Bay Institute Technique for the Winkler dissolved oxygen method, Limnol. Oceangr., 10:141-143.
- Carr, M.E., P. Ted Strub, A., Thomas, J.L., Blanco. 2002. Evolution of 1996-1999 La Niña and El Niño conditions off the western coast of South America: A remote sensin perspective. J. Geophys. Res., vol. 107(C12), 3236. doi:10.1029/2001JC001183, 2002.
- Castillo, J. & O. Guzmán. 1985. Variaciones de la distribución espacial de la sardina y jurel durante El Niño 1982-83. Invest. Pesq. (Chile), 32: 79-93.
- Castillo, J., Córdova, J., Saavedra, A., Espejo, M., Gálvez, P. & M.A. Barbieri. 2002. Evaluación acústica de la biomasa, abundancia, distribución espacial y caracterización de cardúmenes de anchoveta en el periodo de reclutamiento. Primavera 2001. In: Evaluación del reclutamiento de anchoveta en la I y II Regiones, temporada 2001-2002. Informes Técnicos FIP-IT/2001-11, 207 p.

- Castillo, J., M.A. Barbieri & A. González. 1995. Relationships between sea surface temperature, salinity and the pelagic fish distribution off northern Chile. ICES, Inter. Symp. on Fisheries and Plankton Acoustics, Paper 157, 13 pp.
- Castillo, J., M.A. Barbieri, A. Paillaman, U. Parker, J. L. Blanco, H. Reyes, J. Braun & J. Osses. 1995. Evaluación hidroacústica de los stocks de sardina española, anchoveta y jurel en la zona norte (I a IV Regiones ). Informe Final, Proyecto FIP Nº 94-13, 152 pp., más anexos y figuras.
- Chavez, F., Ryan, J., Lluch-Cota, S., Ñiquen, M. 2003. From anchovies to sardines and back: multidecadal change in the Pacific Ocean. Science 299, 217-221.
- Chavez, F.P., Pennington, J.T., Castro, C.G., J.P. Ryan, R.P. Michiaski, B. Schlining, P. Walz, K.R. Buck, A. McFadyen & C.A. Collins 2002. Biological and chemical consequences of the 1997–1998 El Nin<sup>o</sup> in central California waters. Progress in Oceanography 54, 205–232.
- Chelton, D.B, P. Bernal & J.A. McGowan. 1982. Large scale interannual physical and biological interaction in the California Current. J. Mar. Res. 40(4): 1095-1125.
- Chelton, D.B. 1981. Interannual variability of the California Current: physical factors. CALCOFI Rep. 22: 34-48.
- Claramunt, G., G. Herrera, J. Pizarro, P. Pizarro, R. Escribano, M. Oliva, A. Olivares, C. Guerra & A. Zuleta. 1996. Evaluación del stock desovante de anchoveta por el "Método de Producción de Huevos" en la I y II Regiones. Informe Final, Proyecto FIP 95-01. Fondo de Investigación Pesquera. Universidad "Arturo Prat" Iquique. 49 p + anexos.
- Claramunt, G., G. Herrera, P. Pizarro, J. Pizarro, R. Escribano, M. Oliva, A. Olivares & A. Zuleta. 1997. Evaluación del stock desovante de anchoveta por el "Método de Producción de Huevos" en la I y II Regiones. Informe Final, Proyecto FIP 96-01. Fondo de Investigación Pesquera. Universidad "Arturo Prat" Iquique. 75 p. + anexos.
- Clarke, A. J. & A. Lebedev. 1996. Long-term changes in the equatorial Pacific trade winds, J. Climate, 9, 1020–1029.
- Clarke, A. J. & A. Lebedev. 1999. Remotely driven decadal and longer changes in the coastal Pacific waters of the Americas, J. Phys. Oceanogr., 29, 828–835.
- Clarke, A.J. & L. Shu. 2000. Quasi-biennial winds in the far western equatorial Pacific phase-locking El Niño to the seasonal cycle. Gepphysical Research Leters, 6, 771-774.
- Cleveland, W.S. 1979. Robust locally weighted regression and soothing scatterplots. J. Am. Stat. Assoc. 74:829-836.
- Cole, J. & J. McGlade., 1998. Clupeoid population variability, the environment and satellite imagery in coastal upwelling systems. Rev. Fish Biol. Fish. 8, 445-471.
- **Csirke, J. & G.D. Sharp. 1985.** Informes de la consulta de expertos para examinar los cambios en la abundancia y composición por especies de recursos de peces neríticos. FAO Inf. Pesca N° 291, Vol. 1: 104 pp.
- Csirke, J., Guevara-Carrasco, R., Cárdenas, G., Ñiquen, M. & Chipollini, A. 1996. Situación de los recursos anchoveta (*Engraulis ringens*) y sardina (*Sardinops sagax*) a principios de 1994 y perspectivas para la pesca en el Perú, con particular referencia a las regiones norte y centro de la costa peruana. Boletín del Instituto del Mar del Perú 15, 1–23.

- Cubillos, L. & R. Fuenzalida. 1990. El período cálido de 1976 a 1984 y sus efectos en los desembarques de algunos peces de importancia comercial de la zona norte de Chile. Ciencia y Tecnología del Mar, CONA (Chile) 14: 3-19.
- Cury, P. & C. Roy. 1989. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment succes in upwelling areas. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 46: 670-680.
- Cury, P. & V. Christensen. 2001. Quantitative Ecosystem Indicators for Fisheries Management. SCOR/IOC Working Group 119. <u>www.ecosystemindicators.org</u>.
- **Degnbol, P. 2003.** Knowledge in co-management. Institute for fisheries management and coastal community development.
- **Dioses, T. 1995.** Análisis de la distribución y abundancia de los recursos jurel y caballa frente a la costa Peruana. Informe Progresivo del Instituto del Mar del Perú No. 3, 55 pp.
- Eastman, J.R. 1999. IDRISI 32 Tutorial. Clark University, Worcester, MA, USA, 298 pp.
- **Eggert, H. 2000**. Technical Efficiency in the Swedish Trawl Fishery for Norway Lobster, Paper presented at IIFET X, Oregon State University.
- Elsberry, R. & R. Garwood. 1978. Sea surface temperature anormaly generation in relation to atmospheric storms. Bull. Amer. Meteor. Soc., 59: 786-789. Católica de Valparaíso, 91 pp.
- Enfield, D. & J. Allen. 1980. On the estructurnamics of monthly mean sea level anomalies along the Pacific coast of North and South America. J. Phys. Oceanogr., 10:557-578.
- Enfield, D. 1987. The intraseasonal Oscillation in Eastern Pacific Sea Levels: How Is It Forced?. J. Phys. Oceanogr., 17: 1860-1876.
- **FAO. 1976.** Monitoring of fish stock abundance: the use of catch and effort data. FAO Fish. Tech. Pap. 155, 101 pp.
- **FAO. 1999.** Indicators for sustainable development of marine capture fisheries. FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries N°8, 68 pp.
- **Fonseca, T.R. 1989**. An overview of the poleward undercurrent and upwelling along the Chilian coast, in Poleward Flows Along Eastern Ocean Boundaries, editado por S. J. Neshyba et al., pp. 203-228, Springer-Verlag, New York.
- Fox, W. 1975. Fitting the generalized stock-production model by least square and equilibrium approximation. Fish. Bull., U.S., 73 (1): 23-37.
- Freón, P. & E. Yánez. 1995. Influencia del medio ambiente en evaluación de stock: una aproximación con modelos globales de producción. *Invest. Mar., Valparaíso*, 23: 25-47.
- Fréon, P. & O.A. Misund. 1999. Dynamics of pelagic fish distribution and behaviour: effects on fisheries and stock assessment. Fishing New Books, 348 pp.
- **Fuenzalida, R. 1989.** Variabilidad temporal de un índice de surgencia para la zona de Iquique(Lat. 20S), Invest. Cient. Y Tec.,1:37-47.
- García, S.M., Staples, D.J. and Chesson, J. 2000. The FAO guidelines for the development and use of indicators for sustainable development of marine capture fisheries and an Australian example of their application. Ocean Coast. Manag. 43: 537-556.
- **GLOBEC Special Contribution No. 5.** Report of the 1st meeting of the SPACC/IOC study group on "Use of environmental indices in the management of pelagic fish populations". 3-5 September 2001, Cape Town, South Africa.

- **GLOBEC Special Contribution No. 6**: Report of the 2nd meeting of the SPACC/IOC study group on "Use of environmental indices in the management of pelagic fish populations". 9-11 November 2002, Paris, France.
- **GLOBEC. 1999.** Climate variability and spawning habitat: A progress report from SPACC Working Group 8. NOAA, Southwest Fisheries Science Center, La Jolla, USA. Globec International Newsletter October 1999. 8-11.
- **Grechina, A. 1998.** Historia de las investigaciones y aspectos básicos de la ecología del jurel (*Trachurus symmetricus murphyi* (Nichols)) en el alta mar del Pacifico Sur. In: Biología y ecología del jurel en aguas chilenas. (ed D. Arcos). Instituto de Investigación Pesquera, Talcahuano, Chile, pp. 11–34.
- **GTE, 2002.** Evaluación conjunta de los stocks de anchoveta y sardina del sur del Perú y Norte de Chile. Grupo de Trabajo IMARPE-IFOP sobre pesquerías de pequeños pelágicos, Octavo Taller, Lima 23 30 Septiembre 2002, 35 pp.
- **GTE, 2004.** Evaluación conjunta de los stocks de anchoveta y sardina del sur del Perú y Norte de Chile. Grupo de Trabajo IMARPE-IFOP sobre pesquerías de pelágicos pequeños, Décimo Taller, Valparaíso 1-4 de Diciembre 2004, 40 pp.
- Hare, S.R. & J.M. Nathan. 2000. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. Progress in Oceanography, 47, 103-145.
- Harley, S.J., R.A. Myers & A. Dunn. 2001. Is catch-per-unit-effort proportional to abundance?. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 58: 17601772.
- Hastie, T. & Tibshirani, R. 1990. Generalized additive models. Chapman & Hall, London.
- Haury, L.R., J.A. McGown & P.H. Wiebe. 1978. Patterns and processes in the timespace scales of plankton distributions. *In*: Spatial Patterns in Plankton Communities J.H. Stelle (Ed.), Plenum Press, New York, 277-327.
- Hernández, C. 2004. Relaciones entre la distribución espacial de jurel (*Trachurus murphyi*) y las condiciones tróficas del hábitat pelágico. Tesis, Escuela de Ciencias del Mar, Pontificia Universidad de Valparaíso, 59 pp.
- Higgins, K., A. Hasting, J. Sarvela & L.W. Bostford. 1997a Densitiv dependence and age structure: nonlinear dynamics and population behavior. Am. Nat. 149, 247-269.
- Higgins, K., A. Hasting, J.N. Sarvela, & L.W. Bostford. 1997b. Stochastic dynamics and deterministic skeletons: population behavior of Dungeness crab. Science 276, 1431-1434.
- Horel, J. D. 1984. Complex Principal Component Analysis: theory and examples. J. Clim. Appl. Meteorol., 23, 1660–1673.
- Hormazábal, S. 2003. Low frequency variability in the Eastern Boundary Current System of the South Pacific Ocean. Tesis para optar al grado de Doctor en Oceanografía. Universidad de Copenhague, Dinamarca.
- Hormazabal, S., G. Shaffer & O. Pizarro. 2002. Tropical Pacific control of intraseasonal oscillations off Chile by way of oceanic and atmospheric pathways. Geophys. Res. Lett. 29(6), 10.1029/2001GL013481.
- Hormazabal, S., G. Shaffer and O. Leth, 2004. The Coastal Transition Zone off Chile. Journal of Geophysical Research, 109, C01021, doi:10.1029/2003JC001956.

- Hormazabal, S., G. Shaffer, J. Letelier & O. Ulloa, 2001. Local and remote forcing of sea surface temperature in the coastal upwelling system off Chile. Journal of Geophysical Research, 106, 16657-16672. <u>http://pdata.fish.washington.edu/pdfs/2000archapter1.pdf</u> <u>http://www.ifm.dk/publications.html</u>.
- **IFOP. 1996.** Seguimiento de las principales pesquerías chilenas. Instituto de Fomento Pesquero, Centro de Servicios Pesqueros, Valparaíso, 273 pp.
- **IOC. 1985.** IOC-FAO Guilding Group of Experts on the Programme of Ocean Science in Relation to Living Resources. First Session, Paris, 16-20 July 1984, IOC-FAO/GGE-OSLR-I/3.
- **James D. 1997.** Application of Environmental Data in Fisheries Science: Examples from Fisheries. *In* G.W. Boehlert and J. D. Schumacher (eds.), Changing oceans and changing fisheries: environmental data for fisheries research and management.126
- Kara, A.B., P.A. Rochford & H.E. Hurlburt. 2000. An optimal definition for ocean mixed layer depth. J. Geophys. Res, 105, 16 803-16 821.
- Kara, A.B., P.A. Rochford & H.E. Hurlburt. 2001. Naval Research Laboratory Mixed Layer Depth (NMLD) Climatologies. NRL Report No. NRL/FR/7330-01-9995, Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, MS, 47 pp.
- Kenneth, T. 1997. Use of environmental data in biological and assessment surveys. In G.W. Boehlert and J. D. Schumacher (eds.), Changing oceans and changing fisheries: environmental data for fisheries research and management. 17-23.
- Köster, F.W., D. Schnack & C. Möllmann. 2003. Scientific knowledge of biological processes that are potentially useful in fish stock predictions. *Sci. Mar.*, 67 (Supl. 1): 101-127.
- Lambert, Y., N. Yaragina, G. Kraus, G. Marteinsdottir y P.J. Wright, 2003. Using environmental and biological indices as proxies for egg and larval production. J. Northw. Atl. Fish. Sci. 33, 115-159, 2003
- Large, W.G., J.C. McWilliams & S.C. Doney. 1994. Oceanic vertical mixing: A review and a model with nonlocal boundary layer parametrization, Rev.Geophys., 32:363-403.
- Laurec, A. & J.-C. Le Guen.1981. Dynamique des populations marines exploitées: Concepts et modèles. Centre National pour l'Éxplorations des Océans, Centro Océanologique de Bretagne, Brest, France, 117 pp.
- Levin, S.A. 1992. The problem of pattern and scale in ecology,: the Robert H. Mac Arthur award lecture. Ecology, 73(6), 1943-1967.
- Lima, M. 2001. The dynamics of natural populations: feedback structures in fluctuating environments. Revista Chilena de Historia Natural 74, 317-332.
- Lima, M., Brazeiro & A., Defeo, O. 2000. Population dynamics of the yellow clam Mesodesma mactroides: recruitment variability, density-dependence and stochastic processes. Mar. Ecol. Prog. Ser. 207, 97-108.
- Lluch-Belda, D., Crawford, R.J.M., Kawasaki, T., MacCall, A.D., Parrish, R.H., Schwartzlose, R.A., Smith, P.E. 1989. World-wide fluctuations of sardine and anchovy stocks: the regime problem. South African Journal of Marine Science 8, 195-205.
- Lluch-Belda, D., R. Schwartzlose, R. Serra, R. Parrish, T. Kawasaki, D. Hedgecok & R. Crawford. 1993. Sardine and anchovy regime fluctuations of abundance in four regions of the world oceans: a workshop report. Fish. Oceanogr. 1: 339-347.

- Loeb, V. & O. Rojas. 1988. Interannual variation of icthyoplankton composition and abundance relations off northern Chile, 1964-83. Fisheries Bulletin 86(1): 1-24.
- Mann, K.H. 1992. Physical influences on biological processes: how important are they?. S. Afr. J. Mar. Sci., 12: 107-121.
- Mantua, N.J., S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace & R.C. Francis. 1997. A Pacific decadal climate oscillation with impacts on salmon. Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 78: 1069-1079.
- Martinez, C., C. Salazar, J. Mendieta & A. Aranis. 1986. Desarrollo y perspectivas de la pesquería pelágica en el norte de Chile (Arica-Coquimbo). In: La Pesca en Chile (Ed.), Escuela de Ciencias del Mar, UCV, Valparaíso, 165-182.
- Martinez, C., L. Caballero & G. Böhm. 1992. Diagnóstico de las principales pesquerías nacionales pelágicas de la zona norte (I-IV Región). Estado de situación y perpectivas del recurso. CORFO-IFOP AP/92, Santiago, Chile, 48 pp.
- McCullagh, P. & J.A. Nelder. 1989. Generalized linear models. Chapman & Hall, New York.
- McPhaden, M. J., & D. Zhang. 2002. Slowdown of the meridional overturning circulation in the upper Pacific Ocean. *Nature*, 415, 603–608.
- Minobe, S. 1999. Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climatic regime shifts. Geophys. Res. Letters, 26, 855-858.
- Montecinos A. & O. Pizarro. 2005. Interdecadal SST-SLP coupled variability in the South Pacific Ocean. Journal of Geophysical Research, aceptado para publicación.
- Montecinos A., O. Leth & O. Pizarro. 2005. Wind-driven interdecadal variability in the eastern South Pacific. Journal of Geophysical Research, en revisión.
- Montecinos, A. & O. Pizarro. 2004. Interdecadal SST-SLP coupled variability in the South Pacific. Enviado a Journal of geophysical Research.
- **Montecinos, A. 1991.** Efecto del Fenómeno El Niño en los vientos favorables a la Surgencia Costera en la Zona Norte de Chile. Tesis para optar al título de Oceanógrafo, Escuela de Ciencias del Mar, U. Católica de Valparaíso.
- Montecinos, A., S. Purca & O. Pizarro. 2003. Interannual-to-interdecadal sea surface temperature variability along the western coast of South America. Geophys. Res. Letters, 30, 1570, doi:10.1029/2001GL013717.
- Myers, R. 1998. When do environment-recruitment correlations work?. Review in Fish Biology and Fisheries. Vol. 8: 285-305.
- Nieto K., E. Yáñez, C. Silva & M.A.Barbieri. 2001. Probable fishing grounds for anchovy in the northern Chile using an expert system. Geoscience and Remote Sensing Symposium: Scanning the Present and Resolving the Future, Sydney, Australia, 9-13 July 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International, Volume 7, Pages 2985-2987.
- O'Driscoll, R.L., D.C. Schneider, G.A. Rose & G.R. Lilly. 2000. Potential contact statistics for measuring scale-dependent spatial pattern and association: an example of northern cod (*Gadus morhua*) and capelin (*Mallotus villosus*). Can. J. Fish. Aquat. Sci., 57: 1355-1368.
- Oliva J., C Montenegro, M. Braun, O Rojas, E. Díaz, V. Catasti, H. Reyes, P. Barría, R. Serra, G. Claramunt, G. Herrera, P. Pizarro, J. Pizarro, R. Escribano & M. Oliva. 2001. Evaluación del stock desovante de la anchoveta en la I y II Regiones, año 2000. Instituto de Fomento Pesquero. Informe Final. Proyecto FIP 2000-06. 114 p. + anexos.

- Oliva J., C Montenegro, M. Braun, O Rojas, H. Reyes, V. Catasti, E. Díaz, P. Barría, R. Serra, V. Baros, A. Vargas, G. Claramunt, G. Herrera, P. Pizarro, J. Pizarro, Y. Muñoz, R. Escribano & M. Oliva. 2002. Evaluación del stock desovante de la anchoveta por el método de producción de huevos en la I y II Regiones, año 2001. Instituto de Fomento Pesquero. Informe Final. Proyecto FIP 2001-10. 86 p. + Anexos.
- Oliva J., H. Reyes, V. Baros, E. Díaz, C Montenegro, V. Catasti, G. Claramunt, G. Herrera, J. Pizarro, P. Pizarro & S. Soto. 2003. Evaluación del stock desovante de la anchoveta por el método de producción de huevos en la I y II Regiones, año 2002. Instituto de Fomento Pesquero. Informe Final. Proyecto FIP 2002-10. 89 p. + Anexos.
- **Oliva J., M. Braun, J. Castillo, J. Blanco & O. Rojas. 1998**. Evaluación del stock desovante de la anchoveta en la I y II Regiones (1997). Instituto de Fomento Pesquero. Informe Final. Proyecto FIP 97-01. 133 p.
- Oliva J., M. Braun, J. Cordoba, J. Castillo, V. Catasti, V. Valenzuela, O. Rojas, J. Blanco & C. Martínez. 2000. Evaluación del stock desovante de la anchoveta en la I y II Regiones (1999). Instituto de Fomento Pesquero. Informe Final. Proyecto FIP 99-10. 133 p.
- Palma, W., J. Pizarro & C. Flores. 1992. Co-ocurrencia, distribución y abundancia de estados tempranos de Engraulis ringens y Sardinops sagax (Pises: Clupeoiformes) en un área de surgencia costera en el norte de Chile. Rev. Inv. Cient. y Tec. Serie Ciencias del Mar (2): 12-30.
- Parrish, J.K., K. Bell, E. Logerwell & C. Roegner. 2000. Indicators of West Coast Estuary Health.
- Parrish, R. 1997. Time, space and fish scales: applications of retrospective environmental data to fisheries research. *In* G.W. Boehlert and J. D. Schumacher (eds.), Changing oceans and changing fisheries: environmental data for fisheries research and management 24-29. www.ualg.pt/feua/uk/Papers/P15.pdf
- Parrish, R.H. & A.D. MacCall. 1978. Climatic variation and exploitation in the Pacific mackerel fishery. Fish. Bull, USA, 167: 1-10.
- Parrish, R.H. 1989. The South Pacific oceanic horse mackerel (Trachurus picturatus murphyi) fishery. In: The Peruvian Upwelling Ecosystem: Dynamics and Interactions. eds D. Pauly, P. Muck, J. Mendo and I. Tsukayama, Vol. 18. ICLARM Studies and Reviews, Manila, pp. 321–331.
- Parrish, R.H., A. Bakun, D.M. Husby & C.S. Nelson. 1983. Comparative climatology of selected environmental processes in relation to Eastern boundary current pelagic fish reproduction. FAO Fish. Rep., N° 291, Vol.3, 731-777.
- Perry, R.I., J.A. Boutillier & M.G.G. Foreman. 2000. Environmental influences on the availability of smooth pink shrimp, *Pandalus jordani*, to commercial fishing gear off Vancouver Island, Canada. Fish. Oceanogr. 9, 50-61.
- Pizarro, O. & A. Montecinos. 2004. Interdecadal variability of the thermocline along the west coast of South America. Geophys. Res. Letters. En prensa.
- Pizarro, O., S. Hormazabal, A. González & E. Yáñez. 1994. Variabilidad del viento, nivel del mar y temperatura en la costa norte de Chile. Invest. Mar., Valparaíso, 22: 85-101
- Punt, A.E., T.I. Walker, B.L. Taylor & F. Pribac. 2000. Standardization of catch and effort data in a spatially-structured shark fishery. Fisheries Research, 45: 129-145.

- Quiñones, R., R. Serra, S. Nuñez, H. Arancibia, J. Córdova & F. Bustos. 1997. Relación espacial entre el jurel (Trachurus symmetricus murphyi) y sus presas en la zona centro-sur de Chile. In: Gestión de sistemas oceanográficos del Pacifico oriental (ed. E. Tarifeño), Vol. IOC/INF-1046. Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO, Concepción, Chile, pp. 187–202.
- Penjan R., S. Bambang, G. Abdul, 2000. Report of the Workshop on Interannual Climate Variability and Pelagic Fisheries Nouméa, Nouvelle Calédonie 6 - 24 November 2000. Published by the International Research Institute for Climate Prediction (IRI), Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University Palisades, New York, 10964, USA IRI Publication IRI-CW/01/3.
- **Robles, F. 1979.** Water masses and circulation in the South-East Pacific and the El Niño event. Ph.D. Dissertation, University of Wales, U.K., 2 vols.: 175 and 156 pp.
- Robson, D.S. 1966. Estimation of the relative fishing power of individual ships. ICNAF, Res. Bull., 3, 5-14.
- **Rojas, O. 1986.** Determinación de la abundancia del ictioplancton colectado durante el crucero IND 8502. Inf. Téc. IFOP, Valparaíso, 30 pp.
- **Rojas. R. & N. Silva.1996.** Atlas Oceanográficos de Chile. 1: [18°21'S a 50°S]. Serv. Hidro. y Oceanog.. de la Armada de Chile, Valparaíso, Chile, 1996.
- Romero, H. & A. Garrido. 1985. Influencias genéticas del fenómeno El Niño sobre los patrones climáticos de Chile. Invest. Pesq. (Chile) 32: 19-35.
- Rose, G.A. & W.C. Leggett. 1991. Effects of biomass-range interactions on catchability of migratory demersal fish by mobile fisheries: an example of Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 48: 843-848.
- Royama, T. 1992. Analytical population dynamics. Chapman & Hall, London, UK.
- Rutllant, J., H. Fuenzalida, R. Torres & D. Figueroa. 1998. Interacción océanoatmosfera-tierra en la Región de Antofagasta (Chile, 23°S): Experimento DICLIMA. Revista Chilena de Historia Natural 71: 405-427.
- **SAG. 1963-1977.** Anuarios Estadísticos de Pesca. Servicio Agrícola y Ganadero, Ministerio de Agricultura, Chile.
- Santander, H. & R. Flores. 1983. Los desoves y distribución larval de cuatro especies pelágicas y sus relaciones con las variaciones del medio ambiente marino frente al Perú. FAO Inf. Pesca, (292) Vol. 3 : 835-867.
- Schiller, A., C. T. Hunsaker, M. A. Kane, A. K. Wolfe, V. H. Dale, G. W. Suter, C. S. Russell, G. Pion, M. H. Jensen, and V. C. Konar. 2001. Communicating ecological indicators to decision makers and the public. Conservation Ecology 5(1):19. Available only on the Internet: http://www.consecol.org/vol5/iss1/art19.
- Schwartzlose, R., J. Alheit, A. Bakun, T. Baumgartner, R. Cloete, R. Crawford, W. Fletcher, Y. Green-Ruiz, E. Hagen, T. Kawasaki, D. Lluch-Belda, S. Lluch-Cota, A. MacCall, Y. Matsuura, M. Nevarez-Martínez, R. Parrish, C. Roy, R. Serra, K. Shust, M. Ward & J. Zuzunaga. 1999. Worldwide large-scale fluctuations of sardine and anchovy populations. S. Afr. J. mar. Sci. 21, 289-347.
- Sepúlveda, A., L. Cubillos & D. Arcos. 2003. Pesquerías pelágicas chilenas: una síntesis sobre la incertidumbre biológica. *In*: Actividad Pesquera y de Acuicultura en Chile, E. Yáñez (Ed.), Escuela de Ciencias del Mar, PUCV, Valparaíso, 91-107
- **SERNAPESCA. 1978-2002.** Anuarios Estadísticos de Pesca. Servicio Nacional de Pesca, Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, Chile.

- Serra, R., P. Cury & C. Roy. 1998. The recruitment of the Chilean sardine (Sardinops sagax) and the optimal environmental window. In: Global versus local changes in upwulling system. M. Durand, P. Cury, R. Mendelssohn, C. Roy, A. Bakun & D. Pauly. (eds). ORSTOM Editions, Paris, 267-274.
- Serra, J., O. Rojas, M. Aguayo, F. Hinostroza & J. Cañon. 1979. Anchoveta (*Engraulis ringens*) In: Estado actual de las principales pesquerías nacionales. Bases para un desarrollo pesquero. CORFO. Gerencia de Desarrollo. Instituto de Fomento Pesquero (AP-79-18): 52.
- Serra, R. & I. Tsukayama. 1988. Sinopsis de datos biológicos y pesqueros de Sardinops sagax en el Pacífico suroriental. FAO Sinop. Pesca, 13 (1), 60 p.
- Serra, R. 1983. Changes in the abundance of pelagic resources along the chilean coast. FAO Fish. Rep., (291) Vol. 2: 255-284.
- Serra, R. 1991. Important life history aspects of the Chilean jack mackerel, *Trachurus symmetricus murphyi*. Invest. Pesq. (Chile) 36: 67-83.
- Serra, R. & C. Canales. 2003. Investigación evaluación de stock de anchoveta y sardina española, 2003. (I y II Región). Informe Final IFOP-SUBPESCA.
- Serra, R., C. Canales & G. Böhm. 2004. Investigación CTP anchoveta y sardina española I y II Región, 2005, Fase 1. Informe Final IFOP-SUBPESCA.
- Shaffer, G., O. Pizarro, L. Djurfeldt, S. Salinas & J. Rutllant. 1997. Circulation and low-frequency variability near the Chilean coast: Remotely forced fluctuations during the 1991-92 El Niño. J. Phys. Oceanogr., 27: 217-235.
- Shaffer, G., S. Hormazabal, O. Pizarro & S. Salinas. 1999. Seasonal and interannual variability of currents and temperature over the slope of central Chile. Journal Geophysical Research, 104, C12, 29,951-29,961.
- Sharp, G. 1979. The physiological ecology of tunas. Academic Press, London, New York, San Francisco, 506 pp.
- Silva, C., K. Nieto, M.A. Barbieri & E. Yánez. 2002. Expert systems for fishing ground prediction models: A management tool in the Humboldt ecosystem affected by ENSO. Invest. Mar., Valparaíso, 30(1): 201-202.
- Silva, N & H. A. Sievers. 1981. Masas de agua y circulación en la región de la rama costera de la corriente de Humbolt latitudes 18°S-33°S(Operación Oceanográfica MARCHILE X-ERFEN I). Ciencia y Tecnología del Mar, CONA, 5: 5-50.
- Silva, N & H. Know. 1975. Contribución al conocimiento de las masas de aguas en el Pacifico Sudoriental. Expedición KRILL. Crucero 3-4. Julio-Agosto 1974. Rev. Com. Perm. Pacifico Sur, 3: 63-75.
- Silva, N. & R. Rojas. 1984. Presencia del fenómeno El Niño 1982/1983 frente a la costa norte de Chile. Rev. Com. Perm. Pacífico Sur, 15: 121-140.
- Silva, N. & S. Neahyba. 1979. On the southermost extension of the Peru-Chile Undercurrent. Deep-See Res., 26A: 1387-1393.
- Stenseth, N.C., O.N. Bjørnstad, W. Falck, J.M. Fromentin, J. Gjøsæter & J.S. Gray, J.S. 1999. Dynamics of coastal cod populations: intra- and intercohort densitydependence and stochastic processes. Proc. R. Soc. Lond. B. 266, 1645-1654.
- Strub, P. T., J. M. Mesías, V. Montecinos, J. Rutllant & S. Salinas. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. Coastal segment (6,E). *In*: The Global Coastal Ocean: Regional Studies and Synthesis, A.R. Robinson & K.H. Brink (Eds.), The Sea Volumen 11, John Wiley and Sons, Inc., 29-67.

- Tanco, R.A. & G.J. Berri. 2000. CLIMLAB2000 (versión 1.1.0) Manual: A Statistical Software Package for Climate Applications. International Research Institute for Climate Prediction, 55 pp.
- **Thomas, A.C., F. Huang, P.T. Strub, & C. James. 1994.** Comparison of the seasonal and interannual variability of phytoplankton pigment concentration in the Peru and California Current systems. Journal Geophysical Research 99, 7355–7370.
- Thomas, A.C., J.L. Blanco, M.E. Carr, P.T. Strub & J. Osess. 2001. Satellite-measured chlorophyll and temperature variability off northern Chile during the 1996-1998 La Niña and El Niño. J. *Geophys. Res.*, 106, 899-915, 2001.
- Trenberth, K.E. & J.W. Hurrel. 1994. Decadal atmospheric-ocean variations in the Pacific. Climate Dynamic 8: 303-309.
- Ulloa, O., Escribano R, Hormazabal S, Quiñones R, González R & Ramos M. 2001. Evolution and biological effects of the 1997-98 El Niño in the upwelling ecosystem off northern Chile. Geophys. Res. Lett. 28: 1591–1594.
- White, W. & A.E. Walter. 1974. Time and depth scales of anomalous subsurface temperatures of Ocean Weather Stations P, N and V in the Notrh Pacific. Geophys. Res. 79: 4517-4522.
- Wyrtki, K. 1964. The termal structure of the Eastern Pacific Ocean. Deutschen Hydrographishen Zeiscritf, 6 Supplement, 84 pp.
- Yáñez, E. 1989. Fluctuaciones de los principales recursos pelágicos explotados en la zona norte de Chile y variaciones ambientales asociadas. Revista Pacífico Sur (Número Especial, 509-519.
- Yáñez, E. 1998. Fluctuations des principaux stocks de poissons pélagiques exploités au Chili et leurs relations avec les variations de l'environnement. Thèse Doctorat en Océanologie (Ph.D), Université de Bretagne Occidentale, Institut Universitaire Européen de la Mer, Brest, France, 303 p.
- Yáñez, E. & M.A. Barbieri. 1988. Principal pelagic resources exploited in northern Chile and their relationship to environmental variations. *In*: Long Term Changes in Marine Fish Populations, T. Wyatt & M.G. Larrañeta (eds.), Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo, España, 197-219.
- Yáñez E., M.A. Barbieri, A. González, O. Pizarro, M. Bravo, C. Canales & S. Salinas. 1994. Sea surface thermal structure associated to the pelagic fish resources distribution in northern Chile. *In*: Remote Sensing for Marine and Coastal Environments: Needs, Solutions and Applications. ERIM, USA, Vol. II, 149-162.
- Yáñez, E., M.A. Barbieri & C. Silva. 2003. Fluctuaciones ambientales de baja frecuencia y principales pesquerías pelágicas chilenas. *In*: Actividad Pesquera y de Acuicultura en Chile, E. Yáñez (Ed.), Escuela de Ciencias del Mar, PUCV, Valparaíso, 109-121.
- Yáñez E., M.A. Barbieri, C. Silva, J. Castillo, K. Nieto, G. Böhm, F. Gómez & J. Cordova. 2002a. Climate variability and pelagic fisheries in the South-Eastern Pacific. Invest. Mar., Valparaíso, Vol. 30(1): 175-177 & Globec International Newsletter, Vol. 8, N° 2: 18-19.
- Yáñez, E., M.A. Barbieri, C. Silva, K. Nieto & F. Espíndola. 2001. Climate variability and pelagic fisheries in northern Chile. Progress in Oceanography 49, 581-596.
- Yáñez, E., M.A. Barbieri, C. Silva, J. Castillo, K. Nieto G. Böhm, F. Gómez & J. Córdova. 2001. Climate variability and pelagic fisheries in the South-East Pacific. Invest. Mar., Valparaíso, Vol. 30 (1): 175-177.

- Yáñez, E., V. Catasti, M.A. Barbieri & G. Böhm. 1996. Relaciones entre la distribución de recursos pelágicos pequeños y la temperatura superficial del mar registrada con satélites NOAA en la zona central de Chile. Invest. Mar., Valparaiso, 24: 107-122.
- Yáñez, E., M. García & M.A. Barbieri. 1998. Pelagic fish stocks and environmental changes in the south-east Pacific. *In*: Global versus local changes in upwelling systems. M. Durand, P. Cury, R. Mendelssohn, C. Roy, A. Bakun & D. Pauly. (Eds.). ORSTOM Editions, Paris, 275-291.
- Yáñez, E., A. González & M.A. Barbieri. 1995. Estructura térmica superficial del mar asociada a la distribución espacio-temporal de sardina y anchoveta en la zona norte de Chile entre 1987-1992. Invest. Mar., Valparaíso, 23: 123-147.
- Zhang, Y., J.M. Wallace, & D.S. Battisti. 1997. ENSO-like Interdecadal Variability: 1900-93. J. Climate, 10, 1004-1020.

# FIGURAS PROYECTO

# "ANÁLISIS INTEGRADO HISTÓRICO AMBIENTE – RECURSOS, I – II REGIONES"

PROYECTO FIP N° 2003 – 33



Figura 4. Desembarques anuales de a) anchoveta y b) sardina en Perú y norte de Chile (1950-2002). Las flechas indican eventos El Niño, los números la intensidad y los signos de interrogación grandes cambios en las pesquerías.



Figura 5. Desembarques anuales de a) anchoveta, b) sardina y c) jurel en el norte de Chile (1951-2002).



Figura 6. Desembarques mensuales de a) anchoveta, b) sardina y c) jurel en el norte de Chile, suavizados con un promedio móvil de 12 meses centrados.

"ANÁLISIS INTEGRADO HISTÓRICO AMBIENTE – RECURSOS, I – II REGIONES" FIP 2003-33



Figura 7. CPUE anual de anchoveta en 1987-2002: CPUE1 (t/vcp) estandarizada con MLG; CPUE2 (t/vcp) estandarizada con el método de Robson; y CPUE3 (t/m<sup>3</sup>) estandarizada con la capacidad de bodega (m<sup>3</sup>).



Figura 8. CPUE mensuales de anchoveta en 1963-76 (Yáñez, 1989), suavizadas con un promedio móvil de 12 meses centrados.



Figura 9. CPUE mensuales en 1973-2002 de a) anchoveta (referida a barcos de 290-390 m<sup>3</sup>), b) sardina (referida a barcos de 290-390 m<sup>3</sup>) y c) jurel (referida a barcos de 240-400 m<sup>3</sup>) en el norte de Chile, suavizadas con un promedio móvil de 12 meses centrados.



Figura 10. Biomasa estimada por APV y CPUE estándar de a) anchoveta (1984-2002) y b) sardina (1974-2002).



Figura 11. Esfuerzo de pesca en viajes con pesca estándar (VCPE) de a) anchoveta (1973-2002) y b) sardina (1976-2002), suavizados con un promedio de 12 meses.



Figura 12. Relación entre la CPUE y la biomasa de anchoveta estimada por el método de producción de huevos (BMPH) (escalados a un máximo de 1). CPUE 1: ton/vt (MLG; GTE IMARPE-IFOP, 2004); CPUE 2: ton/vcp (MLG); CPUE 3: ton/vcp (Robson); CPUE 4: ton/CB.



Figura 13. Estacionalidad de la CPUE y del desembarque de anchoveta, sardina y jurel. Los periodos seleccionando no consideran vedas extractivas.



Figura 14. Espectros Wavelet de las series mensuales normalizadas del desembarque de anchoveta (panel superior) en el periodo 1963-2002 y de la CPUE de anchoveta (panel inferior) en el periodo 1973-2002. Las líneas horizontales segmentadas corresponden a 2, 4, 8, 16, 32 y 64 años. La línea negra continua y curvada, en la derecha e izquierda de cada panel, indica el cono de influencia de cada serie. Los tonos rojos (azules) indican mayor (menor) varianza.


Figura 15. Análisis de correlación y diagramas de dispersión entre las series anuales de variables bio-pesqueras: DESANC = desembarque de anchoveta (1950-2002); DESSAR = desembarque de sardina (1950-2002); DESJUR = desembarque de jurel (1950-2002);
CPUANC = CPUE de anchoveta (1957-2002); CPUSAR = CPUE de sardina (1973-2002); CPUJUR = CPUE de jurel (1973-2002); BANC = biomasa de anchoveta (1984-2002);
RANC = reclutamiento de anchoveta (1984-2002); y BSAR = biomasa de anchoveta (1974-2002).



Figura 16. Variación mensual de: a) índice de turbulencia (IT); b) transporte de Ekman (TE); c) temperatura superficial del mar (TSM); d) temperatura del aire (TA); y e) nivel medio del mar (NMM) (estimada con datos de estaciones costeras de Antofagasta).



Figura 17. Anomalías mensuales de variables ambientales medidas en estaciones costeras de Antofagasta en el periodo 1950-2002. En rojo los promedios móviles de 13 meses centrados.



Figura 18. Anomalías mensuales de los índices ambientales IOS, PDO, Niño 1+2 y Niño3.4 en el periodo 1950-2002. En rojo los promedios móviles de 13 meses centrados.



Figura 19. Espectros de Wavelet de las series mensuales normalizadas del IOS (panel superior), del CTI (panel central-superior), del Teq (panel central-inferior) y de la TA en Antofagasta (panel inferior), en el período 1919-2002. Las líneas horizontales segmentadas corresponden a 2, 4, 8, 16, 32 y 64 años. La línea negra continua y curvada, en la derecha e izquierda de cada panel indica el cono de influencia de cada serie. Los tonos rojos (azules) indican mayor (menor) varianza.



Figura 20. Variabilidad interdecadal de la TA en Antofagasta comparada con el IOS (panel superior), Teq (panel central) y CTI (panel inferior). A las series anuales se les extrajo la tendencia lineal del periodo y se filtraron con un promedio móvil de 5 años pasado dos veces.



Figura 21. Espectro de Wavelet de las series mensuales normalizadas de la TA (panel superior), la TSM (panel central-superior), el NMM (panel central-inferior) y el TE (panel inferior), en el período 1950-2002. Las líneas horizontales segmentadas corresponden a 2, 4, 8, 16, 32 y 64 años. La línea negra continua y curvada, en la derecha e izquierda de cada panel indica el cono de influencia de cada serie. Los tonos rojos (azules) indican mayor (menor) varianza.



Figura 22. Variabilidad interdecadal de la TA y la TSM en Antofagasta (panel superior), del NMM en Antofagasta y de la Zb (panel central), y del TE y el IT en Antofagasta (panel inferior). A las series anuales se les extrajo la tendencia lineal del periodo y se filtraron con un promedio móvil de 5 años pasado dos veces.



Figura 23 . Ciclo estacional del desembarque de anchoveta y profundidad de la capa de mezcla (PCM) frente a Antofagasta, obtenida a partir del criterio 0,5°C. La PCM es estimada a partir de data histórica de cruceros oceanográficos.



Figura 24. Desembarque de sardina en función del esfuerzo de pesca y del transporte de Ekman en el norte de Chile (1973-2002).



Figura 25. CPUE de sardina en función del esfuerzo de pesca y del transporte de Ekman en el norte de Chile (1973-2002).



Figura 26. Esfuerzo de pesca de sardina (1973-2002) y turbulencia (1950-2002) en función del transporte de Ekman en el norte de Chile.



Figura 27. Reclutamiento de anchoveta en función de la biomasa y del transporte de Ekman en el norte de Chile (1984-2002).



Figura 28. Biomasa de anchoveta y esfuerzo de pesca en función del transporte de Ekman en el norte de Chile (1984-2002).



Figura 29. Desembarque de anchoveta en función del esfuerzo de pesca en el norte de Chile (1957-2002).



Figura 30. EOF de series de tiempo: captura, esfuerzo, transporte de Ekman y turbulencia para anchoveta (arriba); y reclutamiento, biomasa, TSM y transporte de Ekman para sardina (abajo).



Figura 31. Fase temporal de la primera componente principal compleja (panel superior) de las series suavizadas y normalizadas (por la desviación estándar) del desembarque de anchoveta y sardina, TSM, NMM, Zb, TA, TE e IT en el periodo 1960-98. Los paneles inferiores muestran la comparación entre las series observadas (línea azul-sólida) y las reconstruidas a partir de primer modo complejo (línea roja-segmentada). Ambas se muestran como anomalías normalizadas.



Figura 32. Desembarques anuales (en millones de toneladas) de anchoveta y sardina en el norte de Chile (panel superior). Las líneas finas indican lo valores anuales, mientras que las líneas gruesas indican las series filtradas con un promedio móvil de 5 años pasado dos veces. En el panel inferior se muestra el diagrama de las series suavizadas de anchoveta y sardina entre 1968 y 1998.



Figura 33. Primera componente principal (panel superior) de las series suavizadas y normalizadas (por la desviación estándar) de TSM, NMM, Zb y TA en el periodo 1960-98. En el panel inferior se muestra el primer vector propio como la correlación de la primera componente principal y las series respectivas.



Figura 34. Primera componente principal (panel superior) y segunda componente principal (panel central) de las series suavizadas y normalizadas (por la desviación estándar) del índice ambiental (ver Fig. 32), y los desembarques de anchoveta y sardina en el periodo 1960-98. En el panel inferior se muestra el diagrama de dispersión entre el primer y segundo vector propio, como la correlación de las respectivas componentes principales y las series respectivas.



Figura 35. Esfuerzos anuales de pesca de anchoveta y sardina (panel superior) y esfuerzo total aplicado a ambas especies (panel inferior).



Figura 36. Comparación entre la segunda componente principal (línea azul) de las series suavizadas y normalizadas (por la desviación estándar) del índice ambiental (ver Fig. 32), y los desembarques de anchoveta y sardina en el periodo 1960-98 (ver Fig. 33) y el esfuerzo anual total suavizado (línea roja).



Figura 37. Esquema conceptual de la relación entre los desembarques de anchoveta y sardina, y las fluctuaciones del ambiente y el esfuerzo total de pesca en el norte de Chile.

## PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

A N C H O V E T A								
S A R D I N A								
IVC	0,49	0,42	0,53	0,54	0,25	0,59	0,68	0,77
AÑOS	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
A N C H O V E T A								
S A R D I N A								
IVC	0.59	0.56	0.66	0.54	0.55	0.68	0.54	0.58
AÑOS	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002

Figura 38. Cartografías anuales de CPUE de anchoveta y sardina del período 1987-02, con sus respectivos Índices V de Cramer (IVC).



Figura 39. Área de distribución espacial para a) anchoveta, b) sardina y c) jurel en grados<sup>2</sup>.



Figura 40. Latitud de los CG anuales de anchoveta, sardina y jurel entre 1987 y 2002.



Figura 41. Latitud y longitud de los CG anuales de a) anchoveta, b) sardina y c) jurel (1987 y 2002).



Figura 42. Modos espacial y temporal del primer componente principal de la CPUE anual de anchoveta, sardina y jurel.



Figura 43. Modos espacial y temporal del segundo componente principal de la CPUE anual de anchoveta, sardina y jurel.



Figura 44. Señal anual de las cartografías de CPUE de a) anchoveta, b) sardina y c) jurel del período 1987-02.



Figura 45. Gráfico anual y mensual de Sa de anchoveta en la zona norte de Chile.



Figura 46. Cartografía de la Sa de anchoveta en la zona norte de Chile en el periodo 1994-01.



Figura 47. Sa y CPUE anual de anchoveta en el periodo 1994-01.



Figura 48. Sa y CPUE diario de anchoveta en septiembre de 1994



Figura 49. Número de estaciones de muestreo de huevos de anchoveta (a), número promedio de huevos en ET y  $E^+(b)$ .



Figura 50. Variación anual de la CPUE de anchoveta y el PET. La líneas punteadas señalan tendencia.



Figura 51. Distribución espacial y temporal de estaciones positivas de huevos de anchoveta en el período 1995–2002.



Figura 52. Distribución espacial y temporal de los huevos de anchoveta, interpolada con kriging, en el período 1995-2002.



Figura 53. Imágenes promedios anuales de la TSM satelital en la zona norte de Chile (1987-2002).





Figura 55. Latitud/tiempo de las imágenes de la ATSM mensual, centradas 6 mn frente a la costa (1987 – 2002).



Figura 56. Latitud/tiempo de las imágenes de la ATSM mensual, centradas 80 mn frente a la costa (1987 – 2002).



Figura 57. Modos espacial y temporal de los a) PC1 y b) PC2 de la TSM anual.



Figura 58. Climatología mensual de las imágenes de TSM satelital de la zona norte de Chile (1987-2002).



Figura 59. Climatología estacional de las imágenes de TSM satelital de la zona norte de Chile (1987-2002).



Figura 60. Estacionalidad de la TSM mensual en la zona costera (6 mn) durante: a) 1987-1994 y b) 1995 – 2002.

|--|

Figura 61. Localización de los perfiles costero y oceánico.



Figura 62. Hovmoller de las imágenes de TSM semanales centrado 6 mn frente a la costa y en el período 1987 – 2002.



Figura 63. Hovmoller de las imágenes de GRT semanal centrado 6 mn frente a la costa y en el período 1987 – 2002.



Figura 64. Hovmoller de las imágenes de TSM semanal centrado 80 mn frente a la costa y en el período 1987 – 2002.



Figura 65. Hovmoller de las imágenes de ATSM mensual centrado 6 mn frente a la costa y en el período 1987 – 2002.



Figura 66. Hovmoller o de las imágenes de TSM mensual centrado 6 mn frente a la costa y en el período 1987 – 2002.



Figura 67. Hovmoller de las imágenes de ATSM mensual centrado 80 mn frente a la costa y en el período 1987 – 2002.



Figura 68. Hovmoller de las imágenes de TSM mensual centrado 80 mn frente a la costa y en el período 1987 – 2002.



Figura 69. Modos espacial y temporal de los componentes a) PC1, b) PC2 y c) PC3 de la ATSM mensual.



Figura 70. Clorofila satelital promedio para el área de estudio. El promedio se obtuvo con datos satelitales de clorofila con una resolución temporal de un día y una resolución espacial nominal de 9 km, para el periodo enero-junio de 1997 (OCTS) y septiembre de 1997 - diciembre de 2003 (SeaWIFS). Los datos diarios grillados fueron interpolados previamente mediante una interpolación en tres dimensiones (latitud, tiempo y espacio), mediante el método de inverso a la distancia.



Figura 71. Series de tiempo de clorofila satelital diaria correspondiente a la zona costera (entre la costa y 60 km) para la zona de Arica (18-19°S), Iquique (20-21.5°S) y Antofagasta (22.5-24°S).


Figura 72. Series de tiempo de clorofila satelital diaria correspondiente a la zona oceánica (entre 100 y 200 km de la costa) para la zona de Arica (18-19°S), Iquique (20-21.5°S) y Antofagasta (22.5-24°S).



Figura 73. Espectro de wavelet de las series de tiempo de clorofila satelital diaria correspondiente a la zona costera (a y b) y oceánica (c y d) frente a Iquique y Antofagasta respectivamente. Las líneas horizontales segmentadas indican periodos de 64, 90, 128, 182.5, 365 y 730 días. La línea negra, continua y curvada, en la derecha e izquierda de cada panel, indica el cono de influencia de los extremos de la serie. Las series fueron previamente normalizadas de tal forma de mantener una misma escala de color.



Figura 74. Distribución superficial de la clorofila\_a satelital, correspondiente al promedio del trimestre enero-marzo, abril-junio, julio-septiembre y octubre–diciembre del periodo 1997-2003.



Figura 75. Ciclo anual característico de la clorofila\_a satelital (OCTS, SeaWIFS), correspondiente a la serie de tiempo costera (entre la costa y 60 km; línea continua) y oceánica (entre 100 y 200 km de la costa; línea segmentada ) para la zona de Arica (18-19°S), Iquique (20-21.5°S) y Antofagasta (22.5-24°S). El ciclo anual característico fue obtenido mediante el ajuste de los armónicos de 365, 365/2, 365/3 y 365/4 días. La escala del ciclo anual para la zona costera (oceánica) se encuentra a izquierda (derecha).



Figura 76. Series de tiempo del esfuerzo del viento satelital (ERS1/2 y QuickSCAT), correspondiente al píxel de 1x1 mas cercano a la costa, frente a Arica, Iquique y Antofagasta.



Figura 77. Espectro de wavelet del esfuerzo del viento satelital (ERS1/2 y QuickSCAT), para el píxel mas cercano a la costa en la zona de Arica (panel superior), Iquique (panel del medio) y Antofagasta (panel inferior). Las líneas horizontales segmentadas indican periodos de 64, 90, 128, 182.5, 365 y 730 días. La línea negra, continua y curvada, en la derecha e izquierda de cada panel, indica el cono de influencia de los extremos de la serie.



Figura 78. Ciclo anual característico del esfuerzo del viento satelital (ERS1/2 y QuickSCAT), correspondiente a la serie de tiempo del píxel más cercano a la costa en la zona de Arica, Iquique y Antofagasta. El ciclo anual característico fue obtenido mediante el ajuste de los armónicos de 365, 365/2, 365/3 y 365/4 días.



Mapa de Máxima Correlación Compleja

Figura 79. Mapa de la máxima correlación para la banda intraestacional (30-90 días) en el periodo de invierno, obtenida desde la correlación compleja entre las series de tiempo del esfuerzo del viento sobre la superficie del mar frente a Chile (esfuerzo promedio de los datos presentes en la caja limitada entre 28.5°-35.5°S y 70.5-74.5°W) y el esfuerzo del viento sobre el resto del océano Pacifico tropical y Pacifico sur. Solo se presentan resultados significativos sobre un 99% (correlación sobre 0.3), donde la longitud del vector y su dirección dan la magnitud de la correlación y el ángulo de fase. La flecha sobre el sur de Sudamérica entrega la escala de la correlación igual a 1.0 (figura adaptada de Hormazabal *et al.*, 2002).



Figura 80. a) Campo superficial de corrientes geostroficas (flechas negras) y clorofila\_a (en colores) satelital, correspondientes al 16 de mayo del 2003. b) campo superficial de clorofila\_a, c) temperatura superficial del mar, y d) campo superficial de la anomalía geopotencial referida a 500 db, obtenidas durante la campaña de mediciones del FIP 2003-01, realizada en la época de otoño del 2003 (figuras adaptadas del informe de avance del proyecto FIP 2003-01). El campo superficial de corrientes geostroficas fue obtenido mediante datos satelitales (ERS2 y TOPEX Poseidón) siguiendo la metodología descrita en Hormazabal et al., 2004.



Figura 81. Diagrama esquemático del modelo SIG aplicado para generar las bases datos espacio-temporal ambiente – recursos.



Figura 82. Series de tiempo de la pesquería de anchoveta (desembarques, esfuerzo y CPUE) y variables ambientales (ATSM, GRT, DC, Clorofila, PCM), correspondientes a los promedios de las cuadrículas de 10\*10 mn extraídas.



Figura 83. Huevos y larvas de anchoveta y variables ambientales (ATSM, GRT, DC, Clorofila), correspondientes a los promedios de las cuadrículas de 10\*10 mn extraídas.



Figura 84. Sa de anchoveta y variables ambientales (ATSM, GRT, DC, Clorofila), correspondientes a los promedios de las cuadrículas de 10\*10 mn extraídas.



Figura 85. Series de tiempo de la pesquería de sardina (desembarques, esfuerzo y CPUE) y variables ambientales (ATSM, GRT, DC, Clorofila, PCM), correspondientes a los promedios de las cuadrículas de 10\*10 mn extraídas.



Figura 86. Sa de sardina y variables ambientales (ATSM, GRT, DC, Clorofila), correspondientes a los promedios de las cuadrículas de 10\*10 mn extraídas.



Figura 87. Series de tiempo de la pesquería de jurel (desembarques, esfuerzo y CPUE) y variables ambientales (ATSM, GRT, DC, Clorofila), correspondientes a los promedios de las cuadrículas de 10\*10 mn extraídas.



Figura 88. Ciclos anuales característicos de la CPUE de anchoveta, sardina y jurel y variables ambientales (TSM, GRT, DC y clorofila) asociadas a las capturas. Los ciclos anuales fueron obtenidos considerando dos escenarios ambientales, durante eventos El Niño (1987, 1992 y 1997-98) y años Normal/La Niña (1988-1991, 1993-1996, 1999-2002).



Figura 89. Primeros dos ejes del ACP, basado en los datos oceanográficos del periodo 19987-02. Las variables continuas activas en negro, las nominales ilustrativas que corresponden a las especies en rojo y en azul las nominales ilustrativas que corresponden a la estación.



Figura 90. Cartografía de la distribución espacial de las cuadrículas más visitadas y de la CPUE de anchoveta de la clase 1 en el periodo 1997-98.



Figura 91. Cartografía de la distribución espacial de las cuadrículas más visitadas y de la CPUE de anchoveta de la clase 1 en el periodo 1999-02.



Figura 92. Distribución de las clases encontradas con el análisis jerárquico en el plano factorial. Las variables activas en color negro, clase: verde; clase 2: rojo; clase 3: amarillo; clase 4: azul.

Clase 1	Clase 4			
0 00 0000 Arica	ocoo Arica		clase 1	clase 4
000000		lat	-19.98	-20.71
o <sup>00</sup> disagu	Pisague	long	-70.78	-70.59
O O quiqu	quique	cpue	16	15
ိ ွိ ၀ွရွ		tsm	16.44	17.36
o 8	• •§}	ha	23	8
		gr	0.76	1.28
Tocop O d	Тосорі	atsm	-0.63	0.40
8	00	dc	36.49	23.13
Méjillones C		cloa	1.08	1.13
Antofaga	Antofagas			

Figura 93. Cartografía de las clases 1 y 4 encontradas con el análisis jerárquico y los respectivos promedios de los parámetros que las componen.

Clase 2	Clase 3			
0 O Arica	O Arica			
0	00		clase 2	clase 3
O L Pisagu		lat	-20.53	-20.45
o		long	-70.28	-70.76
oj	8889	cpue	19	19
°02		tsm	16.11	16.47
⊖_oa		ha	106	31
) Tocop	О} ,/Тосорі	gr	0.54	0.39
Į	•	atsm	-0.64	-0.68
Mejillones	Méjillones	dc	10.96	40.15
Antofaga	Antofagas	cloa	3.19	0.84

Figura 94. Cartografía de las clases 1 y 4 encontradas con el análisis jerárquico y los respectivos promedios de los parámetros que las componen.



Figura 95. a) Indice de la oscilación del sur y anomalía de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4; b) espectro de potencias de wavelets correspondiente a la componente a lo largo de la costa de la corriente subsuperficial Perú-Chile, medida frente a Coquimbo (30°S); y c) diferencia de fase obtenida del espectro cruzado de wavelets entre la componente paralela a la costa de la corriente subsuperficial Peru-Chile (flujo hacia el polo) y el nivel del mar en Caldera. Solo la fase de coherencias significativas han sido graficadas. Figuras modificadas de Hormazabal *et al.* (2003).



Figura 96. Componente paralela a la costa de la corriente subsuperficial Perú-Chile observada frente a Coquimbo (línea continua) y modelada (línea segmentada). Las corrientes corresponden a la banda de 140-520 días. Figuras modificadas de Hormazábal *et al.* (2003).





Figra 97. Fluctuaciones diarias del nivel del mar en Arica y Antofagasta (panel superior). Evolución temporal de los perfiles verticales de temperatura y su anomalía frente a la zona de iquique. Figura adaptada de Thomas *et al.* (2001).



Figura 98. Series de tiempo de la profundidad de la isoterma de 20°C a 110°W en el Ecuador (valores diarios) y de la isoterma de 15°C frente a Iquique (cruceros aproximadamente mensuales). Series de tiempo del promedio de la distribución vertical de anchoveta, su índice de determinación (ID en t/mn<sup>2</sup>) e índice de cobertura (IC en %), obtenidos de cruceros hidroacústicos de prospección de anchoveta en la zona norte de Chile.





Figura 99. Series de tiempo de los índices de abundancia de anchoveta disponibles en la literatura comparadas con las capturas (línea contínua). Ver Tabla 12 para la descripción y fuente.



Figura 100. Series de tiempo de la abundancia de anchoveta disponibles en la literatura comparadas con las capturas (línea continua). Ver Tabla 14 para la descripción y fuente.



Figura 101. Indices de abundancia de anchoveta en el periodo más reciente. El asterisco se refiere al índice deducido en este proyecto.



Figura 102. Tasa de incremento per cápita en función de la abundancia del año anterior (estructura de retroalimentación de dimensión 1). Se utiliza el índice CPUE (t/vt) del GTE (2002).



Figura 103. Función R basada en la CPUE (t/vt) en función de la CPUE del año anterior (estructura de retroalimentación de dimensión 1).



Figura 104. Relación stock-recluta del stock sur de Perú-Norte de Chile de anchoveta en el periodo 1984-2002. Fuente: datos del GTE (2002).



Figura 105. Relación stock-recluta del stock Sur de Perú-Norte de Chile de anchoveta incorporando el índice de oscilación del sur.



Figura 106. Relación stock-recluta del stock Sur de Perú-Norte de Chile de anchoveta incorporando el índice de surgencia primaveral (fase prerrecluta).



Figura 107. Relación stock-recluta del stock Sur de Perú-Norte de Chile de anchoveta incorporando el índice de turbulencia primaveral (fase prerrecluta).



Figura 108. Efecto parcial de la abundancia de reclutas (Rindex) y del stock adulto (N1) sobre la tasa de sobrevivencia del grupo de edad 1.



Figura 109. Fluctuaciones de las capturas en tres stocks de anchoveta a lo largo del sistema de corrientes de Humboldt.



Figura 110. Componente de fluctuación de baja frecuencia en las capturas en tres stocks de anchoveta a lo largo del sistema de corrientes de Humboldt. La línea de tendencia lineal se utiliza para comparar el componente de baja frecuencia contenido en las series (Figura 12).



Figura 111. Componentes de cambio de baja frecuencia (arriba) y de alta frecuencia (abajo) para tres stocks de anchoveta en el sistema de corrientes de Humboldt.


Figura 112. Relación entre el componente de fluctuación de baja frecuencia entre los stocks Sur de Perú-Norte de Chile (SP-NCh), centro-sur de Chile (CSCh) y el stock centro-norte de Perú.



Figura 113. Relación entre el componente de fluctuación de alta frecuencia entre los stocks Sur de Perú-Norte de Chile (SP-NCh), centro-sur de Chile (CSCh) y el stock centro-norte de Perú.



Figura 114. Componente de variación de alta frecuencia relacionado con las anomalías del índice Niño 1+2 durante la primavera del año anterior.



Figura 115. Modelo conceptual integrador de los fenómenos locales y de gran escala que afectan la zona norte de Chile y sus principales recursos pesqueros. Las flechas indican el sentido y magnitud de la influencia de los fenómenos.



Figura 116. Características ambientales y biopesqueras de tres periodos deducidos del análisis temporal interdecadal. El sentido de las flechas indica si los valores de las variables son altas ( ), bajas ( ), tendientes al alza ( ), y que se mantienen ().



Figura 117. Características ambientales y bio-pesqueras durante eventos El Niño y periodos normales-fríos.

VARIABILIDAD DIARIA-SEMANAL						
+ Surgencia	- Surgencia					
+ Vientos	- Vientos					
- Termoclina (somera)	+ Termoclina (profunda)					
+ Gradientes	- Gradientes - Productividad (dispersa)					
+ Productividad (concentrada costa)						
Primavera – Verano	Invierno					
Período frío de largo plazo favorable a la anchoveta:						
+ Concentración	- Concentración					
Período cálido de largo plazo favorable a la sardina:						
- Concentración	+ Concentración					

Figura 118. Características ambientales y bio-pesqueras en la escala diaria-semanal.

### **ANEXOS PROYECTO**

# "ANÁLISIS INTEGRADO HISTÓRICO AMBIENTE – RECURSOS, I – II REGIONES"

PROYECTO FIP N° 2003 – 33

Temática	Grupos	Institución	Escalas	Resolución	Bases de datos	Actividades Metodológicas		Plazo
de estudio	de trabajo							
	A. Montecinos	UDEC	Decadal		Serie SHOA-SMCH(50-02)	<u>Análisis Temporal</u>		
	S. Hormazábal	UDEC			Indices climáticos (50-02)	1 Recuperar Series tiempo mes/año estac. Costeras: TSM y NM (1946-02), TA (1919-02), Vto (1950-02)	EY,FG,AM,CS	31-Jul-04
	O. Pizarro	UDEC			SAT (87-02)	IOS y PDO (50-02), Niño 1-2 y 3-4 (50-02)=> Analisis estadísticos:		
Variabilidad	E. Yáñez	PUCV	Interanual	mes	Cruceros oceanográficos (65-00)	2 Tendencias, anomalias, Tpo (Corr,Cros-corr,FOE), Frec (Espect,coh-fase), Tpo-Fre (Wavelet, crosswa,w rot), Espac-tempo (FOE, FOE ext, SVD)	EY,FG,AM,OP	30-Ago-04
Ambiental	C. Silva	PUCV	Estacional	año		3 Series de tiempo y modelos numéricos	SH,OP,AM	30-Ago-04
	F. Gómez	PUCV	Intra-estacion	decada		Análisis Espacio - Temporal		
						<ol> <li>Recuperar Series tiempo sem/mes/año imágenes satelitales: TSM, Cloa, Vtos, Corrientes Geostrof=&gt; Analisis estadisticos:</li> </ol>	SH,FE,CS,FG	31-Jul-04
						5 Tpo-Fre (Wavelet) Espacio-temporal (FOE)	SH,FE,CS,FG	30-Ago-04
			Mesoescala			6 Análisis Variaciones columna de agua: Capa Mezcla, Termoclina y Surgencia	AV,NS,JC	30-Ago-04
						7 Identificación surgencia remolinos y meandros en imágenes de Corrientes geostroficas: Metodología Hormazabal et al.,	SH,CS	30-Ago-04
	S. Hormazabal	UDEC	Decadal		Satelital (87-02)	Análisis Temporal		
	F. Espindola	UDEC			Cruceros oceanográficos	8 Estandarización (mensual con Robson)	EY,FG	30-Jun-04
	A. Valdenegro	UDEC			Series SHOA y Cendoc	9 Recuperar Series de tiempo mes/año: Capt anual(50-02), CPUE mes(73-02) y dia(87-02), Abund VPA anual (74 sard y 84 anch),	EY,FG,CH	31-Jul-04
-	José Cañón	UDEC	Interanual		Hidroacústica (93-02)	Reclut VPA anual (74 sard y 84 anch), Abund Hidroacustica (¿?)		
C. Silva Corpeso		Corpesca	Estacional		Huevos y Larvas (94-02)	10 Tendencias-anomalias, Tpo (Corr,Cros-corr,FOE), Frec (Espect,coh-fase), Tpo-Fre (Wavelet, crosswa,w rot)		30-Ago-04
Variabilidad	E. Yáñez	PUCV	Intra-estacion	semana	Pesca (87-02)	11 Estandarización (Diaria con GLM)	EY,FE	30-Jun-04
Recursos	N. Silva	PUCV		mes	Indices climáticos (50-02)	13 Recuperar Series de tiempo mes/año: CPUE, Capt, Huevos-Larvas, Abund (VPA-Hidroac)	EY,FG,CH,AO	31-Jul-04
Pesqueros	A. Ordenes	PUCV		año		14 Tpo (Corr,Cros-corr,FOE), Frec (Espect,coh-fase), Tpo-Fre (Wavelet, crosswa,w rot)	SH,EY,FG	30-Ago-04
	F. Gómez	PUCV	Mesoescala			Análisis Espacio - Temporal		
	C.Hernández	PUCV				15 Elaborar Series de tiempo sem/mes/año Cartografía bio-pesqueras: CPUE, Huev-larv, Abund Hidroac=> Analisis estadísticos:	EY,FG,CH,AO	30-Ago-04
		PUCV				16 Tpo-Fre (Wavelet) Espacio-temporal (FOE)	EY,CS,FG,SH	30-Ago-04
								-
	S. Hormazabal	UDEC	Decadal		SAT (87-02)	Análisis Temporal		
	A. Valdenegro	UDEC			Cruceros oceanográficos	17Análisis visual series de tiempo	ET. AL	30-Nov-04
Relaciones	F. Espindola	UDEC			Hidroacústica (93-02)	18 Análisis estadísticos -temporal-: series temporales de VA vs VRP		
Ambiente	A. Ordenes	PUCV		dia	Huevos y Larvas (94-02)	Modelos-Softwares: CLIMPROD, GAM, GLM, CLIMLAB, FOE, Espectral, Cross-corr, Wavelets		30-Nov-04
Recursos			Interanual					
-			Estacional			Análisis Espacio - Temporal		
-		Intra-estacion 19Análisis visual cartografías		ET. AL	30-Nov-04			
	20 Análisis estadísticos -espacio temporal-: series de imágenes de VA vs VRP							
	C. Silva	PUCV			Pesca (87-02) Modelos-Softwares: GIS-IDRISI, CLIMLAB, Multi-Variado, FOE, Espectral, Cross-corr, Wavelets		EY,SH,CS,FG.AM	30-Nov-04
	F. Gómez	PUCV	Mesoescala			21 Relaciones estructuras mesoescala identificadas y abundancia rec. Pelág, o estadios tempranos de desarrollo		
	E.Yañez	PUCV				Multi-variado, geoestadística		30-Nov-04
						· · · ·		
				1				

TA	Temperatuara del Aire	R	Reclutamiento	Frec	Frecuencia
IOS	Indice de la Oscilación del Sur	GLM	Modelos lineales generalizados	Tpo-Fre	Tiempo y frecuencia
PDO	Oscilación Decadal del Pacífico	FOE	Funciones ortogonales empiricas	Abund	abundancia
IS	Indice de Surgencia	SVD	Singular Value Decomposition	anch	anchoveta
IT	Indice de Turbulencia	GAM	modelos aditivos generalizados	sard	Sardina
Capt	Captura	Vto	Viento	sem	Semana
CPUE	Captura por Unidad de Esfuerzo	Тро	Tiempo	SAT	Satelitales
VPA	Análisis de la Población Virtual				

## ANEXO 2. Estado del arte sobre investigación en la temática

#### A) DINÁMICA AMBIENTAL Y RECURSOS PELÁGICOS

Chile es uno de los principales países pesqueros a nivel mundial, con aproximadamente 5 millones de toneladas de capturas anuales en el período 1999-2002. Las especies pelágicas constituyen cerca del 90% de las capturas anuales, donde la pesquería pelágica de la zona norte de Chile (18°21′-24°00′S) contribuye con el 45% (valor promedio entre 1950-2002; SAG, 1957-1977; SERNAP, 1978-1994; SERNAPESCA, 1995-2002), lo cual la posiciona como la segunda área pesquera más importante del país. En esta zona, actualmente la pesquería se basa fundamentalmente en el recurso anchoveta (*Engraulis ringens*), y en menor medida en jurel (*Trachurus symetricus*), caballa (*Scomber japonicus*) y sardina (*Sardinops sagax*); especies que presentan importantes fluctuaciones anuales, interanuales e interdecadales (Yáñez *et al.*, 2001). La variabilidad temporal en la distribución y abundancia de estos recursos se vinculan en muchos casos a cambios del medio ambiente (procesos denso-independientes). Sin embargo, los procesos físicos involucrados en esta variabilidad aún no han sido definidos claramente y mucho menos las características del acoplamiento ambiente-recurso.

En distintas regiones del mundo, la surgencia generada por el esfuerzo del viento, las ondas de baja frecuencia, y los remolinos y meandros de mesoescala, han sido identificados como los principales responsables del equilibrio entre la fuente de nutrientes hacia la capa fótica y la producción primaria (Cipollini *et al.*, 2001; Uz *et al.*, 2001; McGillicudy *et al.*, 1999; Chávez *et al.*, 1998). Estos procesos físicos, que tienen diversas escalas espaciales y temporales, llevan aguas ricas en nutrientes hacia las capas iluminadas, contribuyendo de esta forma al incremento de la producción de fitoplancton disponible para el zooplancton y los peces. La alta productividad biológica observada en el Sistema de Corrientes de Chile-Perú (SCCHP), ha sido atribuida principalmente a la corriente sub-superficial de Perú-Chile, la cual transporta aguas ricas en nutrientes y pobres en oxígeno en dirección sur y a la persistente surgencia costera que produce el afloramiento de estas aguas hacia la capa superficial. Estudios realizados en este sistema de corrientes han identificado a las ondas atrapadas a la costa, ondas de Rossby, y remolinos y meandros de mesoescala, como los procesos físicos dominantes en la variabilidad de baja frecuencia en la región (Shaffer *et al.*, 1997; Hormazabal *et al.*, 2002 y 2004; Pizarro *et al.*, 2002). Sin embargo, el efecto de estos procesos físicos sobre la distribución y abundancia de los recursos pelágicos de la región aún es desconocido.

Una fracción importante de las fluctuaciones que se han observado a lo largo de la costa del Pacífico Suroriental, son forzadas en la zona ecuatorial. En esta región la atmósfera excita ondas de Kelvin oceánicas que se propagan a lo largo del ecuador con una velocidad de fase de 2,5 ms-1, tardando alrededor de dos a tres meses en cruzar la cuenca del Pacífico (McPhaden, 1999). Cuando estas ondas arriban a las costas de Sudamérica, el nivel del mar se incrementa, la termoclina se profundiza y la temperatura superficial del mar aumenta, siendo estos cambios más drásticos durante los eventos cálidos o El Niño (Cane, 1983; Philander, 1981). La onda Kelvin ecuatorial, en las cercanías de las costas de Sudamérica, propaga parte de su energía hacia el polo como ondas atrapadas a la costa y otra parte hacia el oeste como ondas de Rossby. Este escenario de ondas ecuatoriales explica gran parte de la variabilidad de baja frecuencia observada en el borde oriental del océano Pacífico (Enfield, 1987; Shaffer et al., 1997; Pizarro et al., 2002; Hormazabal et al., 2002; Vega et al., 2003). Frente a Chile, observaciones de corrientes medidas sobre el talud continental han revelado que gran parte de la variabilidad de baja frecuencia aparece forzada remotamente desde el Pacífico ecuatorial, por las oscilaciones de Madden-Julian (en la atmósfera) en la banda intraestacional (Shaffer *et al.*, 1997; Hormazabal *et al.*, 2002), los vientos ecuatoriales en la banda estacional (Pizarro *et al.*, 2002), y por El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en la escala interanual (Shaffer *et al.*,1999; Pizarro *et al.*, 2002).

Esta revisión de la variabilidad del ambiente y su relación con los recursos pelágicos es abordada en secciones que comprenden las fluctuaciones que aparecen dominando la variabilidad del ambiente en distintos periodos (intraestacional, estacional, interanual e interdecadal, y en la escala espacial que comprende la mesoescala.

#### 1. Fluctuaciones intraestacionales

La surgencia costera corresponde a uno de los fenómenos físicos de gran importancia en el SCCHP. Este es un proceso por el cual las aguas subsuperficiales son llevadas a la superficie y sacadas fuera de esta área de transporte vertical por un flujo horizontal divergente hacia mar adentro (Smith, 1968). Esto resulta de la acción combinada de los vientos que soplan hacia el ecuador y de la rotación terrestre. Las aguas que afloran a la superficie por el efecto del viento costero (surgencia), poseen propiedades físicas y químicas diferentes a las de las aguas que habitualmente se encuentran en la superficie. El agua que asciende es más fría y rica en nutrientes que la superficial, promoviendo de esta forma el incremento de la producción primaria.

El viento, al inducir la surgencia, produce un descenso en el nivel del mar debido a un cambio en la densidad media de la columna de agua (Smith, 1968). Sin embargo, el esfuerzo del viento dentro de una escala de tiempo sinóptica o mayor, explica sólo una pequeña fracción de las variaciones del nivel del mar. Esto se debe a que gran parte de las variaciones del nivel del mar son explicadas principalmente por las ondas atrapadas a la costa que se propagan hacia el polo (Pizarro *et al.,* 1994; Shaffer *et al.,* 1997). Estas ondas producen una variación del nivel del mar del orden de centímetros y una oscilación vertical de la termoclina del orden de decenas de metros, estando estas fluctuaciones de la termoclina en fase opuesta con las del nivel del mar (Smith, 1978; Huyer *et al.,* 1991).

Las ondas atrapadas a la costa con períodos intraestacionales (30-90 días), son las principales responsables de la mayor parte de la variabilidad del nivel del mar y de las corrientes sobre la plataforma y el talud del SCCHP (Shaffer et al., 1997; Hormazabal et al., 2002). Estas perturbaciones se propagan dentro de una banda angosta (de 50-100 km) a lo largo de la costa oeste de Sudamérica, observándose por lo menos hasta la latitud de Valparaíso (Shaffer et al., 1997). Mucha de esta variabilidad proviene de ondas Kelvin ecuatoriales, que arriban a las costas de Sudamérica y se propagan hacia el polo como ondas atrapadas a la costa (Enfield, 1987; Shaffer et al., 1997; Hormazabal et al., 2002). En la zona ecuatorial, las relativamente débiles pero espacialmente coherentes anomalías del esfuerzo del viento zonal, asociadas principalmente a las ondas atmosféricas de Madden-Julian (Madden y Julian, 1994), son las principales responsables de excitar las ondas Kelvin que dominan la variabilidad intraestacional de la termoclina en el Pacifico ecuatorial (Kessler et al., 1995; Hendon et al., 1999). Estas ondas Kelvin ecuatoriales comienzan su propagación hacia el este, cerca de la línea de fecha (180°W), y cuando alcanzan la costa de Sudamérica fuerzan ondas atrapadas a la costa de similar periodo, las cuales se propagan hacia el polo. Esta conexión entre el Pacifico ecuatorial y latitudes medias es confirmada por el buen ajuste entre modelos simples forzados con vientos ecuatoriales y observaciones de corrientes y nivel del mar a lo largo de la costa de Sudamérica (Hormazabal et al., 2002). Sin embargo, al sur de los 10°S parte de la variabilidad de las corrientes y nivel del mar es forzada por los vientos locales, cuya variabilidad aparece ligada al Pacifico Tropical, a través de patrones de teleconexión atmosféricos (Hormazabal et al., 2002; Rutllant et al., 2004). Frente a Chile, esta

variabilidad intraestacional generada por los vientos locales adquiere una mayor importancia al sur de los 30°S (Hormazabal *et al.,* 2001 y 2002).

Las ondas atrapadas a la costa pueden modificar la fuente de las aguas que ascienden a la superficie por el efecto de la surgencia costera (Huyer et al., 1991). Sin embargo, su efecto sobre la temperatura superficial del mar no es evidente. Por ejemplo, en la zona ecuatorial, la relación entre los cambios de la termoclina inducidos por ondas Kelvin y los cambios observados en la temperatura superficial del mar no es directa. Anomalías de la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico ecuatorial y su propagación hacia el este, pueden ser explicadas por la interacción entre el océano y la atmósfera de esa región, donde el principal mecanismo a través del cual la temperatura superficial del mar cambia, corresponde a las variaciones del flujo de calor entre el océano y la atmósfera, a la advección horizontal y a la surgencia ecuatorial (Kessler y McPhaden, 1995). La importancia de esos mecanismos cambia en el tiempo, existiendo períodos durante los cuales la advección horizontal contribuye más a la variación de la temperatura superficial del mar y otros períodos en que ocurren los mayores eventos de enfriamiento y calentamiento, donde las variaciones de la temperatura superficial del mar pueden ser explicadas principalmente por las fluctuaciones de la surgencia (Kessler y McPhaden, 1995).

Fluctuaciones intraestacionales de la temperatura superficial del mar han sido observadas en la zona costera de la zona centro-norte de Chile (18°-33°S). Mediante el uso de modelos estadísticos y un modelo numérico unidimensional se ha mostrado que en la zona norte de Chile (20°S), las fluctuaciones intraestacionales de la temperatura superficial del mar están mas relacionadas con las ondas atrapadas a la costa que con el esfuerzo del viento (Hormazabal *et al.*, 2001). En cambio en la zona central de Chile (33°S), las fluctuaciones intraestacionales de la temperatura superficial del mar son fuertemente forzadas por el viento, a través de la surgencia y

el "entrainment", bajo la acción del calentamiento superficial (Hormazabal *et al.*, 2001). La relación entre las fluctuaciones intraestacionales de la temperatura superficial del mar y las ondas atrapadas a la costa, podría ser explicada por las variaciones en la profundidad de la termoclina producidas por las ondas atrapadas a la costa, las que cambian el balance de energía de la capa de mezcla superficial, al permitir o impedir el ingreso de aguas subsuperficiales mas frías a esta capa (Hormazabal *et al.*, 2001).

A pesar de que las fluctuaciones intraestacionales corresponden a uno de los aspectos dominantes de la variabilidad del SCCHP, aun no se ha determinado el efecto que estas fluctuaciones pueden tener sobre el comportamiento de los recursos pelágicos de la región.

#### 2. Fluctuaciones estacionales

El esfuerzo del viento a lo largo de la costa oeste de Sudamérica, hasta por lo menos los 40°S, es en promedio favorable a la surgencia costera con un prominente máximo a los 15°S y 30°S, separado por un mínimo en los 20°S (Shaffer *et al.*, 1999). El ciclo anual del esfuerzo del viento tiene un máximo (favorable a la surgencia) que ocurre progresivamente desde el norte hacia el sur, llegando durante la primavera a los ~30°S y posteriormente en verano a los ~35°S (Shaffer *et al.*, 1999). Las corrientes a lo largo del talud continental, en los 30°S, poseen una fuerte variabilidad semi-anual y una débil variabilidad anual (Shaffer *et al.*, 1999). En esa zona el flujo hacia el polo es mas fuerte durante el periodo de primavera-verano y débil durante el invierno; mientras que el viento adyacente a la costa posee un fuerte (débil) ciclo anual (semianual) con un máximo hacia el ecuador (viento favorable a la surgencia) durante primaera (Shaffer *et al.*, 1999). Durante periodos cálidos (El Niño), las fluctuaciones semianuales dominan la variabilidad de la escala estacional en las corrientes costeras, las cuales pueden ser explicadas en gran

medida por ondas de Rossby forzadas por vientos ecuatoriales, a través de ondas Kelvin ecuatoriales (Pizarro *et al.*, 2002; Hormazabal *et al.*, 2004). Durante periodos fríos (La Niña), las fluctuaciones anuales son también importantes para la variabilidad de la escala estacional de las corrientes costeras, las cuales aparecen mas relacionadas con los vientos a lo largo de la costa de Sudamérica que con los vientos ecuatoriales (Hormazabal *et al.*, 2004).

En la zona norte de Chile, el ciclo anual del nivel del mar en la zona costera posee un máximo principal en verano y otro a comienzos de invierno, con un mínimo absoluto en septiembre (Blanco *et al.*, 2001). El segundo máximo se desplaza desde comienzos de invierno en Arica hacia mediados de invierno en Valparaíso. La amplitud del ciclo anual es del orden de 4 cm (Fonseca, 1987; Blanco et al., 2001), un orden de magnitud menor que las oscilaciones típicas observadas en la escala intra-estacional. En esta región, la temperatura y salinidad superficial del mar poseen una marcada estacionalidad, con máximos valores durante la época de verano y mínimos en invierno (Blanco et al., 2001). Dentro de las primeras 60 mn, la distribución espacial de la temperatura y salinidad superficial del mar presentan intensos gradientes perpendiculares a la costa, los cuales se debilitan progresivamente desde el verano hacia el invierno, periodo en el cual tienden a desaparecer (Blanco *et al.*, 2001). Con respecto a la estructura vertical de la columna de agua, los gradientes verticales de la temperatura, salinidad y oxigeno disminuyen desde el norte (Arica) hacia el sur (Antofagasta). Estos gradientes son mas intensos durante la época de verano y se debilitan paulatinamente hacia el invierno, donde solamente en el caso de la salinidad tienden a permanecer poco definidos (Blanco *et al.*, 2001).

Dentro de la escala estacional, en la zona norte de Chile, se ha observado que la sardina y la anchoveta presentan importantes migraciones que han sido asociadas con la temperatura superficial del mar. Durante la época de invierno, estos recursos se distribuyen principalmente en el norte de esta zona, extendiéndose hacia el sur durante la época de verano (Yáñez e*t al.*, 1995).

Desde el punto de vista biológico, el componente de variación estacional parece ser uno de los ciclos más predecibles de todos los componentes de variación, debido a que en él se ven reflejados importantes procesos poblacionales, tales como la reproducción, las migraciones y el reclutamiento. Estos procesos son el resultado de la adaptación del ciclo de vida de las especies a la estacionalidad de los procesos físico-biológicos del ambiente, donde la selección de hábitat favorables juega un rol importante. Yáñez y Barbieri (1988) y Yáñez (1989), señalan que el índice de abundancia de anchoveta en la zona norte de Chile (18º21'S-24º00'S), durante el periodo 1963-1976, presenta dos máximos en el ciclo anual: uno periodo de mayor abundancia relativa se presenta entre diciembre-enero, mientras que entre juniojulio se observó un máximo secundario. En cambio, el componente estacional de la abundancia relativa de sardina fue diferente al de anchoveta. En el periodo 1973-1986, la mayor abundancia de sardina tiende a presentarse desde enero a octubre, con un máximo en febrero-abril y otro en septiembre. En noviembre-diciembre la abundancia de este recurso fue la más baja dentro del ciclo anual. De acuerdo con los autores, los periodos de mayor abundancia relativa de ambos recursos estarían asociados con los dos periodos de mayor actividad reproductiva, cuando se observa un incremento de las agregaciones de cardúmenes desovantes cerca de la costa y más vulnerables a la explotación pesquera. A su vez, en el caso de la anchoveta es probable que el incremento en la abundancia entre diciembre-enero esté relacionada con el proceso de reclutamiento, cuando se incorporan los juveniles al stock explotable (Castillo *et al.*, 2002).

Barría *et al.* (1999) analizan la estacionalidad de los recursos pelágicos en un periodo más reciente, comprendido entre 1980 y 1996. En dicho periodo, la anchoveta presentó una mayor abundancia relativa durante el primer semestre,

con excepción del mes de octubre; y presentó una mayor cobertura espacial entre marzo y junio. La sardina, por su parte, mostró una mayor cobertura y abundancia entre junio y noviembre. Se destaca que ambas especies han estado sujetas a vedas reproductivas y de reclutamiento en anchoveta, afectando el comportamiento natural de los índices de abundancia relativa deducidos a partir de la actividad de la flota. En el caso del jurel, Barría *et al.* (1999) comunican que esta especie presentó una mayor abundancia relativa entre marzo y julio, estacionalidad que coincide con la disponibilidad costera del recurso descrita por Serra (1991), que estaría asociada con procesos de alimentación y engorda. A finales del invierno (agosto), esta especie realiza una migración reproductiva fuera de la costa con propósitos reproductivos (Serra, 1991; Arcos *et al.*, 2001).

En consecuencia, la señal estacional de los recursos pelágicos en la zona norte está asociada con procesos poblacionales importantes, tal como la época reproductiva en zonas costeras (anchoveta y sardina) u oceánicas (jurel), época de reclutamiento y periodos de alimentación o engorda, como también a procesos migracionales que determinan la alternancia entre los hábitat de grandes movimientos poblacionales en determinadas épocas del año. Las condiciones ambientales que se presentan estacionalmente en la zona norte de Chile determinarían la formación de hábitat favorables para cada uno de dichos procesos poblacionales, y por lo tanto el acoplamiento estacional de los recursos con una incidencia directa para las pesquerías. Tendencias no estacionales o anomalías intensas podrían afectar las condiciones favorables de cada hábitat, que podrían afectar la capturabilidad y disponibilidad de los recursos, afectando el patrón estacional característico.

#### 3. Fluctuaciones interanuales

La región del Pacífico Sudoriental presenta cambios interanuales significativos en las condiciones atmosféricas y oceanográficas, asociadas principalmente al fenómeno ENOS. Este fenómeno corresponde a un caso de acoplamiento océanoatmósfera en la cuenca del Pacífico tropical, que se presenta con intervalos irregulares de 2 a 7 años, y que en promedio ocurre una vez cada 3-4 años (Quinn *et al.*, 1987). ENOS posee consecuencias globales asociadas a un calentamiento de la temperatura superficial del mar, lluvias torrenciales y sequías en diversas partes del mundo, además de importantes cambios en la circulación oceánica de la región.

El Niño se debe a una cadena de eventos que ocurren principalmente en la temperatura de las capas superficiales, en el océano Pacífico tropical y en el océano Indico. Por razones que no son claras aún, el sistema de vientos Alisios sobre el Pacífico tropical se debilita, e incluso puede invertirse parcialmente durante algunos meses en los años que se presenta El Niño. Esta inversión de los vientos alisios está asociada con la Oscilacion del Sur (OS), la cual corresponde al cambio más notorio en la distribución de la presión atmosférica superficial entre Australia y el Pacífico Suroriental. Los vientos Alisios, que normalmente soplan hacia el oeste, producen un gradiente de presión hidráulico en la zona ecuatorial, con un aumento del nivel del mar en el extremo oeste del océano Pacífico ecuatorial, del orden de un metro sobre el nivel de equilibrio.

Durante la fase negativa de la OS (fase cálida), los vientos alisios decaen y la energía potencial acumulada por la elevación de la columna de agua en el Pacífico ecuatorial oeste es liberada, produciéndose un pulso de agua que viaja hacia el este a través del Pacífico ecuatorial. Parte de la energía liberada viaja como onda Kelvin con velocidades de fase del orden de 2,5 m/s, tardando entonces alrededor de dos a tres meses en cruzar la cuenca del Pacífico. Cuando estas ondas arriban a las costas de Sudamérica, se produce una profundización de la termoclina (de 40 a más de 200 m de profundidad), y un aumento de la temperatura superficial del mar (de 2 a 4°C).

A lo largo de la costa oeste de Sudamérica, la variabilidad interanual del nivel del mar y de la temperatura superficial del mar decrece desde los trópicos hacia el polo y se encuentra principalmente relacionada con el ciclo El Niño/La Niña (Enfield y Allen, 1980; Montecinos et al., 2003). En la zona norte de Chile, se ha observado que la variabilidad interanual del nivel del mar esta fuertemente relacionada con las fluctuaciones interanuales en la profundidad de la base de la termoclina y del limite superior de la capa de mínimo de oxigeno (Morales *et al.*, 1999; Thomas et al., 2001). Durante los eventos cálidos, la base de la termoclina y de la oxiclina se profundiza, y las aguas sobre la termoclina son significativamente mas cálidas y oxigenadas (Morales et al., 1996; Ulloa et al., 2001). Los cambios en la estructura vertical de la columna de agua afectan las propiedades físicas y químicas del agua, que asciende por el efecto de la surgencia costera (Huyer *et al.*, 1987; Morales et al., 1999; Thomas et al., 2001). De esta forma, las fluctuaciones interanuales de la profundidad de la termoclina, junto con los vientos, estarían generando una señal interanual en la temperatura superficial del mar con características similares a la observada en el nivel del mar.

Las fluctuaciones interanuales en el océano Pacífico ecuatorial, relacionadas principalmente con la ocurrencia de eventos cálidos y fríos, afectan en forma significativa a las corrientes y nivel del mar de la costa de Sudamérica (Enfield y Allen, 1980; Shaffer *et al.*, 1999; Pizarro *et al.*, 2001). Durante los eventos cálidos, las fluctuaciones intraestacionales de los vientos ecuatoriales incrementan su energía y por consiguiente la de las ondas Kelvin que se generan a partir de ellos, dando como resultado final un aumento de la energía de las ondas atrapadas a la costa que dominan la variabilidad de baja frecuencia de las corrientes y nivel del mar (Shaffer *et al.*, 1997; Hormazabal *et al.*, 2002). Además, durante los periodos cálidos las oscilaciones semianuales dominan la variabilidad estacional; en cambio, durante los periodos fríos las fluctuaciones anuales y semianuales son importantes (Hormazabal *et al.*, 2004).

El SCCHP es el único sistema de borde oriental que presenta una capa de mínimo oxigeno que penetra en la capa fótica, lo cual tiene importantes consecuencias en los limites verticales de distribución de organismos no adaptados a bajas concentraciones de oxigeno. En la zona norte de Chile, concentraciones de oxigeno menores a 1 ml/l se encuentran a una profundidad muy cercana a la profundidad de la termoclina (Morales *et al.*, 1999; Ulloa *et al.*, 2001), siendo estas concentraciones de oxigeno restrictivas para la distribución vertical de las larvas de anchoveta (Morales *et al.*, 1996). En general, la tolerancia de los organismos pelágicos a las bajas concentraciones de oxigeno, en regiones de surgencia costera, no ha sido bien documentado. Esto se debe a que en los otros sistemas de borde oriental estas bajas concentraciones de oxigeno se encuentran a una profundidad de varios cientos de metros, sin intervenir mayormente en la productividad biológica de la capa superficial.

Desde el punto de vista biológico, las fluctuaciones interanuales de la abundancia de los recursos pelágicos se atribuyen principalmente al proceso de reclutamiento y a cambios en la distribución espacial, ambos modulados por cambios en las condiciones ambientales y en el esfuerzo de pesca (Yáñez, 1998). En la escala interanual, se han documentado importantes fluctuaciones en la abundancia y disponibilidad de los recursos pesqueros en la zona norte de Chile. Los cambios en la abundancia estarían asociados con el reclutamiento anual, mientras que los cambios en la disponibilidad serían el resultado de cambios anuales en la distribución espacial de los recursos en asociación con cambios interanuales en las condiciones ambientales, particularmente relacionados con periodos fríos y cálidos, y anomalías intensas asociadas a eventos ENOS. En años cálidos, particularmente cuando ocurre un evento El Niño, la abundancia relativa de anchoveta es afectada negativamente (Yáñez *et al.*, 1986; Yáñez y Barbieri, 1988; Yáñez, 1989). En cambio, bajo condiciones frías, se favorece el incremento de la abundancia y disponibilidad de anchoveta. Exceptuando la ocurrencia de eventos

El Niño, la relación negativa con la temperatura superficial del mar se mantiene hasta con un desfase de tres años, lo que implica que la variabilidad interanual está ejerciendo una influencia a través de la fortaleza de los reclutamientos.

Las fluctuaciones interanuales de las condiciones oceanográficas del norte de Chile, tienen un efecto importante sobre el comportamiento de los recursos pelágicos. Durante los eventos cálidos (El Niño), la anchoveta y sardina se distribuyen preferentemente cerca de la costa, y tienden a concentrarse la zona sur de la región, en cambio durante los periodos fríos (La Niña) poseen una mayor extensión hacia fuera de la costa y tienden a concentrarse en la zona norte (Yáñez *et al.,* 1995).

Barría *et al.* (1999) indican que en el periodo 1980-1996, la anchoveta se distribuyó entre los 20°20 y 21°10′S, excepto en 1982 en que se distribuyó hacia el norte de esta zona; mientras que en 1987 se localizó hacia el sur. En 1988 y 1996 la anchoveta se distribuyó en aguas más alejadas de la costa, pero por lo general sus concentraciones se distribuyen en las primeras 30 mn de la costa. Respecto de la sardina, la abundancia del recurso presentó una tendencia decreciente desde 1993, con cambios anuales en su distribución espacial. Entre 1980 y 1983, la abundancia se distribuyó muy cerca de la costa (<30 mn); mientras que entre 1984 y 1990 se distribuyó en aguas oceánicas, entre 70 y 90 mn de la costa, con excepción de 1987.

Durante un evento El Niño la trama trófica tiende a ser diezmada, la productividad primaria disminuye abruptamente (Barber y Chavez, 1983), como también la abundancia del zooplancton; ocurre entonces un reemplazo de especies grandes del zooplancton que son características de los regímenes de surgencia, por formas pequeñas que son típicas de un sistema oceánico menos productivo (Miller *et al.*, 1985). La sardina es una especie que si bien está adaptada en los sistemas altamente productivos, su éxito reproductivo se ve notablemente mejorado

durante años El Niño a pesar de la drástica reducción de la productividad del sistema (Bernal *et al.*, 1983), aspectos que han sido muy bien establecidos en el sistema de California (Lluch-Belda *et al.*, 1991; Jacobson y MacCall, 1985). Por otra parte, la sardina posee una capacidad migratoria mucho más alta que la anchoveta, y posee un sistema filtrador más fino en sus agallas, siendo capaces de filtrar partículas de alimento mucho más pequeñas que la anchoveta (van der Lingen, 1994). En consecuencia, durante un evento El Niño la sardina tiene la capacidad de alimentarse del zooplancton pequeño y de modificar su distribución espacial realizando extensivas migraciones buscando zonas de mejores condiciones alimenticias. Por el contrario, la anchoveta no posee capacidad migratoria y tienden a mantener su distribución espacial refugiándose en zonas costeras donde pueden persistir condiciones de surgencia locales.

Aunque los cambios en la distribución espacial de la abundancia de anchoveta y sardina están claramente establecidos durante años cálidos y fríos, los cambios interanuales en la abundancia de sardina son menos drásticos que en la anchoveta. Esto es consecuencia de la mayor longevidad de la sardina respecto de la anchoveta, que actúa como un filtro de paso bajo ante las variaciones en el reclutamiento. En cambio en la anchoveta el reclutamiento domina la dinámica de la población.

#### 4. Fluctuaciones interdecadales

ENOS es la mayor fuente de variabilidad de baja frecuencia del clima en muchas regiones del planeta, en especial en la cuenca del océano Pacífico y los continentes que la rodean. Sin embargo, desde fines de los ochenta la variabilidad interdecadal, entendida como aquella variabilidad mayor que la interanual (fluctuaciones entre años), y menor que la secular (fluctuaciones entre siglos), ha sido objeto de intensa investigación y es considerada actualmente como parte

integral del sistema climático. Desde fines de la década de los ochenta se ha documentado la existencia de un abrupto cambio de las condiciones medias del sistema océano-atmósfera del Pacífico tropical, observado a mediados de la década del setenta. Las principales características de esta discontinuidad climática corresponden a una mayor persistencia de anomalías positivas de la temperatura superficial del mar (TSM) a partir de 1976 en el sector oriental del Pacífico tropical (Nitta y Yamada, 1989), un incremento de la presión atmosférica en el sector occidental del Pacífico y en el océano Índico, además de una disminución de la presión atmosférica en el sector oriental del Pacífico (Zhang et al., 1997). En conformidad con el aumento de la TSM en el Pacífico occidental, se ha observado un aumento de la actividad nubosa convectiva en el Pacífico central, tal como se ha demostrado mediante el análisis de la radiación infrarroja emergente (Graham, 1994; Chu y Wang, 1997) y de precipitación (Nitta y Kachi, 1994). Además, acorde con el menor gradiente zonal de presión superficial que se observó a partir de 1976, se ha observado un debilitamiento de los vientos alisios a lo largo del Pacífico ecuatorial (Graham, 1994). Por otra parte, Slingo et al. (1998) observan que desde mediados de los setenta las oscilaciones de Madden-Julian, que dominan la variabilidad en la escala intraestacional (30-60 días) del Pacífico tropical, habrían aumentado su actividad.

La discontinuidad o cambio de régimen climático de 1976 se ha observado, especialmente, en diversas variables oceánicas y atmosféricas del Pacífico norte durante el invierno boreal (Ebbesmeyer *et al.*, 1991), incluyendo una disminución de la TSM en la región central del Pacífico norte y un aumento a lo largo de la costa occidental de Norteamérica (Nitta y Yamada, 1989), lo cual también se refleja en un aumento de la temperatura del aire sobre Alaska y la región occidental de Canadá (Trenberth, 1990; Trenberth y Hurrel, 1994). Más aún, se han observado cambios en la cantidad de nutrientes y de zooplancton (McFarlene y Beamish, 1992), en el esfuerzo del viento a lo largo de la costa (Bakun, 1990), entre otros

factores, los que podrían afectar las pesquerías pelágicas de atún y salmón (Mysak, 1986; Hamilton, 1987; Mantua *et al.*, 1997).

Otros estudios han documentado discontinuidades similares a las descritas en los párrafos anteriores. Zhang et al. (1997) detectan una discontinuidad en la cuenca del Pacífico tropical y norte alrededor de 1942-43, pero de signo contrario al de 1976, indicando que las condiciones en el periodo 1977-93 son similares a las del periodo 1925-42. De acuerdo con Minobe (1997, 1999), la oscilación interdecadal en el Pacífico norte se caracteriza por dos fluctuaciones, bidecadal (15-25 años) y pentadecadal (50-70 años), que al resonar provocan fluctuaciones muy rápidas del sistema climático, como aquel registrado a mediados de los setenta. De esta manera, los abruptos cambios climáticos de 1925, 1947 y 1977, se describen como parte de oscilaciones en la escala interdecadal. Hasta ahora se han definido nuevas oscilaciones climáticas, como el Pacific Decadal Oscillation (PDO) (Mantua et al., 1997), ENSO-like mode (Zhang et al., 1997), North Pacific Oscillation (NPO) (Gershunov y Barnett, 1998);todas estas oscilaciones muestran que el Pacífico norte es la región donde la variabilidad interdecadal se desarrolla con mayor intensidad. Sin embargo, evidencias recientes sugieren que la oscilación interdecadal muestra un patrón asimétrico en la variabilidad del clima del Hemisferio Norte y Sur (Garreaud y Battisti, 1999; Power et al., 1999).

Estudios sobre variabilidad climática interdecadal en el Hemisferio Sur son menos numerosos, lo cual se debe en parte a la pobre calidad de la información, en cuanto a su duración y extensión espacial, especialmente sobre los océanos (Garreaud y Battisti, 1999). De acuerdo con estos autores, se habría incrementado el gradiente de presión en la tropósfera media entre la Antártica y latitudes medias, intensificando y haciendo persistir hacia la primavera el vórtice polar troposférico, a partir de mediados de los setentas, lo cual había sido observado en otros estudios (Van Loon and Labitzke, 1993). Asociado a la profundización de la vaguada circumpolar, se ha registrado una intensificación de la actividad ciclónica (Chen y Yen, 1997; Vera, 2003).

En Chile la variabilidad interdecadal se comenzó a analizar en relación a cambios de las pesquerías pelágicas (Cañón, 1986; Yáñez et al., 1986, 1990). Entre los 18° y 24°S, donde la TSM presenta un incremento a partir de 1976, la sardina reemplazó a la anchoveta (Yáñez, 1991). Casi simultáneamente, alrededor de los 37°S la pesquería conjunta de sardina común y anchoveta fue reemplazada por la del jurel, asociada a un incremento de la TSM y del nivel medio del mar después de 1976 (Yáñez et al., 1992). Un aumento en la frecuencia de vientos anómalos de componente norte, que suprimen la surgencia costera, son considerados como los responsables del calentamiento del agua en estas latitudes (Yáñez, 1998). Hacia fines de los ochenta, la anchoveta habría reemplazado a la sardina en la zona norte de Chile; en tanto que en el centro-sur se recuperan los clupeidos, mientras disminuyen notablemente las capturas de jurel (Yáñez et al., 2003a). Variaciones interdecadales también han sido documentadas en la temperatura del mar (Montecinos et al., 2003), la profundidad de la termoclina (Pizarro y Montecinos, 2004), la temperatura del aire (Rosenblüth et al., 1997), y la precipitación (Montecinos *et al.*, 2000; Vargas *et al.*, 2000; Quintana, 2003) a lo largo de Chile.

Hasta el momento no existe una idea única de como funciona el sistema climático del océano Pacífico y de los continentes adyacentes en la escala interdecadal. Sin embargo, debido a la escala temporal involucrada, se considera esencial el rol del océano y de los procesos de retroalimentación que sean capaces de mantener estados anómalos por varias décadas. De acuerdo a algunos autores, las anomalías observadas en el océano en regiones extra-tropicales pueden resultar por el forzamiento estocástico de la atmósfera, con o sin procesos de retroalimentación (Frankignoul *et al.*, 1997; Barsugli y Battisti, 1998), o en el trópico por procesos no-lineales (Timmermann y Jin, 2002). En ambos casos, no habría relación entre las

anomalías de regiones tropicales y extratropicales. Sin embargo, la mayoría de las hipótesis propuestas establecen dicha relación, de tal modo que las anomalías oceánicas y atmosféricas que aparecen en el trópico puedan estar conectadas con las anomalías de regiones extratropicales y viceversa.

De esta manera, varios autores sugieren que la variabilidad interdecadal observada en regiones extratropicales, específicamente en el Pacífico norte y en algunas regiones de Norteamérica, serían forzadas por cambios en el Pacífico tropical (Trenberth y Hurrel, 1994; Graham, 1994). Respecto al origen de esta variabilidad interdecadal en el Pacífico tropical se han planteado muchas hipótesis (Lysne et al., 1997; Kleeman et al., 1999). Una de las más citadas es planteada por Gu y Philander (1997) quienes sugieren que anomalías oceánicas son subductadas adiabáticamente hacia el Ecuador y vueltas a la superficie por la surgencia ecuatorial. La mayoría de estos trabajos indican que la conexión trópico-extratrópico se situaría al norte del Ecuador. Sin embargo, trabajos como el de Luo y Yagamata (2001) y Giese et al. (2002), plantean que la parte sur del Pacífico tropical juega un rol importante, al menos en el cambio ocurrido en el sistema climático a mediados de los setenta. Una interesante perspectiva sobre el funcionamiento del sistema acoplado océanoatmósfera en la escala interdecadal, pone a las fluctuaciones de los vientos alisios como el principal motor de cambios observados en el Pacífico tropical y en regiones extratropicales. Por una parte, Clarke y Lebedev (1999) indican que las fluctuaciones a lo largo de las costas de Norteamérica y posiblemente de Sudamérica se relacionarían a fluctuaciones de baja frecuencia de los vientos alisios.

Las oscilaciones interdecadales pueden influir en la reorganización de las comunidades marinas y de las relaciones trofodinámicas, induciendo cambios en las especies dominantes en estas escalas de tiempo, tal como ha sido demostrado claramente en el Atlántico norte, Pacífico norte y en distintos sistemas de borde oriental (Alheit y Ñiquen, 2004). Debido a que estas sucesiones entre especies dominantes se observan simultáneamente en distintas regiones del océano Pacífico, los mecanismos responsables de estas fluctuaciones deben ser similares, y por lo tanto son difícil de explicar en base a la presión de pesca (Chavez *et al.*, 2003). En el caso específico de la sucesión entre anchoveta y sardina en las costas de Perú y Chile, las fluctuaciones climáticas pueden provocar variaciones en la predación o en el tamaño y abundancia de la alimentación, favoreciendo la dominancia de una u otra especie (Yáñez *et al.*, 2003; Alheit y Ñiquen, 2004).

Kawasaki (1983) fue uno de los primeros autores que presentó evidencia de un patrón de sincronía en la abundancia de las grandes poblaciones de sardina distribuidas en California, Japón y Perú-Chile, sugiriendo que detrás de dicho patrón debe existir un mecanismo de conexión entre los ciclos de abundancia. Aunque en dicha oportunidad la discusión se centró en los problemas particulares de cada pesquería, hacia fines de la década de los años 80 todas las poblaciones exhibieron una repentina disminución en todos los sistemas, y por lo tanto un reflejo evidente de lo sugerido por Kawasaki. Además, varias otras poblaciones de peces han exhibido cambios concomitantes con el patrón observado en la sardina, particularmente en el Pacífico Norte (Beamish, 1995; Hare y Mantua, 2000; Benson y Trites, 2002). Bakun y Broad (2003) sostienen que la evidencia de cambios decadales e interdecadales de varias poblaciones y el carácter sincrónico de dichos incrementos poblacionales y su posterior disminución, están sugiriendo que teleconexiones climáticas podrían estar actuando detrás de dichos cambios.

De particular importancia son los cambios que se produjeron a partir de 1976 en varios índices climáticos, como el Índice de la Oscilación del Sur (SOI) y el índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). Además de la celda de baja presión de las Aleutianas, que domina el comportamiento estacional del sistema océanoatmósfera del Pacífico subártico, entre otros índices globales (Klyashtorin, 2001; Chavez *et al.*, 2003), incluyendo la temperatura promedio del aire de la tierra (Kawasaki y Omori, 1988) y la tasa de rotación terrestre.

En el SCCHP, a contar de 1976 la sardina comienza a dominar en el sistema pelágico por sobre la anchoveta; a contar de 1989, la situación se ha revertido retomando la dominancia de anchoveta, tanto en Perú como en la zona norte de Chile. Yáñez et al. (1998) indican que el incremento de la población de sardina se consolida desde 1976 debido a la presencia de un periodo cálido de largo plazo que se establece en la zona norte de Chile. Según Yáñez et al. (2003), cuando el reclutamiento de anchoveta comienza a decaer, producto de los altos valores del índice de surgencia, los reclutamientos de sardina comienza a aumentar hasta estabilizarse en valores más altos que los encontrados para la primera. Esta diferencia podría estar determinando la alternancia en la abundancia observada en estas especies en la zona norte, gatillada por forzantes climáticos de más larga escala que generaron un cambio de régimen a mediados de los 70 en el ecosistema de surgencia del norte de Chile, al pasar de un sistema dominado por la anchoveta a otro dominado por sardina. Después de 1985 se sugiere un nuevo cambio en el ambiente pelágico del norte de Chile, el cual se torna favorable para la anchoveta y desfavorable para la sardina. Al respecto, cabe señalar que la relación entre el reclutamiento de sardina y la TSM presenta una forma de domo con un máximo situado en los 17,7 °C (Yáñez y Espíndola, 1998). En otros sistemas de surgencia se han observado ciclos de alternancia entre sardina y anchoveta (Lluch-Belda et al., 1992), como el de California, Kuroshio, Benguela y Humboldt. Esto significa que regímenes con alta abundancia de sardina son marcados por bajas abundancia de anchoveta (y viceversa). En consecuencia, cambios interdecadales en los recursos de peces pelágicos de la zona norte de Chile podrían estar respondiendo a cambios climáticos que se verifican en una escala global. La sardina no sólo incrementa su abundancia, sino también presenta una expansión en su distribución espacial; mientras que la población disminuida de anchoveta mantiene su distribución.

Cuando la anchoveta domina en el sistema, la distribución de la abundancia de sardina se contrae. Aunque los mecanismos responsables de dichos cambios no están muy claros, se postula que la teleconexión climática juega un rol importante, generando mecanismos que favorecen el éxito reproductivo de una u otra especie. Según Bakun (2001), el mecanismo debe ser simple y directo, y relacionado con la variabilidad del ambiente más que a través del control biológico a través de una estructura trófica compleja.

#### 5. Variabilidad asociada a estructuras de mesoescala

En el SCCHP se han observado en forma recurrente diversas estructuras de mesoescala, tales como frentes de surgencia, plumas, filamentos, corrientes de meandro y remolinos. Estas estructuras de mesoescala han sido observadas principalmente a través de datos satelitales de temperatura superficial del mar (Fonseca y Farias, 1987; Cáceres, 1992; Barbieri et al., 1995, 1997), clorofila satelital (Thomas et al., 1994; Silva et al., 2000), altimetría (Hormazabal et al., 2004), datos hidrográficos (Blanco et al., 2001; Informes del Fondo de Investigación Pesquera (FIP)), modelos de predicción ambiente-recursos pelágicos (Nieto et al., 2001; Yáñez et al., 2002b; Silva et al., 2002 y en prensa) y modelos numéricos (Leth y Shaffer, 2001; Mesias et al., 2003). La alta variabilidad de mesoescala, vinculada a intensos remolinos y corrientes de meandro, constituye un rasgo característico de la zona de transición costera (Chereskin et al., 2000; Hormazabal et al., 2004). A lo largo de la costa de Chile, la zona de transición costera se extiende hasta aproximadamente los 600-800 km de la costa, existiendo una región de mayor variabilidad de mesoescala en la zona centro-sur de Chile (29°-38°S) y otra región de menor variabilidad en la zona norte de Chile (19°-29°S), pero mayor que la observada en zonas oceánicas (Hormazabal et al., 2004). La región de mayor variabilidad aparece vinculada a intensos vientos favorables a la surgencia, en cambio en la zona norte de Chile estos vientos son débiles. En estas regiones los remolinos de mesoescala poseen diámetros característicos del orden de 200 km, no presentan un patrón de rotación dominante y en su desplazamiento hacia el oeste producen un transporte del orden de 2 x  $10^6$  m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (Hormazabal *et al.*, 2004).

En distintas regiones del océano se ha observado una buena asociación entre especies pelágicas y diversas estructuras de mesoscala, tales como frentes de surgencia, plumas, filamentos, corrientes de meandro y remolinos. Por ejemplo, en el sistema de corrientes de Kuroshio, los remolinos de mesoescala han sido vinculados a condiciones favorables para la alimentación y el crecimiento de huevos y larvas de anchoveta (Nakata et al., 2000). En el sistema de corrientes de California se ha observado una alta tasa de sobrevivencia y un significativo crecimiento de sardinas asociados a remolinos de mesoescala (Logerwell y Smith, 2001; Logerwell et al., 2001). En el Pacifico ecuatorial central, frente las costas de Hawai, altas capturas del pez vela y pez espada han sido asociados a regiones que presentan fuertes frentes y gradientes térmicos, además de remolinos y corrientes de meandro (Mitchum y Polovina, 2001; Seki et al., 2002). En el SCCHP el jurel ha sido asociado a regiones con intensas corrientes de meandro, remolinos de meoescala, altas concentraciones de clorofila y fuertes gradientes e inversiones térmicas (Pisarenko, 1984; Niquén y Vilchez, 1989; Serra et al., 1994a y b; Quiñones et al., 1994; Yáñez et al., 1996; Barria et al., 2001a y b). En la zona norte de Chile, las mayores capturas de sardina española y anchoveta han sido vinculadas a regiones con importantes gradientes térmicos superficiales (Yáñez et al., 1997; Mímica, 2001). Los mecanismos involucrados en las relaciones observadas entre la distribución de las especies pelágicas y las estructuras de mesoescala aun no han sido determinados claramente. Sin embargo, se ha postulado que esta relación se da principalmente vinculada a una condición favorable para la alimentación y sobrevivencia de los peces.

- Alheit J. y M. Niquen. 2004. Regime shifts in the Humboldt Current ecosystem. Prog. Oceanogr. 60, 201-222.
- Arcos, D., L. Cubillos y S. Núñez. 2001. The jack mackerel fishery and El Niño 1997-98 effects off Chile. Prog. Oceanogr. 49, 597-617.
- **Bakun, A. 1990.** Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. Science 247, 198-200.
- Bakun, A. 2001. 'School-mix feedback': a different way to think about low frequency variability in large mobile fish population. Prog. Oceanogr. 49, 485-511.
- **Bakun, A. y K. Broad. 2003.** Environmental 'loopholes' and fish population dynamics: comparative pattern recognition with focus on El Niño effects in the Pacific. Fish. Oceanogr. 12, 415-458.
- Barber, R.T. y F. Chavez. 1983. Biological consequences of El Niño. Science 222, 1203-1210.
- Barbieri M.A., A. González y E. Yáñez. 1995. Time-space variability of sea surface temperature and pelagic resources in northern Chile (1987-92). *In*: Quantitative Remote Sensing for Science and Applications. T. Stein (Ed.), IGARSS, Vol. I, 300-302.
- Barbieri M.A., E. Yáñez y A. González. 1997. Determination of the localization and duration of the local upwelling in the chilean northern zone by mean of satellite images of the sea superficial temperature. *In*: Remote Sensing for Marine and Coastal Environments. ERIM, Michigan, USA, Vol. I, 583-592.
- Barría, P., A. Zuleta, G. Böhm, V. Castati, M.A. Barbieri, E. Yáñez, A. Gonzalez,
  K. Nieto, C. Silva y F. Espíndola. 1999. Análisis de la dinámica del patrón de explotación de la flota cerquera en la zona norte y su relación con el medio ambiente. Informe Proyecto FIP 1996-03, 120 pp.

- Barría, P., A. Aranis, S. Mora, G. Böhm, V. Catasti, H. Peña, C. González, F. Vejar y A. Hernández. 2001a. Monitoreo de las capturas de jurel en 1999. Informe Proyecto FIP 1999-02, 127 pp + Anexos.
- Barría, P., A. Aranis, S. Mora, G. Böhm, V. Catasti, H. Peña, C. González, F. Vejar y A. Hernández. 2001b. Monitoreo de las capturas de jurel en el 2000. Informe Proyecto FIP 2000-02, 93 pp + Anexos.
- **Barsugli, J.J. y D.S. Battisti. 1998.** The basic effects of atmosphere-ocean thermal coupling on midlatitude variability. J. Atmos. Sci. 55, 477-493.
- **Beamish, R.J. (Ed.). 1995.** Climate change and northern fish populations. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 121, 739 pp.
- **Benson, A.J. y A.W. Trites. 2002.** Ecological effects of regime shifts in the Bering Sea and eastern North Pacific Ocean. Fish & Fisheries 3, 95-113.
- Bernal, P., F. Robles y O. Rojas. 1983. Variabilidad física y biológica en la región meridional del sistema de corrientes Chile-Peru. FAO Fish. Rep. 291, 683-711.
- Blanco, J.L., A.C. Thomas, M.-E. Carr y P.T. Strub. 2001. Seasonal climatology of hydrographic conditions in the upwelling region off northern Chile. J. Geophys. Res. 106(C6), 11451-11468.
- Cáceres. M. 1992. Eddies and filaments observed in satellite images in front of Talcahuano upwelling area, central Chile. Sci. Mar. 37, 55-66.
- Cane, M.A. 1983. Oceanographyc events during El Niño. Science 222, 1189-1195.
- Cañón, J.-R. 1986. Variabilidad ambiental en relación con la pesquería nerítica pelágica de la zona norte de Chile. *In*: La Pesca en Chile. P. Arana (Ed.), Escuela de Ciencias del Mar, UCV, Valparaíso, 195-205.
- Castillo, J., J. Córdova, A. Saavedra, M. Espejo, P. Gálvez y M.A. Barbieri. 2002. Evaluación del reclutamiento de anchoveta en la I y II regiones: temporada 2001-2002. Informe Proyecto FIP 2001-11, 207 pp + Anexos.

- Chavez, F., P.G. Strutton y M.J. McPhaden. 1998. Biological-physical coupling in the equatorial Pacific during the onset of the 1997-98 El Niño. Geophys. Res. Lett. 25(19), 3543-3546.
- Chavez, F., J. Ryan, E. Lluch-Cota y M. Ñiquen. 2003. From anchovies to sardines and back: multidecadal change in the Pacific ocean. Science 299, 217-221.
- Chen, T.C. y M.C. Yen. 1997. Interdecadal variation of the Southern Hemisphere circulation. J. Climate 10, 805-812.
- Chereskin, T.K., M.Y. Morris, P.P. Niiler, P.M. Kosro, R.L. Smith, S.R. Ramp, C.A. Collins y D.L. Musgrave. 2000. Spatial and temporal characteristics of the mesoscale circulation of the California Current from eddyresolving moored and shipboard measurements. J. Geophys. Res. 105, 1245-1269.
- **Chu, P.S. y J.-B. Wang. 1997.** Recent climate change in the tropical western Pacific and Indian ocean regions as detected by outgoing longwave radiation records. J. Climate 10, 636-646.
- **Cipollini P., D. Cromwell, P.G. Challenor y S. Raffaglio. 2001.** Rossby waves detected in global ocean color data. Geophys. Res. Lett. 28, 323-326.
- **Clarke, A.J. y A. Lebedev. 1999.** Remotely driven decadal and longer changes in the coastal Pacific waters of the Americas. J. Phys. Oceanogr. 29, 828-835.
- Ebbesmeyer, C.C., D.R. Mc Lain, F.H. Nichols, D.H. Peterson y K.T Redmond, 1991. 1976 step in the Pacific climate: forty environmental changes between 1968-1975 and 1977-84. *In*: Proc. 7<sup>th</sup> Annual Pacific Climate Workshop, CA, USA, 115-126.
- **Enfield, D. 1987.** The intraseasonal oscillation in Eastern Pacific sea levels: how is it forced?. J. Phys. Oceanogr. 17, 1860-1876.
- Enfield, D. y J.S Allen. 1980. On the structure and dynamics of monthly sea level anomalies along the pacific coast of north and south America. J. Phys. Oceanogr. 10, 557-578.

- **Fonseca, T. 1987.** Anomalías de temperatura y nivel del mar en la costa del Pacífico sudoriental. Ciencia y Tecnología del Mar, CONA, 11, 17-43.
- **Fonseca, T. y M. Farías. 1987.** Estudio del proceso de surgencia en la costa chilena utilizando percepción remota. Invest. Pesq. (Chile) 34, 33-46.
- Frankignoul, C., P. Müller y E. Zorita. 1997. A simple model of the decadal response of the ocean to stochastic wind forcing. J. Phys. Oceanogr. 27, 289-305.
- **Garreaud, R.D. y D.S. Battisti. 1999.** Interannual and interdecadal variability of the tropospheric circulation in the Southern Hemisphere. J. Climate 12, 2113-2123.
- Gershunov, A. y T.P. Barnett. 1998. Interdecadal modulation of ENSO teleconnections. Bull. Amer. Meteo. Soc. 79(12), 2715-2725.
- Giese, B.S., S.C. Urizar y N.S. Fuckar. 2002. Southern Hemisphere origins of the 1976 climate shift. Geophys. Res. Letters 29, 1014-1017.
- **Graham, N.E. 1994.** Decadal-scale climate variability in the 1970s and 1980s: observations and model results. Climate Dynamics 10, 135-159.
- **Gu, D. y S.G.H. Philander. 1997.** Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics. Science 275, 805-807.
- Hamilton, K. 1987. Interannual environmental variation and North American fisheries. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 68, 1541-1548.
- Hare, S.R. y N.J. Mantua. 2000. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. Prog. Oceanogr. 476, 99-102.
- Hendon, H.H., C. Zhang y J.D. Glick. 1999. Interannual variation of the Madden-Julian Oscillation during austral summer. J. Climate 12, 2538-2550.
- Hormazabal, S., G. Shaffer, J. Letelier y O. Ulloa, 2001. Local and remote forcing of sea surface temperature in the coastal upwelling system off Chile. J. Geophys. Res. 106, 16657-16672.

- Hormazabal, S., G. Shaffer y O. Pizarro, 2002. Tropical Pacific control of intraseasonal oscillations off Chile by way of oceanic and atmospheric pathways. Geophys. Res. Lett. 29(6), doi:10.1029/2001GL013481.
- Hormazabal, S., G. Shaffer y O. Leth, 2004. The coastal transition zone off Chile. J. Geophys. Res. 109(C01021), doi:10.1029/2003JC001956.
- Huyer A., R. Smith y T. Paluszkiewicz. 1987. Coastal upwelling off Peru during normal and El Niño times, 1981-1984. J. Geophys. Res. 92, 14297-14307.
- Huyer A., M. Knoll, T. Paluszkiewicz y R. Smith. 1991. The Peru undercurrent: a study in variability. Deep Sea Res. 38 (Supl), S247-S271.
- Jacobson, L.D. y A. MacCall. 1995. Stock-recruitment models for Pacific sardine (*Sardinops sagax*). Can. J. Fish. Aquat. Scie. 52, 566-567
- Kawasaki, T. 1983. Why do some pelagic fishes have fluctuations in their number? Biological basis of fluctuation from the evolutionary ecology. FAO Fish. Rep. 291, 1065-1080.
- Kawasaki, T. y M. Omori. 1988. Fluctuations in the three major sardine stocks in the Pacific and the global trend in mean temperature. *In*: International Symposium on Long Term Changes in Marine Fish Populations. T. Wyatt & M.G. Larrañeta (Eds.), Inst. Invest. Mar., Vigo, España, 37-53.
- Kessler W.S., M.J. McPhaden y K.M. Weikmann. 1995. Forcing of intraseasonal Kelvin waves in the equatorial Pacific. J. Geophys. Res. 100, 10613-10632.
- Kessler W.S. y M.J. McPhaden. 1995. The 1991-93 El Niño in the Central Pacific. Deep-Sea Res. 42, 295-333.
- Kleeman, R., J. P. McCreary y B.A. Klinger. 1999. A mechanism for generating ENSO decadal variability. Geophys. Res. Lett. 26, 1743-1746.
- **Klyashtorin, L.B. 2001.** Climate change and long-term fluctuations of commercial catches: the possibility of forecasting. FAO Fish. Tech. Pap. 410, 86 pp.
- Leth, O. y G. Shaffer. 2001. A numerical study of seasonal variability in the circulation off central Chile. J. Geophys. Res. 106, 22229-22248.
- Lluch-Belda, D., D. Lluch-Cota, S. Hernández-Vasques y C. Salinas-Zavala. 1991. Sardine and anchovy spawning as related to temperature and upwelling in the California Current System. CalCOFI Rep. 32, 105-111.
- Lluch-Belda, D., R.A. Schwartzlose, R. Serra, H. Parrish, T. Kawasaki, D. Hedgecock y R.J.M. Crawford. 1992. Sardine and anchovy regime fluctuations f abundance in four regions of the world oceans: a workshop report. Fish. Oceanogr. 1 (4), 339-347.
- **Logerwell, E. y P. Smith. 2001**. Mesoscale eddies and survival of late stage Pacific sardine (*Sardinops sagax*) larvae. Fish. Oceanogr. 10, 13-25.
- Logerwell, E., B. Lavaniegos y P. Smith. 2001. Spatially-explicit bioenergetics of Pacific sardine in the Southern California Bight: are mesoscale eddies areas of exceptional prerecruit production? Prog. Oceanogr. 49, 391-406.
- Luo, J.-J. y T. Yamagata. 2001. Long-term El Niño-Southern Oscillation (ENSO)like variation with special emphasis on the South Pacific, J. Geophys. Res. 106, 22,211–22,227.
- Lysne J., P. Chang y B. Giese. 1997. Impact of the extratropical Pacific on equatorial variability. Geophys. Res. Lett. 24, 2589–2592.
- Madden, R.A. y P.R. Julian. 1994. Observations of the 40-50 days Tropical Oscillation: a review. Mon. Wea. Rew. 122, 814-837.
- Mantua, N.J., S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace y R.C. Francis, 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. Bull. Amer. Meteo. Soc. 78, 1069-1079.
- McFarlane, G.A. y R.J. Beamish. 1992. Climatic influence linking copepod production with strong year-classes in sablefish, *Anaplopoma fimbria*. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 19, 743-753.
- McGillicudy, D.J., A.R. Robinson, D.A. Siegel, H.W. Jannasch, R. Johnson, T.D. Dickey, J. McNeil, A.F. Michaels y A.H. Knap. 1998. Influence of mesoscale eddies on new production in the Sargasso Sea. Nature 394, 263–266.

- McPhaden, M. J. 1999. Genesis and evolution of the 1997-1998 El Niño. Science 283, 950-954.
- Mesias, J.M., R.P. Matano y P.T. Strub. 2003. Dynamical analysis of the upwelling circulation off central Chile. J. Geophys. Res. 108(C3), 10.1029/2001JC001135.
- Miller, C.B., H.P. Batchelder, R.D. Brodeur y W.G. Pearcy. 1985. Responce of zooplankton and ichthyoplankton off Oregon to the El Niño event of 1983. *In*: El Niño North - El Niño effects in the Eastern Subartic Pacific. W.S. Wooster & D.L. Fluharty (Eds.), Washington Sea Grant Program, Seattle, USA, 185-187.
- Mimica, V. 2000. Distribución espacio-temporal de recursos pelágicos (*Engraulis ringens y Sardinops sagax*) explotados en la zona norte de Chile y su asociación con la estructura térmica superficial del mar en el período 1987-1992. Tesis, Escuela de Ciencias del Mar, PUCV, Valparaíso, 78 pp.
- Minobe, S. 1997. A 50-70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. J. Geophy. Res. 24, 683-686.
- Minobe, S. 1999. Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: role in climatic regime shifts. Geophys. Res. Lett. 26, 855-858.
- Mitchum, G. y J. Polovina. 2001. Evaluation of remote sensing technologies for identification of ocean features critical to pelagic fishes. JIMAR/PFRP Annual Report (www.soest.hawaii.edu/PFRP).
- Montecinos, A., R. Garreaud y P. Aceituno. 2000. Interdecadal rainfall variability in subtropical South America and its relationship with tropical Pacific SST. *In*: Proc. Sixth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Santiago, Chile. Amer. Meteor. Soc., 67-68.

- Montecinos A., S. Purca y O. Pizarro. 2003. Interannual to interdecadal sea surface temperature variability along the western coast of South America. Geophys. Res. Lett. 30(11), 1029/2003GL017345.
- Morales C., J.L. Blanco, M. Braun, H. Reyes y N. Silva. 1996. Chlorophyll-a distribution and associated oceanographic variables in the upwelling region off northern Chile during the winter and spring 1993. Deep-Sea Res. 43, 267-289.
- **Morales C., S. Hormazabal y J.L. Blanco. 1999.** Interanual variability in the masoscale distribution of the depth of the upper boundary of the oxygen minimum layer off northern Chile (18-24°S): implications for the pelagic system and biogeochemical cycling. J. Mar. Res. 57, 909-932.
- Mysak, L.A. 1986. El Niño, interannual variability and fisheries in the northeast Pacific Ocean. Can. J. Fish. Aqua. Sci. 43, 464-497.
- Nakata, H., S. Kimura, Y. Okazaki y A. Kasai. 2000. Implications of meso-scale eddies caused by frontal disturbances of the Kuroshio Current for anchovy recruitment. ICES J. Mar. Sci. 57, 143-152.
- Nieto K., E. Yáñez, C. Silva y M.A. Barbieri. 2001. Probable fishing grounds for anchovy in the northern Chile using an expert system. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, Australia. IGARSS, IEEE Inter., Vol. 7, 2985-2987.
- Nitta, T. y S. Yamada. 1989. Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation. J. Meteor. Soc. Japan 58, 187-193.
- Nitta, T. y M. Kachi, 1994. Interdecadal variations of precipitation over the tropical Pacific and Indian oceans. J. Meteor. Soc. Japan 72, 823-831.
- Ñiquén, M. y R. Vilchez. 1989. Fluctuaciones poblacionales del recurso jurel (*Trachurus murphyi N.*) en la costa peruana del 1980 a 1987. Pacífico Sur, Número Especial, 229-233.

- **Philander, S.G.N. 1981.** The response of Equatorial Oceans relaxations of the Trade Winds. J. Phys. Oceanogr. 11, 176-189.
- Pisarenko, V.G. 1984. Utilización de los índices de circulación atmosférica en la valoración y pronóstico a corto plazo del estado de la pesca comercial en el Pacífico Suroriental, *In*: Investigaciones Pesqueras de las Regiones Abiertas del Océano Mundial, VNIRO, Moscú, 45-56.
- Pizarro, O., S. Hormazábal, A. González y E. Yáñez. 1994. Variabilidad del viento, el nivel del mar y la temperatura en la costa norte de Chile. Invest. Mar., Valparaíso, 22, 85-101.
- **Pizarro, O., A.J. Clarke y S. Van Gorder. 2001.** El Niño sea level and currents along the South American coast: comparison of observations with theory. J. Phys. Oceanogr. 31, 1891-1903.
- Pizarro, O., G. Shaffer, B. Dewitte y M. Ramos. 2002. Dynamics of seasonal and interanual variability of the Peru-Chile Undercuurent. Geophys. Res. Lett. 29(12), 10.1029/2002GL 014790.
- **Pizarro, O. y A. Montecinos. 2004.** Interdecadal variability of the thermocline along the western coast of South America. (to be submitted to Geophys. Res. Lett.).
- **Power S, T. Casey, C. Folland, A. Colman y V. Mehta. 1999.** Interdecadal modulation of the impact of ENSO on Australia. Climate Dynamics 15, 319-324.
- **Quinn, W.H., V.T. Neal y S.E. Antunez de Moyolo. 1987.** El Niño ocurrences over the past four and half centuries. J. Geophys. Res. 92, 14441-14461.
- **Quintana, J.**, 2003. Estudio de los factores que explican la variabilidad de la precipitación en Chile en las escalas de tiempo interdecadal y secular. Tesis Magíster en Ciencias Atmosféricas, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, en prensa.

- Quiñones, R., H. Muñoz, J. Córdova, M.A. Barbieri, A. Paillamán, H. Robotham, M. Rojas, D. Figueroa, M. Sobrazo, L. Soto, P. Dávila, R. Serra, F. Bustos, J. Osses, V. Ortiz, C. Barrera, S. Núñez, M. Herrera, D. Arcos, J. Olea, H. Arancibia, L. Miranda y R. Alarcón. 1994. Evaluación hidroacústica del stock de jurel en la zona centro-sur, V a IX regiones. Informe Proyecto FIP 1994-12, 494 pp.
- Rosenblüth, B., Fuenzalida, H. y Aceituno, P. 1997. Recent temperature variations along Southern South America. International Journal of Climatology 17, 67-85.
- Rutllant J, B. Rosenblüth y S. Hormazabal. 2004. Intraseasonal variability in the local wind forcing of coastal upwelling off Central Chile (30°S). Continental Shelf Research 24, 789-804, doi:10.1016/j.csr.2004.02.004.
- SAG, SERNAP y SERNAPESCA. 1950-2002. Anuarios estadísticos de pesca. Ministerio de Economía, Chile.
- Seki, M.P., R. Lumpkin y P. Flament. 2002. Hawaii cyclonic eddies and blue marlin catches: the case study of the 1995 Hawaiian International Billfish Tournament. Journal of Oceanography 58, 739–745.
- Serra, R. 1991. Important life history aspects of the Chilean jack mackerel, *Trachurus symmetricus murphyi*. Invest. Pesq. (Chile) 36, 67-83.
- Serra, R., H. Arancibia, D. Arcos, J. Córdova, H. Muñoz, S. Nuñez, J. Olea, A. Paillamán, R. Quiñones y M. Sobarzo. 1994a. Programa para la evaluación del jurel e investigación asociada, 1991-1992. Informe Proyecto FIP, 110 pp + 149 figs.
- Serra, R., H. Arancibia, D. Arcos, M.A. Barbieri, J. Blanco, J. Córdova, H. Muñoz, S. Núñez, J. Osses, R. Quiñones y H. Robotham. 1994b. Evaluación directa del stock de jurel en la zona centro-sur. Informe Proyecto FIP, 148 pp + 128 figs.

- Shaffer, G., O. Pizarro, L. Djurfeldt, S. Salinas y J. Rutllant, 1997. Circulation and low-frequency variability near the Chilean coast: Remotely forced fluctuations during the 1991-92 El Niño. J. Phys. Oceanogr. 27, 217-235.
- Shaffer, G., S. Hormazabal, O. Pizarro y S. Salinas, 1999. Seasonal and interannual variability of currents and temperature over the slope of central Chile. J. Geophys. Res. 104, C12, 29,951-29,961.
- Silva, C., K. Nieto, M.A. Barbieri y E. Yáñez. 2002. Expert systems for fishing ground prediction models: a management tool in the Humboldt ecosystem affected by ENSO. Invest. Mar., Valparaíso, 30(1): 201-204.
- Silva, C., E. Yáñez, M.A. Barbieri, K. Nieto, V. Mimica, F. Espíndola y J. Acevedo. 2000. Exploring the association between small pelagic fisheries and SEAWIFS chlorophyll and AVHRR sea surface temperature in the north of Chile. Proc. Sixth International Conference: Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Charleston, South Carolina, USA. ERIM International, Vol. II: 81-88
- C. Silva, K. Nieto, M.A. Barbieri, G. Martinez y E. Yáñez. 2004. EFISAT Project: Use of remote sensing and GIS technologies to predict pelagic fishing grounds in Chile. Proc. Second International Symposium on GIS/Spatial Analyses in Fishery and Aquatic Sciences, September 2002, Brighton, England. Fishery GIS Research Group, en prensa.
- Smith, R.L. 1968. Upwelling. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev. 6, 11-46.
- Smith, R.L. 1978. Poleward propagating disturbances in currents and sea level along the Peru coast. J. Geophys. Res. 83, 6083-6092.
- Slingo, J.M., D.P. Rowell, K.R. Sperber y F. Nortley 1998. Interannual/decadal variability in MJO activity as diagnosed in the 40-year NCEP/NCAR reanalyses and simulated in an ensemble of GISST integration. *In*: Proc. 23<sup>th</sup> Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop, Miami, Florida, 194-195.

- Timmermann, A. y F.-F. Jin, 2002. A non-linear mechanism for decadal El Niño amplitude changes. Geophys. Res. Lett. 29, 1003-1006.
- Thomas, A.C., F. Huang, P.T. Strub y C. Janes. 1994. Comparison of the seasonal and interannual variability of phytoplankton pigment concentration in the Peru and California Currents Systems. J. Geophys. Res. 99, 7355-7370.
- Thomas, A. C., J. L. Blanco, M. E. Carr, P. T. Strub y J. Osses. 2001. Satellitemeasured chlorophyll and temperature variability off northern Chile during the 1996 - 1998 La Niña and El Niño. J. Geophys. Res. 106(C1), 899-916.
- Trenberth, K.E. 1990. Recent observed interdecadal climate changes in the northern hemisphere. Bull. Amer. Meteor. Soc. 71, 988-993.
- **Trenberth, K.E. y J.W. Hurrel, 1994.** Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. Climate Dynamics 8, 303-309.
- Ulloa, O., R. Escribano, S. Hormazabal, R. Quiñones, R. González y M. Ramos. 2001. Evolution and biological effects of the 1997-98 El Niño in the upwelling ecosystem off northern Chile. Geophys. Res. Lett. 28, 1591-1594.
- Uz, B.M., J.A. Yoder y V. Osychny. 2001. Pumping of nutrients to ocean surface waters by the action of propagating planetary waves. Nature 409, 597– 600.
- Van der Lingen, C. 1994. Effect of particle size and concentration on the feeding behavior of adult pilchard, *Sardinops sagax*. Mar. Ecol. Prog. Ser. 109, 1-13.
- Van Loon, H., J.W. Kidson y A.B. Mullan, 1993. Decadal variation of the annual cycle in the Australian dataset. J. Climate 6, 1227-1231.
- Vargas, G., L. Ortlieb y J. Rutllant. 2000. Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. Revista Geológica de Chile 27, 157-176.

- Vega, A., Y. du-Penhoat, B. Dewitte y O. Pizarro. 2003. Equatorial forcing of interannual Rossby waves in the eastern South Pacific. Geophys. Res. Lett. 30(5), 1197, doi: 10.1029/2002GL015886.
- Vera, C., 2003. Interannual and interdecadal variability of atmospheric synopticscale activity in the Southern Hemisphere. J. Geophys. Res. 108, 8077-8086.
- Yáñez, E. 1989. Fluctuaciones de los principales recursos pelágicos explotados en la zona norte de Chile y variaciones ambientales asociadas. Pacífico Sur, Número Especial, 509-520.
- Yáñez, E. 1991. Relationships between environmental changes and fluctuating major pelagic resources exploited in Chile (1950-1988). *In*: Long-Term Variability of Pelagic Fish Populations and their Environment. T. Kawasaki, S. Tanaka, Y. Toba & A. Taniguchi (Eds.), Pergamon Press, 301-309.
- Yáñez, E. 1998. Fluctuations des principaux stocks de poisons pélagiques exploités au Chili et leurs relations avec les variations de l'environnement. Ph.D. Thesis, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France, 303 pp.
- Yáñez E. y M.A. Barbieri. 1988. Principal pelagic resources exploited in northern Chile and their relationship to environmental variations. *In*: Long Term Changes in Marine Fish Populations. T. Wyatt y M.G. Larreñeta (Eds.), Inst. Invest. Mar., Vigo, España, 197-219.
- Yáñez, E., M.A. Barbieri y O. Barra. 1986. Evaluación de los principales recursos pelágicos explotados en la zona norte de Chile entre 1957 y 1985. *In*: La Pesca en Chile. P. Arana (Ed.), Escuela de Ciencias del Mar, UCV, Valparaíso, 183-194.
- Yáñez E., M.A. Barbieri y V. Catasti. 1997. Sea surface thermal structure associated to the small pelagic fish resources distribution in central Chile. *In*: Remote Sensing for Marine and Coastal Environments: Technology and Applications. ERIM, Michigan, USA, Vol. I, 583-592.

- Yáñez, E., M.A. Barbieri y A. Montecinos. 1990. Relaciones entre las variaciones del medio ambiente y las fluctuaciones de los principales recursos pelágicos explotados en la zona de Talcahuano, Chile. *In*: Perspectivas de la Actividad Pesquera en Chile. M.A. Barbieri (Ed.), Escuela de Ciencias del Mar, UCV, Valparaíso, 49-62.
- Yáñez E., M.A. Barbieri y L. Santillán. 1992. Long-term environmental variability and pelagic fisheries in Talcahuano, Chile. S. Afr. J. mar. Sci. 12: 175-188.
- Yáñez E., M.A. Barbieri y C. Silva G. 2003. Fluctuaciones ambientales de baja frecuencia y principales pesquerías pelágicas chilenas. *In*: Actividad Pesquera y de Acuicultura en Chile. E. Yáñez (Ed.), Escuela de Ciencias del Mar, PUCV, 109-122.
- Yáñez E., M.A. Barbieri, C. Silva, J. Castillo, K. Nieto, G. Böhm, F. Gómez y J. Cordova. 2002a. Climate variability and pelagic fisheries in the South-Eastern Pacific. GLOBEC International Newsletter 8 (2), 18-19.
- Yáñez E., M.A. Barbieri, C. Silva, K. Nieto y F. Espíndola. 2001. Climate variability and pelagic fisheries in northern Chile. Prog. Oceanogr. 49, 581-596.
- Yáñez, E., V. Catasti, M.A. Barbieri y G. Böhm. 1996. Relaciones entre la distribución de recursos pelágicos pequeños y la temperatura superficial del mar registrada con satélites NOAA en la zona central de Chile. Invest. Mar., Valparaíso, 24, 107-122.
- Yáñez, E. y F. Espíndola. 1998. Análisis de las ventanas ambientales óptimas para los reclutamientos de sardina y anchoveta. Estudios y Documentos, Escuela de Ciencias del Mar, UCV, Valparaíso, 25, 17 pp.
- Yáñez E., M. García y M.A. Barbieri. 1998. Pelagic fish stocks and environmental changes in the south-east Pacific. *In*: Global versus Local Changes in Upwelling Systems. M. Durand, P. Cury, R. Mendelssohn, C. Roy, A. Bakun y D. Pauly (Eds.), ORSTOM Editions, Paris, 275-291.

- Yáñez, E., A. González y M.A. Barbieri. 1995. Estructura térmica superficial del mar asociada a la distribución espacio-temporal de sardina y anchoveta en la zona norte de Chile entre 1987 y 1992. Invest. Mar., Valparaíso, 23, 123-147.
- Yáñez E., C. Silva, K. Nieto, M.A. Barbieri, G. Martinez y B. Ramírez. 2002b. Prediction of probable fishing grounds in northern Chile from pelagic fisheries distributions and environmental conditions. GLOBEC Report 16, 24-26.
- Zhang, Y., J. Wallace y D.S. Battisti. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. J. Climate 10, 1004-1020.

# B) Reclutamiento de recursos pelágicos y hábitat

Los desafíos científicos más importantes en relación con el manejo de las pesquerías pelágicas radican en distinguir lo más claramente posible los efectos de la pesca de aquellos provocados exclusivamente por cambios ambientales, y en cómo incorporar la variabilidad ambiental en los modelos de evaluación y manejo considerando cierta capacidad de predicción del ambiente. El principal problema para un manejo efectivo de las pesquerías pelágicas radica en el carácter variable de la abundancia en varias escalas temporales y espaciales. Los cuerpos teóricos que tratan de explicar la variabilidad de la abundancia básicamente se fundamentan en los procesos que determinan la sobrevivencia de los primeros estadios de vida y el posterior reclutamiento (Cole y McGlade, 1998), como también en el impacto de los ciclos de producción y la complejidad de las interacciones tróficas existentes entre los diferentes componentes que utilizan la productividad de las poblaciones de peces pelágicos pequeños en los ecosistemas marinos (Cury *et al.*, 2000).

Una gran cantidad de casos de estudio y publicaciones científicas sustentan la revisión comprehensiva, directrices, y requerimientos de investigación que han emanado de estas reuniones y grupos de trabajo (Sharp, 1980; Sharp y Csirke, 1983; Wyatt y Larrañeta, 1988; Kawasaki *et al.*, 1991; Durand *et al.*, 1998; Beamish, 1995; Steele, 1996; Hare y Mantua, 2000; Bakun y Broad, 2002; Barange, 2001, 2002). Por lo tanto, la presente revisión solamente estará orientada a la elaboración de una síntesis en el contexto de los cuerpos teóricos relativos a la variabilidad de la abundancia de las poblaciones, y en los enfoques que están permitiendo avanzar en la integración de la variabilidad ambiental al manejo de las pesquerías.

En primer lugar se revisa las causas de variación de la abundancia, considerando los patrones de variación en la escala temporal y espacial. En la variabilidad interanual de la abundancia se identifica al reclutamiento como el componente más importante modulado por el ambiente y se describen las principales hipótesis que explican sus fluctuaciones. En la escala decadal e interdecadal se describen hipótesis recientes que podrían explicar las fluctuaciones en dicha escala temporal. En segundo lugar, se revisa los enfoques que se han desarrollado para abordar la problemática en el contexto nacional, se describe los patrones espacio-temporales de la abundancia, con énfasis en la anchoveta de la zona norte.

# 1. Causas de fluctuación en pequeños pelágicos

# 1.1. Patrones temporales y espaciales de la abundancia

Las variaciones interanuales en la abundancia de peces marinos ocurren sobre un amplio rango de escalas temporales sobrepuestas, y uno de los enfoques que ha permitido comprender los patrones exhibidos en relación con los parámetros de historia de vida dice relación con el análisis comparado de patrones de variación similares en diferentes poblaciones de peces. Caddy y Gulland (1983) describen los patrones temporales de cambios en la abundancia y clasifican a las poblaciones en cuatro grupos: a) poblaciones estables, b) cíclicas, c) irregulares, y d) espasmódicas. Una aproximación similar fue desarrollada por Kawasaki (1983), introduciendo los parámetros de historias de vida más característicos de las poblaciones de peces, y recientemente Spencer y Collie (1997) analizan series temporales de abundancia de 30 stocks, destacando seis categorías de variación: a) estado-estable, b) baja variabilidad-baja frecuencia, c) cíclicos, d) irregulares, e) alta variabilidad-alta frecuencia, y f) espasmódicos. Los patrones observados son consistentes con las historias de vida, así los stocks con comportamientos de alta variabilidad y/o espasmódicos de la abundancia son especies pequeñas, de rápido crecimiento,

altas tasas de mortalidad natural y pelágicas, representados por sardinas del Género *Sardinops*, arenques (Género *Clupea*) y anchovetas (Género *Engraulis*) de los principales sistemas de corrientes de margen oriental. Esto contrasta con los stock que presentan baja variabilidad, caracterizado por especies de crecimiento lento, bajas tasas de mortalidad natural, mayores tamaños y en su mayoría demersales representados por el bacalao del norte y las merluzas en general (Género *Merluccius*).

Se reconoce que la intensidad de pesca es un factor importante en las disminuciones de la abundancia de las poblaciones marinas explotadas, pero la mayor dificultad radica en la distinción de la importancia relativa que tienen los efectos de la pesca respecto de aquellos estrictamente naturales en la modulación de las fluctuaciones poblacionales. Se ha demostrado que las poblaciones de peces han exhibido fluctuaciones poblacionales naturales, independientes de la intensidad de pesca en largos periodos de tiempo (Soutar y Isaacs, 1969; Baumgartner *et al.*, 1992; Yasuda *et al.*, 1999), concluyéndose que: a) existe una variabilidad natural significativa, independiente de los efectos de la pesca; b) mientras más largo es el periodo de tiempo analizado, mayor es la variabilidad (Spencer y Collie 1997); y c) los patrones en un periodo de tiempo corto, pueden no tener relación con los periodos en una escala de tiempo mayor.

En consecuencia, las fluctuaciones en la abundancia de las poblaciones, al menos de los peces pelágicos, son una característica poblacional intrínseca con espectros complejos que pueden ser debidos a una combinación de factores denso-dependientes, variabilidad ambiental y ruido estocástico que modulan la dinámica poblacional completa (Stenseth *et al.*, 2002). La pesca, por lo tanto, se constituye en un factor importante que podría acelerar los cambios en la abundancia cuando las poblaciones se enfrentan a condiciones climáticas adversas (Beverton, 1990).

# 1.2. Conceptos biológicos integradores respecto de la variabilidad física

La variabilidad física en el océano se caracteriza por un espectro de varianza conocido como "ruido rojo" (Steele, 1985), cuya propiedad es que la amplitud de la variabilidad tiende a incrementarse fuertemente en frecuencias más y más bajas de variación. Una consecuencia inmediata para los organismos vivos que enfrentan un ambiente físico con estas características es que éstos deben ser capaces de manejar una gran variedad de estrategias para ajustarse continuamente a los componentes de variación de baja frecuencia o correr el riesgo de encontrarse, en algún momento, muy mal adaptados frente a condiciones locales cambiantes (Bakun, 2001).

Las variaciones de alta frecuencia del ambiente físico, generalmente asociada con eventos El Niño-Oscilación del Sur en el Océano Pacífico, afectan a las poblaciones de peces pelágicos de forma inmediata a través de cambios espaciales en la distribución de la abundancia y cambios temporales de corto a mediano plazo a través de la magnitud del reclutamiento. Por otra parte, debido a que ningún evento El Niño es igual a otro, ni en magnitud, ni en estacionalidad, ni en los efectos que puede producir en los ecosistemas marinos, se debería esperar que las poblaciones de peces desarrollen estrategias diferentes para enfrentar tal variabilidad. La estrategia más exitosa de los pelágicos se encuentra en su primitiva forma de reproducción y su habilidad para conformar cardúmenes, pudiendo explorar continuamente los cambios en las condiciones ambientales en un determinado hábitat (Bakun, 2001).

Los conceptos integradores o de síntesis como la hipótesis de la tríada de Bakun (1996), el de "naturaleza obstinada" con las ideas de "affinities" e "imprinting" a localidades geográficas particulares o estructuras oceánicas (Cury, 1994), y los mecanismos propuestos a través de las hipótesis "school trap" de Bakun y Cury (1999), y "school-mix feedback" de Bakun (2001), permite postular que las poblaciones móviles podrían ajustarse continuamente a la variabilidad de baja frecuencia. En otras palabras, los "rasgos" de los individuos que han sido exitosos, desde el punto de vista de la sobrevivencia frente a condiciones ambientales adversas, podrían ser traspasados de generación en generación a través de la reproducción y a través de la mezcla de cardúmenes. De esta manera las nuevas clases anuales podrían "memorizar" patrones de variabilidad, y podrían ajustar su modo de vida, entendiéndose por modo de vida a la trayectoria espacio-temporal determinada, en el tiempo, por el ciclo de vida, y en el espacio, por las rutas de migración o dispersión (Bernal, 1990).

En este contexto, en el dominio espacial, el elemento clave para analizar la dinámica espacial recae en el concepto de "conectividad" (Bakun y Broad, 2002). Muchas poblaciones marinas utilizan localidades geográficas diferentes para el desove, desarrollo larval, alimentación o engorda de juveniles y adultos, requiriéndose conexiones exitosas entre dichos hábitat para cerrar el ciclo de vida y la producción de nuevas generaciones. La variabilidad ambiental y la presión de pesca podrían afectar dichas conexiones críticas.

Desde el punto de vista de los principales esquemas conceptuales referentes a la regulación poblacional, tres procesos son importantes según Sinclair (1988) y Sinclair y Iles (1989): a) patrón espacial; b) abundancia promedio; y c) variabilidad de clases anuales.

En cuanto a los patrones geográficos de la distribución de la abundancia de las poblaciones marinas se identifican diferentes procesos físico-biológicos acoplados, particularmente importantes o críticos en la definición del hábitat reproductivo y de alimentación (Harden-Jones, 1968; Cushing, 1975, 1990; Sinclair y Iles, 1989; Bakun, 1996). La hipótesis de triangulo migratorio establece principalmente que los

patrones espaciales son establecidos y mantenidos por la persistencia de corrientes residuales conectando las áreas de desove con las áreas de crianza (Harden-Jones, 1968; Cushing, 1975). La hipótesis del miembro/expatriado de Sinclair, sugiere que los patrones son mantenidos por áreas que limitan la dispersión y advección de huevos, larvas y juveniles (e.g. áreas de retención por procesos de re-circulación). La hipótesis de la tríada de Bakun (1996) establece una combinación de tres procesos oceanográficos como los importantes en la generación de un hábitat reproductivo: a) *enriquecimiento*, a través de procesos de surgencia y mezcla; b) procesos de concentración, tales como convergencias, frentes, y estabilidad de la columna de agua); y, c) procesos que favorecen la *retención* dentro (o derivados hacia) el hábitat adecuado para la sobrevivencia. Finalmente, el modelo de cuenca de MacCall (1990) sostiene que la conveniencia de un hábitat para el crecimiento poblacional y persistencia en una zona determinada puede ser visualizada a través de un diagrama sobre una escala que se incrementa hacia abajo, similar a una cuenca. Las condiciones más favorables para la población se encontrarían en el fondo de la cuenca.

Al considerar la persistencia de la abundancia en un nivel promedio, se identifican procesos densidad-dependientes respecto de la disponibilidad de alimento, esta última conectada a procesos físico-biológicos acoplados (Cushing, 1990). Por otra parte, también se postula que es el tamaño y la persistencia de estructuras oceanográficas físicas que restringen la dispersión (re-circulación) los procesos que determinarían la abundancia en un nivel dado, con la posibilidad de que las pérdidas (expatriación) sean densidad-dependientes (Sinclair y Iles, 1989).

En términos del componente de variabilidad de las clases anuales, una serie de hipótesis mecanicistas y otras integradoras o de síntesis han sido planteadas (Cole y McGlade, 1998), considerando principalmente que los factores densidadindependientes estarían afectando la magnitud del reclutamiento en las poblaciones marinas (Kawasaki *et al.*, 1991; Kawasaki y Omori, 1995).

#### 1.3. Influencia del ambiente en la dinámica poblacional

Las vías a través de las cuales las condiciones ambientales afectarían directa o indirectamente a las poblaciones de pequeños pelágicos en sistemas de surgencia se esquematizan en la Fig. 1. La distribución de la población adulta puede ser directamente influenciada por factores tales como la temperatura del medio, concentraciones y condiciones de alimentación. Sin embargo, usualmente es difícil separar el factor único que está controlando la distribución, debido a la alta covarianza que presentan las variables ambientales. Las siguientes observaciones proveen una evidencia general para determinar el rol que juega el ambiente en la distribución de los clupeiformes: a) durante los eventos cálidos los stocks de sardinas, anchovetas y arenques se contraen en pequeñas áreas adyacentes a la costa, donde las surgencias locales son mantenidas (Thomas y Boyd, 1985); b) cambios de régimen decadales en la distribución de las capturas pueden estar asociadas con fluctuaciones decadales de las condiciones ambientales (Crawford y Shannon, 1988); por último, c) los adultos a menudo migran hacia zonas protegidas, para desovar en áreas restringidas donde el transporte mar afuera y la mezcla turbulenta son mínimas (Parrish *et al.*, 1983; Le Clus, 1990, 1991).

#### 1.4. La variabilidad del reclutamiento y su relación con el ambiente

El reclutamiento, es definido desde un punto de vista pesquero, como el proceso por el cual los individuos juveniles sobrevivientes de los estadios tempranos de huevos, larva y postlarva, pasan por primera vez a ser vulnerables por la pesquería (Bakun, 1989). La magnitud del reclutamiento es función tanto de la estrategia reproductiva como del tamaño del stock desovante (si no hay padres no hay descendencia), y principalmente de factores exógenos a la población asociados a cambios en las condiciones ambientales bióticas y abióticas que se presentan durante el desove y la fase pre-recluta.

Es usual observar una gran variabilidad en cualquier relación stock-recluta, lo que impide identificar muchas veces el modelo stock-recluta subyacente. Esto se debe a que aunque los modelos stock-recluta provienen de una formulación teórica, determinar su forma precisa es muy difícil en la práctica (Myers y Barrowman, 1996), principalmente porque los datos son altamente dispersos, o el número de datos disponibles es insuficiente, o los modelos stock-recluta clásicos, tales como el de Ricker o el de Beverton-Holt, contienen implícito el supuesto de proporcionalidad entre el stock desovante y la producción de huevos, aunque hay evidencias que sostienen que dicho supuesto no siempre es válido (Marshall et al., 1998); o porque el ambiente tiene un rol importante en la determinación de la fortaleza de la clase anual, debido a que afecta a la sobrevivencia de los primeros estadios de vida a través de varios procesos físico-biológicos acoplados.



Figura 1. Relaciones en que las condiciones ambientales pueden afectar las poblaciones de clupeiformes en los sistemas de surgencia. La línea gruesa indica interacción directa; la línea delgada, interacción indirecta; y la línea punteada mecanismos de retroalimentación (modificado de Cole y McGlade, 1998).

El último punto es relevante en la dinámica poblacional de los pequeños pelágicos, debido a las altas tasas de mortalidad, rápido crecimiento, y ciclos de vida caracterizados por pocas clases de edad, lo que determina que la abundancia poblacional sea fuertemente dependiente del reclutamiento anual. Desde este punto de vista se puede postular que la variación interanual de la abundancia poblacional de pelágicos pequeños es principalmente densidad-independiente (Barnes *et al.*, 1992). En este contexto, Jacobson *et al.* (2001) señalan que los factores ambientales son más importantes en la modulación de los excedentes productivos de pequeños pelágicos, indicando que los modelos basados completamente en consideraciones denso-dependientes sólo explican alrededor de un 19% del total de varianza encontrada en las estimaciones de producción.

### 1.5. Principales hipótesis para explicar la variabilidad del reclutamiento

Cole y McGlade (1998), separan en dos grandes categorías a las hipótesis que dan cuenta de cómo el éxito en el reclutamiento es influenciado por la sobrevivencia de los estadios tempranos: a) teorías mecanicistas, que tienen relación con procesos específicos que dan cuenta de la mortalidad de huevos y larvas; y b) teorías de síntesis, que apuntan a unificar varias teorías mecanicistas en un solo gran cuerpo teórico.



Figura 2. Resumen de la clasificación de las hipótesis que explican la variación en la abundancia de las clases anuales y el reclutamiento (modificada de Cole y McGlade, 1998).

Las teorías mecanicistas pueden a su vez ser divididas en tres categorías de hipótesis: (i) predación-canibalismo, (ii) inanición y (iii) advección. La Fig. 2 muestra un diagrama que resume las principales hipótesis que explican el éxito en el reclutamiento según la clasificación de Cole y McGlade (1998).

# 1.5.1. Teorías mecanicistas

a) Inanición

- *Período crítico:* La hipótesis de inanición está basada en la premisa que si una larva no encuentra suficiente cantidad de alimento luego de la absorción del saco vitelino, inevitablemente morirá (Blaxter y Hunter, 1982). La primera hipótesis basada en esta presunción fue la llamada "hipótesis del periodo critico" propuesta por Hjort en 1914, quien sugirió que las clases anuales del arenque del Atlántico (*Clupea harengus*) fluctúan en magnitud acorde con la disponibilidad de alimento durante el periodo critico que ocurre durante la transición entre la alimentación endógena y exógena de las larvas.

- Estabilidad de la columna de agua: La "hipótesis de la estabilidad" es una extensión de la idea de Hjort. Lasker (1975), a través de estudios en laboratorio sobre la primera alimentación de la anchoveta Engraulis mordax, indica que las larvas presentan cierta capacidad para detectar buenas concentraciones de alimento en el medio y, por lo tanto, áreas de alimentación en el mar. Sin embargo, dicha capacidad se incrementa en un ambiente estable para la alimentación y/o ambientes de bajas turbulencias. Debido a que el alimento no se encuentra distribuido en forma homogénea en la columna de agua, sino más bien formando estratos y agregaciones discretas, las larvas requieren de una cierta concentración de alimento que solamente se encuentran en estos estratos. De esta forma, cualquier factor que afecte estas concentraciones locales, tal como la turbulencia, reducirá la probabilidad que las larvas encuentren alimento suficiente afectando la sobrevivencia de éstas. Por otra parte, Lasker (1978, 1981, 1985) señala que bajo la hipótesis de estabilidad, la sobrevivencia de los estadios tempranos depende no solo de una adecuada concentración de alimento, sino también que el alimento tenga un tamaño y composición adecuado para permitir el éxito de la alimentación larval.

- *Eventos Lasker:* Bakun y Parrish (1980) notaron que es probable que la intensidad de mezcla promedio no sea crucial en la hipótesis de Lasker, sino más bien la ocurrencia de "ventanas temporales" durante las cuales la producción de energía de mezcla turbulenta permanezca lo suficientemente baja por un periodo tal que permita la acumulación de estratos con partículas de alimento concentrados para que la primera alimentación larval sea exitosa. Por ejemplo, si solamente cinco días completos son necesarios para permitir la formación y concentración de alimento suficiente para prevenir la inanición larval después de un evento de mezcla turbulenta, cualquier intervalo menor de 5 días podría ser desfavorable. De esta manera, solamente después de un periodo de 5 o más días de calma las larvas podrían pasar a través de estas ventanas de sobrevivencia críticas para la primera alimentación. Peterman y Bradford (1987) fueron exitosos en relacionar empíricamente la variabilidad interanual en la tasa de mortalidad larval de la anchoveta de California con la frecuencia de periodos de calma de una duración suficiente para la formación de estratos de fina escala de item alimentarios de anchoveta. Estos periodos de calma fueron denominados "Eventos Lasker".

- *Ajuste/desajuste:* Cushing (1975, 1990) desarrolla la hipótesis de ajuste-desajuste sobre la base de observaciones de los stocks del Atlántico norte, y dice relación con al ajuste entre los ciclos reproductivos y los ciclos de productividad local. La hipótesis predice que cuando se observa una sobreposición entre los picos de abundancia larval y los picos de productividad, mayor cantidad de larvas podrían sobrevivir. Se distinguen dos procesos claves: a) el ciclo de producción ocurre en un tiempo dado como respuesta a los factores físicos, y b) los ciclos de producción son adelantados o retrasados como los factores físicos se combinen en una escala de tiempo de décadas.

### b) Advección

Las "hipótesis de advección" dicen relación con el transporte, o la retención de huevos y larvas en el área de crianza (Iles y Sinclair, 1982). Los autores señalan que esta hipótesis es de especial importancia en las áreas de surgencia costera, debido al gran movimiento de masas de aguas fuera de la costa producto del transporte Ekman. Estudios comparativos en estas regiones, indican que los clupeidos tienden a desovar en áreas y momentos donde las surgencias costeras son mínimos, pudiendo evitar el riesgo que huevos y larvas sean transportadas hacia áreas oceánicas de baja producción (Parrish *et al.,* 1983).

### c) Predación

La predación y el canibalismo también son fuentes importantes de mortalidad en las etapas tempranas de huevos y larvas. Dichas fuentes de mortalidad han recibido una importante atención en los mecanismos denso-dependientes que están modulando la dinámica poblacional en pequeños pelágicos. Como ya hemos señalado anteriormente, el reclutamiento en clupeidos es altamente variable de un año a otro, y el problema principal con estos mecanismos, es evaluar si estos procesos en efecto están variando de un año a otro para dar cuenta de esta variabilidad en el reclutamiento. Por otra parte, algunos autores se cuestionan si estas fuentes denso-dependientes de la mortalidad son a su vez afectadas intrínsecamente por los factores ambientales. Por ejemplo, usualmente se señala que la temperatura es particularmente importante en la determinación de las tasas de crecimiento de huevos y larvas. Si a esto se agrega que la predación entre organismos marinos es fuertemente dependiente del tamaño, se podría pensar que las altas temperaturas pueden aumentar las sobrevivencia de los estadios tempranos a través de un crecimiento más rápido, tal que permita a los huevos y larvas salir rápidamente de etapas altamente susceptibles de predación (Laurence, 1990). Hunter y Kimbrell (1980), señalan que la anchoveta está ejerciendo canibalismo sobre los huevos, lo que ha sido reportado para Engraulis anchoita (De Ciechomski, 1967), Engraulis japonicus (Hayasi, 1967), Engaulis ringens (Rojas de Mendiola et al., 1969) y Engraulis mordax (Loukashkin, 1970). Sobre la base de los contenidos estomacales estos autores determinan que el canibalismo que sufren los huevos por parte de los adultos en E. mordax alcanza al 32% del total de la mortalidad natural, constituyéndose en una de las principales fuentes de mortalidad.

# 1.5.2. Teorías de síntesis

Ninguna de las hipótesis mecanicistas por si solas podría determinar el éxito del reclutamiento en un sistema de surgencia. En estos sistemas, los procesos advectivos, la estabilidad vertical de la columna de agua, la temperatura, la producción y la mezcla turbulenta actúan simultáneamente en la determinación del éxito reproductivo, acorde con los efectos en la alimentación, crecimiento y retención de los primeros estadios. Por esta razón las teorías de síntesis han sido propuestas para unir las hipótesis mecanicistas en un único modelo conceptual. Cole y McGlade (1998) señalan que existen dos teorías de síntesis que explican el éxito en el reclutamiento de clupeiformes: La "ventana ambiental óptima" y la "tríada" de Bakun (1996).

## a) La ventana ambiental óptima

La ventana ambiental óptima propuesta por Cury y Roy (1989) realza la importancia que presenta el balance entre la actividad de la surgencia, que enriquece la zona fótica, y los periodos de calma que permiten una adecuada retención larval. En los sistemas de surgencia la advección vertical, la entrada de nutrientes en la capa fótica, y la turbulencia están estrechamente relacionados con la intensidad del viento. Por lo tanto en estos sistemas, un aumento en la intensidad de la surgencia desde débil a moderada podría determinar un incremento en la producción primaria, y consecuentemente la disponibilidad de alimento larval, con efectos positivos para la sobrevivencia y el posterior reclutamiento. Por otra parte una fuerte intensidad en la surgencia podría tener efectos negativos en el reclutamiento, debido a que aunque se incremente la producción primaria, la alta mezcla inducida por el viento podría disgregar las agrupaciones de alimento. En este contexto, debe existir una relación no lineal, a la

forma de domo, entre el reclutamiento y el índice de surgencia, generándose una ventana ambiental óptima en niveles moderados de intensidad del viento.

La ventana ambiental óptima de Cury y Roy (1989) fue respaldada mediante el método comparativo considerando el reclutamiento de los stocks de cupleiformes de los sistemas de surgencia del oeste de Africa, Perú y California con respecto a la turbulencia generada por el viento y el tamaño del stock desovante. Los resultados mostraron una "ventana ambiental optima" consistente en todos los casos donde el éxito reproductivo es favorecido. En otras palabras, una estrecha banda de velocidad del viento ubicada entre los 5-6 ms<sup>-1</sup>, ni tan alta como para causar mezcla turbulenta y transporte fuera de la costa, ni tan baja como para impedir el enriquecimiento de la capa superficial del mar a través de la surgencia costera y mezcla de aguas.

### b) La tríada de Bakun

La teoría de la tríada (Bakun, 1996) -tal y como fue previamente comentado-, generaliza tres importantes categorías de procesos oceanográficos como los importantes para el éxito reproductivo: a) el enriquecimiento trófico de la columna de agua, b) la retención de huevos y larvas dentro de áreas favorables, y c) la concentración de las partículas de alimento para la primera alimentación larval y subsecuentes estadios de desarrollo. Dentro de un sistema de surgencia, el enriquecimiento es el resultado del proceso del transporte vertical de nutrientes desde aguas profundas a la superficie por la acción del viento paralelo a la costa; la retención proviene de la reducción del transporte mar afuera por advección de las masas de aguas dentro del sistema; y la concentración esta señalada acorde con la formación de termoclinas y la presencia de frentes donde las partículas de alimento tienden a concentrarse. Dado que las condiciones físicas que conducen el enriquecimiento versus los procesos de retención y concentración son mutuamente excluyentes, la variabilidad espacio-temporal de la dinámica física de estos

sistemas es importante en el balance suficiente entre estos procesos para permitir un reclutamiento exitoso.

La hipótesis de la tríada de Bakun ha sido propuesta sobre la base del análisis comparativo de una amplia variedad de sistemas marinos, mientras que la hipótesis de la ventana ambiental óptima ha sido propuesta sólo sobre la base de los sistemas de surgencia. No obstante, dentro del contexto de los sistemas de borde oriental, esta hipótesis unifica los mismos mecanismos que están influenciando el éxito del reclutamiento. La ventana ambiental óptima fue demostrada empíricamente para poblaciones de clupeiformes de los principales sistemas de surgencia de borde oriental. Esto contrasta con la hipótesis de Bakun, que a pesar de que se cuenta con una amplia evidencia respecto de las condiciones oceanográficas, climáticas y pesqueras, la hipótesis aun no ha sido comprobada de una forma estrictamente cuantitativa (Cole y McGlade, 1998). El problema se debe a que de los tres procesos involucrados, solamente el de enriquecimiento ha sido el único factor suficientemente bien cuantificado para ser incluido en los estudios de reclutamiento. El desafío, por lo tanto, es encontrar el balance óptimo entre los tres procesos, una vía que parece razonable es a través de la cuantificación de los procesos de retención y concentración a través de imágenes satelitales de temperatura superficial (Cole y McGlade, 1998).

### 1.6. Cambios de régimen

Durante la década de los años 90 se acrecentó la importancia de la variabilidad de baja frecuencia que está ocurriendo en varios sistemas marinos, y que parecen ser periodos de relativa estabilidad en escalas de una o más décadas seguidos por cambios repentinos que determinan expansiones o contracciones radicales del hábitat de especies importantes, y/o por reemplazos de una especie dominante por otra y, por ende, en la composición de especies. Existe amplia evidencia y acuerdo

a nivel científico que uno de los cambios de régimen importantes ocurrió en 1976, provocando cambios importantes en una variedad de sistemas marinos tanto en los componentes físico como biológicos.

Una hipótesis integradora fue planteada en la reunión organizada en Honolulo, entre el 14 y 17 de Noviembre de 2001 "Climate and Fisheries, interacting paradigms, scales, and policy approaches" (Bakun y Broad, 2002), para explicar los regímenes de sardina en sistemas de corriente limítrofes del Océano Pacífico. La sardina tiene dos hábitat pelágicos distintos, un hábitat costero y otro oceánico asociado a las corrientes limítrofes. Los patrones característicos de variabilidad biológica en dichos sistemas están asociados con la alternancia interdecadal de modos fuertes y débiles de los flujos de las corrientes limítrofes, y relacionados con la estructura de mesoescala del hábitat físico costero y oceánico, como con la capacidad de las especies pelágicas para alternar y utilizar el hábitat oceánico cuando las condiciones son favorables. Cuando las condiciones determinan un flujo débil de las corrientes limítrofes, la re-circulación generaría estructuras de mesoescala tales como remolinos, meandros y áreas frontales que serían favorables para la retención de huevos y larvas en el hábitat fuera de la costa. Por el contrario, un flujo rápido que determina un transporte prácticamente recto y paralelo a la costa con reducidos movimientos de las aguas en el sentido perpendicular al flujo principal, generaría menos estructuras de mesoescala y por lo tanto un hábitat reproductivo desfavorable.

#### 2. Las pesquerías pelágicas nacionales

## 2.1. Desembarques

En Chile, el desembarque total de especies hidrobiológicas se sustenta principalmente en cinco especies de peces pelágicos, constituidas por jurel *Trachurus symmetricus murphyi*, anchoveta *Engraulis ringens*, sardina común *Strangomera bentincki*, caballa *Scomber japonicus* y sardina *Sardinops sagax*, las cuales en conjunto contribuyen con más del 90% al desembarque nacional. El carácter fluctuante de la abundancia de estas especies ha determinado cambios interanuales importantes en la composición por especies. De esta manera, en la década de los años 90 las principales pesquerías nacionales, en términos de los volúmenes de captura, están representadas principalmente por la pesquería de jurel y secundariamente por la pesquería de sardina común y anchoveta en la zona centro-sur; mientras que en la zona norte, domina la anchoveta. El desembarque nacional de recursos hidrobiológicos alcanzó un máximo de 7,8 millones de t en 1994, pero comenzó a declinar en los años subsiguientes lográndose 6,4 millones de t en 1997, 3,8 millones de t en 1998 y recuperándose levemente en 1999 a 5,6 millones de t.

La fuerte disminución del desembarque en 1998 se debe, básicamente, a los problemas que enfrentaron las dos pesquerías más importantes: la anchoveta en la zona norte (Arica-Caldera) y el jurel en la zona centro-sur (Regiones V – X). El desembarque de anchoveta, sin embargo, venía disminuyendo sostenidamente desde 1994, y la recuperación en 1999 se debe en parte a las mayores capturas de esta especie en la zona centro-sur. A su vez, en 1997 la pesquería de jurel entra en crisis debido a la mayor incidencia de jurel menor a 26 cm de longitud horquilla en las capturas (Arcos *et al.*, 2001). Sucesivas vedas y regulaciones fueron implementadas para disminuir el impacto de la pesca sobre la fracción juvenil de jurel, situación que permitió disminuir el desembarque por debajo de los 2 millones de t entre 1998 y 2000. A contar de febrero de 2001, las pesquerías industriales de jurel, sardina común y anchoveta comenzaron a ser administradas bajo el régimen de límite máximo de capturas por armador, un sistema análogo al sistema de cuotas individuales transferibles.

No obstante las regulaciones, las poblaciones marinas explotadas son parte de un complejo sistema de producción biológica, donde la interacción con el hombre, a través de la pesca, constituye solamente un componente más del sistema. Cubillos *et al.* (1998), analizaron la producción primaria requerida para sustentar el desembarque nacional de peces pelágicos (promedio de 1989-1996), postulando que la capacidad productiva del sistema de surgencia costera de Chile impone un límite al desembarque nacional de peces pelágicos costeros y que la sustentabilidad del desembarque en el nivel promedio observado en el período 1989-1996 sólo era posible si los excedentes productivos del stock de jurel permitían mantener la intensidad de explotación ejercida por la flota industrial de cerco de la zona centro-sur de Chile. Hoy vemos que el desembarque nacional de peces pelágicos se ha ubicado en un nivel más bajo precisamente por le menor productividad del jurel, y las regulaciones a través del sistema de cuotas globales de captura.

### 2.2. Influencia del ambiente sobre las pesquerías pelágicas de la zona norte

Para el caso de la anchoveta de la zona norte de Chile, Yáñez *et al.* (2003), encuentran que un modelo de producción que considera como variables explicativas al esfuerzo de pesca y al índice de turbulencia, tomando en cuenta tres clases de edad participantes activamente en las capturas, explica muy bien las fluctuaciones observadas en el periodo 1957-77 ( $R^2 = 0,91$ ). Los autores deducen que el incremento en la turbulencia y la surgencia (estrechamente correlacionadas), observada durante los periodos cálidos, son desfavorables para la producción de anchoveta en el norte de Chile. En dichos periodos, existiría una mayor mortalidad de los estadios tempranos de anchoveta, que se vería reflejado en los reclutamientos básicamente debido a una dispersión y modificación de la calidad del alimento (Bernal *et al.*, 1983; Santander y Flores, 1983). Respecto de las hipótesis de reclutamiento previamente expuestas, y como consecuencia de un incremento de la surgencia costera, aumentaría el transporte mar afuera, lo que provocaría una advección de los huevos y larvas de anchoveta fuera de la costa. Por otra parte, un posible efecto sobre la capturabilidad no se puede excluir, debido a que los individuos de mayor edad en la población podrían modificar su distribución y comportamiento durante dichos periodos cálidos.

Yáñez et al. (2003), también analizan un modelo de producción suponiendo que Chile y Perú se explota una misma unidad de stock de anchoveta, reteniendo un modelo que considera como variables explicativas el esfuerzo de pesca y la TSM  $(R^2 = 0.92)$ . Los autores señalan que la explotación intensiva y las perturbaciones ambientales asociadas a los eventos El Niño y al periodo cálido de más largo plazo que se establece desde mediados de la década de los 70, habrían provocado una notable disminución del stock adulto y del reclutamiento de anchoveta; y por ende, de la pesquería. Sin embargo, desde 1985 se vuelven a observar grandes abundancias de huevos y larvas de anchoveta (Loeb y Rojas, 1988), así como un extraordinario crecimiento de sus capturas desde 1986, afectadas en todo caso por los eventos Niño de 1987, 1991-92 y particularmente de 1997-98. Es probable que la recuperación de la anchoveta se relacione con la tendencia al enfriamiento que presenta el medio después de el evento El Niño 1982-83 en concomitancia con una sostenida disminución de las capturas de sardina (Sardinops sagax). En efecto, después del máximo observado en 1984, el reclutamiento de sardina disminuye en forma lineal con la biomasa parental y con la TSM promedio del año (Yáñez et al., 1988).

En el contexto de la hipótesis de la ventana ambiental óptima, la variabilidad del reclutamiento de la anchoveta en la zona norte de Chile ha sido analizada en función de la biomasa parental y la turbulencia por Yáñez *et al.* (2001). El reclutamiento se relacionó en forma no lineal con el índice de turbulencia (promedio del año), lográndose un óptimo a los 164 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, que corresponde a una

velocidad del viento de 5,46 ms<sup>-1</sup> ( $R^2 = 0.75$ ). A su vez, en el caso de la sardina, el índice de surgencia promedio durante los periodos de reproducción (julio-septiembre y diciembre-enero) explicó satisfactoriamente (p<0.05) el reclutamiento a través de una relación en forma de domo, donde el punto máximo ocurre a una velocidad del viento equivalente a 5,6 ms<sup>-1</sup>. Serra *et al.* (1998), también determinaron una relación no lineal entre el reclutamiento de la sardina y un índice de surgencia pero introduciendo una variable categórica que indicaba la dominancia de anchoveta en el sistema.

Cabe señalar que los índices anuales de surgencia y turbulencia están estrechamente relacionados en la zona norte (Yáñez et al., 2003), razón por la cual se deduce que en valores cercanos a los 5,4 ms-1 de intensidad del viento, la magnitud de la turbulencia y el éxito de reclutamiento serían óptimos para la anchoveta. De esta forma, se plantea la existencia de una ventana ambiental optima, donde el éxito en el reclutamiento estaría determinado por el juego existente entre la intensidad del viento con probabilidad de producir surgencia, mientras que los altos niveles de turbulencia producirían la disgregación del alimento y una mayor probabilidad de transporte de huevos y larvas fuera del área de crianza por advección. Según Roy (1990), a partir de los 5 a 6 ms<sup>-1</sup> la tensión del viento provoca una mezcla significativa en la columna de agua, implicando dispersiones en las concentraciones de plancton. A su vez, Roy et al. (1992) señala que la estrategia reproductiva de pequeños pelágicos es el resultado de una adaptación a condiciones ambientales con arreglo a dicho valor en la velocidad del viento. En tanto que Parrish et al. (1983) señalan la importancia de la advección que produciría la surgencia costera sobre la sobrevivencia de los primeros estadios, así una fuerte deriva puede provocar una alta dispersión de larvas y del alimento de estas, siendo perjudicial para el reclutamiento.

Por otra parte, se considera que el reclutamiento es favorecido con la ocurrencia de "eventos Lasker", los cuales consisten en la frecuencia de periodos durante los cuales la velocidad del viento no excede los 5 ms-1 durante cuatro días consecutivos (Cubillos y Fuenzalida, 1994). De esta manera, y sobre la base de los resultados de Yáñez et al. (2003), se considera que la estrategia reproductiva de la sardina y la anchoveta de la zona norte de Chile podrían estar relacionadas con los mecanismos sugeridos por la hipótesis de turbulencia y de estabilidad de la columna de agua. Cubillos y Fuenzalida (1994) analizaron los componentes de variabilidad estacional e interanual de los índices de surgencia y turbulencia, así como la ocurrencia de "eventos Lasker" en Iquique (20°S) y Antofagasta (23°30'S), con énfasis en la incidencia sobre los aspectos reproductivos de los stocks pelágicos de sardina y anchoveta de la zona norte. Los autores encontraron que en Iquique la señal anual de los índices de surgencia y turbulencia indican que una mayor intensidad de los vientos, para generar surgencia y mezcla turbulenta de los estratos superficiales de las aguas costeras, desde enero a marzo, mientras que en junio-agosto, se presenta con valores mínimos. No obstante, en Antofagasta los valores máximos se presentan desde septiembre a febrero y mínimos en mayojunio. En cuanto a la frecuencia de periodos de calma o "eventos Lasker", se observó que en Iquique existe una mayor frecuencia porcentual entre abril y noviembre, mientras que Antofagasta ocurriría entre mayo y julio.

Desde el punto de vista reproductivo, tanto la sardina como la anchoveta se caracterizan por ser desovantes múltiples, presentando un extenso periodo reproductivo con dos máximos estacionales en la zona norte de Chile, siendo el que ocurre en la época invernal el de mayor importancia y otro de carácter secundario en la época de verano (Serra y Tsukayama, 1988). La reproducción es uno de los procesos más importantes en la historia de vida de los peces, donde tiene una gran importancia la estrategia de desove que se adopte frente a las condiciones ambientales locales. Por lo tanto, la mayor frecuencia de "eventos Lasker" durante el invierno en las áreas de desove cercanas a Iquique y

Antofogasta podrían ser favorables para la sobrevivencia de los primeros estadios de vida de sardina y anchoveta de la zona norte de Chile.

Según Yáñez et al. (2003), cuando el reclutamiento de anchoveta comienza a decaer, producto de los altos valores del índice de surgencia, los reclutamientos de sardina comienza a aumentar hasta estabilizarse en valores más altos que los encontrados para la anchoveta. Esta diferencia, podría estar determinando la alternancia en la abundancia observada en estas especies en la zona norte, gatillada por forzantes climáticos de más larga escala que generaron un cambio de régimen a mediados de los 70 en el ecosistema de surgencia del norte de Chile, al pasar de un sistema dominado por la anchoveta a otro dominado por sardina. Después de 1985 se sugiere un nuevo cambio en el ambiente pelágico del norte de Chile, el cual se torna favorable para la anchoveta y desfavorable para la sardina. Al respecto, cabe señalar que la relación entre el reclutamiento de sardina y la TSM presenta una forma de domo con un máximo situado en los 17,7 °C (Yáñez y Espíndola, 1998). En otros sistemas de surgencia, se han observados ciclos de alternancia entre sardina y anchoveta (Lluch-Belda et al., 1992), como el de California, Kuroshio, Benguela y Humboldt. Esto significa que, regímenes con alta abundancia de sardina son marcados por bajas abundancia en anchoveta (o viceversa).

### 3. Referencias

- Arcos, D., L. Cubillos, S. Núñez. 2001 .The jack mackerel fishery and El Niño 1997-98 effects off Chile. Progress in Oceanography 49, 597-617.
- **Bakun, A. 1989.** Recruitment in fishery resources and its relationship to environment: accesible pathways to greater insinght. Pacífico Sur, Número Especial, 25-34.
- Bakun, A. 1996. Patterns in the Ocean: ocean processes and marine population dynamics. University of California Sea Grant, California, USA & Centro de Investigaciones Biológicas de Noroeste, Baja California Sur, México, 323 p.

- Bakun, A. 2001. "School-mix feedback": a different way to think about low frequency variability in large mobile fish populations. Progress in Oceanography 49, 485-511.
- Bakun, A., Broad K. (Eds.). 2002. Climate and fisheries: interacting paradigms, scales and policy approaches. IRI, Columbia University, 67 pp.
- Bakun, A., Cury P. 1999. The "school-trap": a mechanism promoting large-amplitude outof-phase population oscillations of small pelagic fish species. Ecology Letters 2(6), 49-366.
- Bakun, A., Parrish R.. 1980. Environmental inputs to fishery population models for eastern boundary currents regions. UNESCO, IOC Workshop Report 28, 67-104.
- Barange, M. (Ed.). 2001. Report of the 1<sup>st</sup> meeting of the SPACC/IOC study group on "use of environmental indices in the management of pelagic fish populations". GLOBEC Special Contribution 5, 122 p.
- Barange, M. (Ed.). 2002. Report of the 2<sup>nd</sup> meeting of the SPACC/IOC study group on "use of environmental indices in the management of pelagic fish populations".
  GLOBEC Special Contribution 6, 156 p.
- Barnes, J.T., Jacobson, L.D., MacCall, A.D., Wolf, P. 1992. Recent population trends and abundance estimates for the Pacific sardine (*Sardinops sagax*). Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep. 33: 60-75.
- Baumgartner, T.R., Soutar, A., Ferreira-Bartrina, V. 1992. Reconstruction of the history of Pacific sardine and Northern anchovy populations over the past 2 millenia from sediments of the Santa-Barbara Basin, California. Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep. 33: 24-40.
- Beamish, R. (Ed.). 1995. Climate change and northern fish populations. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 121:1-739.
- Bernal, P., Robles, F., Rojas, O. 1983. Variabilidad física y biológica en la región meridional del sistema de corrientes Chile-Perú. FAO Fish. Rep. 291(3): 683-711.
- **Bernal, P. 1990.** La oceanografía del sistema de corrientes de Chile-Perú en relación a las pesquerías pelágicas: una revisión. *In:* Perspectivas de la actividad pesquera en

Chile. M.A. Barbieri (Ed.). Escuela de Ciencias del Mar, UCV, Valparaíso (Chile), 35-48.

- **Beverton, R.J.H. 1990.** Small marine pelagic fish and the threat of fishing: are they endangered?. Journal of Fish Biology. 37(A): 5-16.
- Blaxter, J.H.S., Hunter, J.S. 1982. The biology of the clupeoid fishes. Advances in Marine Biology 20: 201-223.
- Caddy, J.F., Gulland, J.A. 1983. Historical patterns of fish stocks, Mar. Pol. 7: 267-278.
- Cole, J., McGlade, J. 1998. Clupeoid population variability, the environment and satellite imagery in coastal upwelling systems. Rev. Fish Biol. and Fish., 8: 445-471.
- Crawford, R.J.M., Shannon, L.V. 1988. Long-term changes in the distribution of fish catches in the Benguela. Proc. Long Term Changes in Marine Fish Populations. Instituto de Investigaciones Marinas, Vigo, España, 449-480.
- Cubillos, L., Núñez, S., Arcos, D. 1998. Producción primaria requerida para sustentar el desembarque de peces pelágicos en Chile. Invest. Mar., Valparaíso, 26: 83-96.
- Cubillos L., Fuenzalida, R. 1994. Indices de surgencia, turbulencia y ocurrencia de "eventos Lasker" en Iquique y Antofagasta (Chile) y su incidencia sobre los aspectos reproductivos de Sardinops sagax y Engraulis ringens. Ciencia y Tecnología del Mar, CONA,17: 3-13.
- Cury, P., Bakun, A., Crawford, R.J.M., Jarre, A., Quiñones, R.A., Shannon, L.J., Verheye, H.M. 2000. Small pelagics in upwelling systems: patterns of interaction and structural changes in "wasp-waist" ecosystems. ICES Journal of Marine Science 57: 603-618.
- Cury, P., Roy, C. 1989. Optimal environmental window and pelagic fish reproductive success in upwelling areas. Canadian Journal of Fish and Aquatic Science, 46:670-680.
- Cury, P. 1994. Obstinate nature: an ecology of individuals. Thoughts on reproductive behavior and biodiversity. Canadian Journal of Fish and Aquatic Science (Perspectives), 51(7):1664-1673.
- Cushing, D.H. 1975. Marine ecology and fisheries. Cambrigde University Press, London. 278 pp.
- **Cushing, D. H. 1990.** Plankton production and year-class strength in fish populations: is update of the match/mismatch hypothesis. Advances in Marine Biology, 26:250-294.
- De Ciechomski, J.D. 1967. Present state of the investigations on the Argentine anchovy *Engraulis anchoita* (Hubbs & Marini). Calif. Coop. Oceanic. Fish. Invest. Rep., 11:58-71.
- Durand, H.M., P. Cury, R. Mendelssohn, C. Roy, A. Bakun, y D. Pauly (eds.). 1998. Global versus local changes in upwelling systems. ORSTOM, Paris, 593 p.
- Harden-Jones, F.R. 1968. Fish migration. Edward Arnold Ltd., London, 375 pp.
- Hare, S.R., Mantua, N.J. 2000. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. Progress in Oceanography, 476: 99-102.
- Hayasi, S. 1967. A note on the biology and fishery of Japanese anchovy. Engraulis japonica (Houttuyn). Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep. 11: 44-57.
- Hunter, J.R., Kimbrell, C.A. 1980. Egg cannibalism in the Northern anchovy *Engraulis mordax* Fishery Bulletin US, 78: 811-816.
- Iles, T. D., Sinclair, M. 1982. Atlantic herring: stock discreteness and abundance. Science, 215: 627-633.
- Jacobson, L.D., De Oliveira, J.A., Barrange, M., Cisneros-Mata, M. A., Félix-Uraga, R., Hunter, J.R., Kim, J.G., Matsuura, Y., Ñiquen, M., Porteiro, C., Rothschild, B., Sanchez, R.P., Serra, R., Uriarte, A., Wada, T. 2001. Surplus production, variability, and climate change in the great sardine and anchovy fisheries. Canadian Journal of Fish and Aquatic Science, 58:
- Kawasaki, T., Tanaka, S., Toba, Y., Taniguchi, A. (Eds). 1991. Long-Term Variability of Pelagic Fish Populations and Their Environment. Pergamon Press, 402.
- Kawasaki, T., Omori, M. 1995. Possible mechanisms underlying fluctuations in the Far Eastern sardine population inferred from time series of two biological traits. Fisheries Oceanography 4: 238-242.
- Kawasaki, T. 1983. Why do some pelagic fishes have fluctuations in their number? biological basis of fluctuation from the evolutionary ecology. FAO Fish. Rep. 291:1065-1080.

- Lasker, R. 1975. Field criteria for survival of anchovy larvae: relation between inshore chlorophyll maximun layers and successful first feeding. Fishery Bulletin US, 73: 453-462.
- Lasker, R. 1978. The relation between oceanographic conditions and larval anchovy food in the California currents: identification of factors contributing to recruitment failure. Rapports et Proces-verbaux des Réunions, CEM 173: 212-230.
- Lasker, R. 1981. The role of a stable ocean in larval fish survival and subsequent recruitment. In: Lasker R (Ed.) Marine fish larvae: morphology, ecology and relation to fisheries. University of Washington Press, Seattle, 80-87.
- Lasker, R.1985. What limits clupeoid production?. Canadian Journal of Fish and Aquatic Science 42: 31-38.
- Laurence, G.C. 1990. Growth, survival and recruitment in large marine ecosystems. In Sherman, K., Alexander, L.M and Gold, B.D. (Eds). Large Marine Ecosystems: Patterns, Processes and Yields. Washington, DC: Am. Ass. Advancement of Science, 132-150.
- Le Clus, F. 1990. Impact and implications od large-scale environmental anomalies on the spatial distribution of spawning of the Namibian pilchard and anchovy populations. South African Journal of Marine Science, 9: 141-159.
- Le Clus, F. 1991. Hydrographic features related to pilchad and anchovy spawning in the northern Benguela system, comparing three environmental regimes. South African Journal of Marine Science, 10: 103-124.
- Loeb, V., Rojas, O. 1988. Interanual variation of icthyoplankton composition and abundance relations off northern Chile. 1964-83. Fishery Bulletin US, 86: 1-24.
- Loukashkin. A.S. 1970. On the diet and feeding behavior of the northern anchovy *Engraulis mordax* (Girard). Proc. Calif. Acad. Sci. Ser. 4, 37: 419-458.
- Lluch-Belda, D., Hernandez-Vasquez, S., Lluch-Cota, SD.B., Salinas-Zabala, C.A., Schwartzlose, R.A. 1992. The recovery of the California sardine as related to global change. CalCOFI Rep. 33: 50-59.
- MacCall, A. 1990. Dynamic geography of marine fish population. Washington Sea Grant, Seattle, WA, 155 p.

- Marshall, C.T., Kjesbu, O.S., Yaragina, N.A., Solemdal, I., Ulltang, Ø. 1998. Is spawner biomass a sensitive measure of the reproductive and recruitment potential of Northeast Arctic cod?. Canadian Journal of Fish and Aquatic Science, 55: 1766-1783.
- Myers, R.A., Barrowman, N.J. 1996. Is fish recruitment related to spawners abundance?. Fishery Bulletin US, 94: 707-724.
- Parrish, R.H., A. Bakun, D.M. Husby and C.S. Nelson. 1983. Comparative climatology of selected environmental processes in relation to eastern boundary current pelagic fish reproduction. FAO Fishery Report 291(3): 731-777.
- Peterman, R.M. & M.J. Bradford. 1987. Wind speed and mortality rate of a marine fish, the northern anchovy (*Engraulis mordax*). Science 235: 354-356.
- Rojas de Mendiola, B. 1989. Stomach contens of anchoveta (*Engraulis ringens*), 1953-1974. *In*: D. Pauly, P. Muck, J. Mendo and I. Tsukayama (Eds). The Peruvian upwelling ecosystem: dynamics and interactions. ICLARM Conference Procceedings 18 & Instituto del Mar del Perú (IMARPE), 97-104.
- Roy, C. 1990. Réponses des stocks de poissons pelagiques a la dynamique des upwelling en Afrique de l'Ouest: analyse et modelisation. Thèse Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France, 149 pp.
- Roy, C., P. Cury, S. Kifani. 1992. Pelagic fish recruitment success and reproductive strategy in upwelling areas: environmental compromises. *In* Benguela Trophic Functioning, AI.L. Paine, K.H. Brink, K.H. Mann and R. Hilborn (Eds.), South African Journal of Marine Science, 12: 135-146.
- Santander, H., Flores, R. 1983. Los desoves y distribución larval de cuatro especies pelágicas y sus relaciones con variaciones del ambiente marino frente al Perú. FAO Fish. Rep., 291: 835-567.
- Serra, J.R, Tsukayama, I. 1988. Sinopsis de datos biológicos y pesqueros de Sardinops sagax, en el Pacífico Suroriental. FAO Sinop. Pesca (13) Rev. 1: 60 p.
- Serra, J.R., Cury, P., Roy, C. 1998. The recruitment of the Chilean sardine (Sardinops sagax) and the optimal environmental window. In: Global versus local changes in upwelling systems. M. Durand, P. Cury, R. Mendelssohn, C. Roy, A. Bakun & D. Pauly. (Eds). ORSTON Editions, Paris, 267-274.

- Sharp, G.D. 1980. Report of the workshop on effects of environmental variation on survival of larval pelagic fishes. IOC Workshop, 28: 15-29.
- Sharp, G.D. y J. Csirke (Eds.). 1983. Proceedings of the expert consultation to examine changes in abundance and species composition of neritic fish resources. FAO Fish. Rep. 291(2), 1-553; (3), 557-273.
- Sinclair, M., Iles, T. D. 1989. Population regulation and speciation in the oceans. J. Cons. Int. Explorer. Mer, 45: 165-175.
- Sinclair, M. 1988. Marine populations: an essay on population regulation and speciation. University of Washington Press, Seattle, 252 pp.
- Soutar, A., Isaacs, J.D. 1969. A history of fish populations inferred from fish scales in anaerobic sediments off California. Calif. Mar. Res. Comm. CalCOFI, 13:63-70.
- Spencer, P. & J. Collie. 1997. Patterns of population variability in marine fish stocks. Fisheries Oceanography 6: 188-204.
- Steele, J.H. 1996. Regime shifts in fisheries management. Fisheries Research, 25: 19-23.
- Steele, J.H. 1985. A comparison of terrestrial and marine ecological systems. Nature 313: 355-358.
- Stenseth, N.C., Mysterud, A., Ottersen, C., Hurrell, J.W., Chan, K., Lima, M. 2002. Ecological effects of climate fluctuations. Science 297: 1292–1296.
- Thomas, R.M., Boyd, A.J. 1985. Trends in the Namibian pilchard *Sardinops ocellata* fisheries in 1984. Coll. Scient. Pap. Int. Comm. SE. Atl. Fish. 12, 181-191.
- Wyatt, T., Larrañeta, M.G. (Eds.) 1988. Long term changes in marine fish populations. International Symp., Vigo, Spain, 1986.
- Yáñez, E., Garcia, M., Barbieri, M.A. 1998. Pelagic fish stocks and environmental changes in the South East Pacific. Proc. Global versus Local Changes in Upwelling Systems, ORSTOM, París, 274-291.
- Yáñez E., Barbieri, M.A., Silva, C., Nieto, K., Espíndola, F. 2001. Climate variability and pelagic fisheries in northern Chile. Progress in Oceanography 49: 581-596.
- Yáñez E., Barbieri, M.A., Silva C. 2003. Fluctuaciones ambientales de baja frecuencia y principales pesquerías pelágicas chilenas. *In*: Actividad Pesquera y de Acuicultura en Chile. E. Yáñez (Ed.), Escuela de Ciencias del Mar, PUCV, 109-122.

- Yáñez, E., Espíndola, F. 1998. Análisis de las ventanas ambientales óptimas para los reclutamientos de sardina y anchoveta. Estudios y Documentos, Escuela de Ciencias del Mar, UCV, Valparaíso, Nº 25/98, 17 p.
- Yasuda, I., Sugisaki, H., Watanabe, Y., Minobe, S., Oozeki, Y. 1999. Interdecadal variations in Japanese sardine and ocean/climate. Fisheries Oceanography 8:18-24.

## C) INDICADORES ECOSISTÉMICOS Y MANEJO DE PESQUERÍAS

La idea de utilizar indicadores en el manejo de pesquerías nace de las teorías que incluyen los efectos del ecosistema en la pesquerías y de las pesquerías en los ecosistemas. Pitcher *et al.* (1998) enfatizan la necesidad de considerar la reconstrucción del ecosistema como un nuevo objetivo para el manejo de los recursos marinos. En 1999, el Scientific Committee on Oceanic Research (SCOR), el International Council for the Exploration of the Sea (ICES) y el Institute pour le Research and Development (IRD) realizan la conferencia "Efectos ecosistémicos de la pesca", en donde enfatizan la necesidad de considerar un enfoque de las pesquerías a nivel del ecosistema.

Los indicadores se definen como variables o índices que se relacionan con un criterio. Sus fluctuaciones muestran las variaciones en aquellos elementos fundamentales de la sostenibilidad del ecosistema, los recursos pesqueros o el sector, y el bienestar social y económico. La posición y tendencia de un indicador, en relación con los puntos de referencia o valores, indican la situación actual y dinámica del sistema (FAO, 1999).

Existen diferentes tipos de indicadores, directos e indirectos (proxies.).

- Los indicadores directos tienen una relación evidente e inequívoca con el criterio (por ejemplo, la biomasa del recurso es un indicador directo de la abundancia del recurso).
- Los indicadores indirectos (proxies) tienen una relación oblicua con el criterio (por ejemplo, la captura por unidad de esfuerzo es un indicador indirecto de la abundancia del recurso). El uso de indicadores indirectos requiere una explicación clara de la relación entre esta medida y el criterio definido.

La segunda tipología tiene que ver la información requerida para dar contenido a los indicadores: cuantitativos y cualitativos.

- Los **indicadores cuantitativos** reflejan datos que pueden ser expresados con números.
- Los indicadores cualitativos reflejan información que debe ser expresada mediante palabras o conceptos; generalmente están relacionados con criterios económicos o sociales.

El desarrollo de indicadores y puntos de referencia bajo el enfoque ecosistémico en pesquerías es un área activa de investigación. Existen una serie de organizaciones abordando el tema "Indicadores ecosistémicos para el manejo pesquero", ya sea desde el punto de vista de la investigación, como del manejo operacional. FAO, GLOBEC- Small Pelagic fish and Climate Change (SPACC)/Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) y Scientific Committee on Oceanic Research (SCOR)/IOC, son algunas de las instituciones que actualmente desarrollan la temática.

En FAO (1999) y Garcia *et al.* (2000) se publican las Orientaciones Técnicas para la Pesca Responsable Nº 8: "Indicadores para el desarrollo sostenible de pesquerías de capturas marinas", producidas para dar soporte a la implementación del Código de Conducta para la Pesca Responsable (FAO, 1995). Las orientaciones fueron desarrolladas en base a la Consultoría Técnica realizada a 26 expertos de 13 países, la cual fue organizada por el Departament of Agriculture, del Fisheries and Forestry Australia (AFFA), en estrecha colaboración con FAO. En síntesis, las orientaciones están dirigidas a:

- Aclarar, bajo un enfoque sectorial y holístico, porqué es necesario un sistema de indicadores para el seguimiento de la contribución de las pesquerías al desarrollo sostenible.
- Entregar información sobre el tipo de indicadores y puntos de referencia relacionados.
- Representados por objetos gráficos (tablas, diagramas) de diseño coherente, identificar los marcos conceptuales que pueden ser usados para organizar los indicadores y puntos de referencia, reflejando los objetivos, las restricciones y los estados de los diferentes elementos. La definición de desarrollo sustentable adoptada por FAO es considerada como un marco general para el desarrollo sustentable de las pesquerías, estableciendo cinco componentes principales: los mútliples recursos en sus ambientes; las necesidades humanas sociales y económicas; la tecnología; y las instituciones (Fig. 7).
- Describir el diseño, desarrollo e implementación (incluyendo ensayo y evaluación), a nivel nacional o regional, de un Sistema de Referencia para el Desarrollo Sostenible (SRDS).
- Entregar una serie de orientaciones prácticas relacionadas, entre otros, con la organización y los procesos necesarios para aplicar un SRDS, y el apoyo y capacidad institucional necesarios.



Figura 7. Marco conceptual FAO para el desarrollo sustentable.

En el 2000 se forma el grupo de trabajo GLOBEC-SPACC/IOC "Uso de índices ambientales (IA) en el manejo de poblaciones de peces pelágicos (PP)". La primera reunión de SPACC/IOC se realizó en septiembre de 2001 en Cape Town, Sudáfrica (GLOBEC Special Contribution No. 5). En tanto que una segunda reunión se realizó durante noviembre de 2002 en Paris, Francia (GLOBEC Special Contribution No. 6). Los términos de referencia del grupo son:

- Proveer una revisión sobre la aplicación de IA como herramienta para estudios de retrospección/estado actual/predicción de las fluctuaciones de PP en áreas determinadas.
- Desarrollar un marco científico para entender las relaciones entre variables ambientales y fluctuaciones de los PP.
- Investigar los requerimientos para incorporar IA en modelos de evaluación de stock y de manejo operacional.
- Proponer un conjunto de variables ambientales para usar en el manejo de poblaciones de PP.

Por otro lado, en 2001 se crea el grupo de trabajo SCOR/IOC 119 "Indicadores ecosistémicos cuantitativos para el manejo de pesquerías" (Cury y Christensen

2001). El objetivo general es desarrollar teoría para evaluar cambios en ecosistemas marinos (tanto de estados como de procesos), desde perspectivas ambientales, ecológicas y pesqueras. Los términos de referencia del grupo son:

- Revisar el estado actual del conocimiento en diferentes disciplinas marinas y terrestres relevantes para el desarrollo de indicadores de ecosistemas marinos (ambiental, ecológico y pesquero).
- Revisar teorías (jerárquica, cascada,...) e indicadores que han sido desarrollados en ecologías terrestre y evaluar su utilidad para ecosistemas marinos.
- Desarrollar nuevos indicadores para estudiar el rol funcional de las especies en los ecosistemas, la explotación y el ambiente utilizando salidas de modelos multi-especies o series de tiempo disponibles (estadísticas de capturas, ...), y empleando satélites, SIG e hidroacústica.
- Aplicar estos indicadores en forma comparativa para caracterizar estados, cambios y funcionamiento de ecosistemas
- Evaluar la utilidad de estos indicadores para propósitos de manejo y para la utilización sostenible de los recursos renovables.

El grupo SCOR/IOC 119 funcionó entre el 2001 y 2004, llevándose a cabo tres reuniones de trabajo. La primera reunión se realiza durante octubre de 2001 en Reykjavik, Islandia; mientras que la segunda se efectúa en diciembre de 2002 en Cape Town, Sudáfrica. El grupo culmina con el Simposio Internacional "Quantitative Ecosystem Indicators for Fisheries Management" llevado a cabo del 31 de marzo al 3 de abril de 2004 en Paris, Francia. En este Simposio participó el Jefe del Proyecto FIP 2003-33 (Dr. Eleuterio Yáñez), presentando dos trabajos, uno sobre indicadores restrospectivos (*Low Frequency Environmental Fluctuations and Main Chilean Pelagic Fisheries*, de los autores *E. Yáñez*, *C. Silva y M.A. Barbieri*) y otro sobre indicadores de corto plazo o estado actual (*Anchovy Short-Term Availability*)

*Index in Northern Chile,* de los autores *E. Yáñez, C. Silva, K. Nieto y M.A. Barbieri*) (http://www.latercera.cl/lt/FrontDoor/0,4427,3255\_5658,00.html).

Grupos de Canadá también se encuentran trabajando en el uso de indicadores ecosistémicos para la sustentabilidad de las pesquerías. Durante marzo de 2001 se realizó un taller de trabajo organizado por el Department Fisheries and Oceans (DFO), para identificar objetivos a nivel ecosistémico con sus indicadores y puntos de referencia asociados, que podrían ser utilizados en la implementación de planes de manejo en actividades oceánicas (Jamieson *et al.*, 2001). Sainsury y Sumaila (2002) entregan un marco conceptual práctico para el manejo de pesquerías bajo un enfoque ecosistémico, basado en el conocimiento actual de las pesquerías y los ecosistemas.

Por su parte, en un estudio sobre manejo de pesquerías basado en el ecosistema, el US National Marine Fisheries Service (NMFS) discute sobre los asuntos relacionados con la incorporación de aspectos ecosistémicos en el manejo de pesquerías, clarificando que existe un largo camino antes de que sean identificados indicadores operacionales (NMFS, 1999).

#### 1. Indicadores para evaluar el efecto del ecosistema en las pesquerías

Una serie de trabajos han utilizado indicadores ecosistémicos para estudiar los efectos del ambiente en las fluctuaciones de las pesquerías en el sistema de Humboldt. Se piensa que estos regulan la abundancia y distribución de anchoveta y sardina; el más importante y utilizado es la temperatura superficial del mar.

En la zona norte de Chile se han utilizado indicadores ambientales retrospectivos para evaluar su efecto en la abundancia y distribución de los recursos pelágicos como anchoveta, sardina y jurel. Se han estudiado indicadores ambientales como TSM, índice de surgencia, índice de turbulencia, nivel del mar, temperatura del aire, índice de la oscilación del sur y concentración de clorofila (Yáñez y Barbieri, 1988; Serra, 1989; Yáñez *et al.*, 1994; Barbieri *et al.*, 1995; Yáñez *et al.*, 1998 y 2001; Nieto *et al.*, 2001; Yáñez *et al.*, 2002a y b; Silva *et al.*, 2002; Yáñez *et al.*, 2003).

Los indicadores ambientales utilizados en estudios restrospectivos en la zona Centro-Sur de Chile son TSM, índice de surgencia, índice de turbulencia, nivel del mar y temperatura del aire (Yáñez *et al.*, 1992, 1997, 2002a y 2003; Arcos *et al.*, 2001; Cubillos *et al.*, 2001; Cubillos y Arcos, 2002; Cubillos *et al.*, 2003).

#### 2. Indicadores para evaluar efecto de las pesquerías en el ecosistema

La evaluación del efecto de la pesca en diferentes componentes del ecosistema se ha propuesto incorporarla al manejo de pesquerías (FAO, 1999; ICES, 2000). Sin embargo, no existen trabajos en el sistema de Humboldt que utilicen indicadores para evaluar el efecto de las pesquerías en el ecosistema; no obstante, en otras partes se han propuesto indicadores para medir los impactos directos e indirectos en comunidades de peces y bentónicas (FAO, 1999; Jordan y Vaas, 2000; Jordan, 2001; Rochet y Trenkel, 2003). Jordan y Vaas (2000) desarrollan un índice de integridad del ecosistema, además de proponer y aplicar un enfoque teórico para evaluar la calidad de ecosistemas bajo stress antropogénico. En la ejecución del Plan del Ecosistema de Pesquerías de Chasepeake Bay (USA), Jordan (2001) muestra los indicadores de "bienestar" del ecosistema que han sido desarrollados, además de proponer un marco conceptual y proceso para elaborar indicadores. El marco conceptual que propone indica que bajo una variabilidad espacio-temporal los indicadores integran información de dimensiones ecológicas, ambientales y sociales, todo enfocado hacia las pesquerías tanto en su efecto en el ecosistema y como es afectada por el ecosistema (Fig. 8).

En el contexto del Simposio ICES/SCOR Ecosystems Effects of Fishing 1999, Gislason *et al.* (2000) discuten sobre incorporar objetivos ecosistémicos dentro del manejo de pesquerías. Discuten indicadores para cada uno de los seis objetivos de conservación propuestos y que dicen relación con mantener: (1) diversidad del ecosistema, (2) diversidad especies, (3) variabilidad genética dentro de especies, (4) especies directamente impactadas, (5) especies ecológicamente dependientes, y (6) balance del nivel trófico.



Figura 8. Marco conceptual para el desarrollo de indicadores (Jordan, 2001).

Rochet y Trenkel (2003) revisan y proponen descriptores de población y comunidad que podrían ser usados como indicadores del impacto de la pesca. Los criterios que utilizan para evaluar los indicadores son definición del indicador, efecto esperado de la pesca y capacidad para ser medidos. Indican que los indicadores de población que pueden ser operacionales son la tasa de mortalidad total, tasa de explotación y longitud media. Por otra parte, los indicadores de comunidad operacionales podrían ser tamaño de espectro y proporción de peces piscívoros en la comunidad. Además, proponen nuevos indicadores como el cambio en mortalidad por pesca requerida para revertir tasa de crecimiento poblacional, la proporción de especies no comerciales en la comunidad, y la longitud y peso promedio en la comunidad.

No obstante, los indicadores para valorar el efecto de la pesca en diferentes componentes del ecosistema han sido evaluados basado en consideraciones teóricas. Trenkel y Rochet (2003) comparan el desempeño de indicadores (Tabla 1) aplicados a datos de crucero Francés de evaluación de peces bentónicos en el Mar Céltico aplicando tres criterios estadísticos: precisión de la estimación del indicador, poder del test de hipótesis, y disponibilidad y método de estimación de los puntos de referencia.

Tabla 1. Indicadores para medir impacto de la pesca en una población i y en una comunidad compuesta por *S* especies.

Indicadores de población	Indicadores de comunidad					
Tasa de crecimiento poblacional intrínseco (r <sub>i</sub> )	Índice de Biodiversidad ( $\Delta_i$ )					
Tasa mortalidad total ( $Z_i$ )	Curvas de dominancia parcial y dominancia-k					
Tasa explotación $(F_i/Z_i)$	Composición de especies					
Longitud media de las capturas ( $L_{bar}$ )	Proporción de especies no-comerciales					
Cambio en F para invertir crecimiento	Distribución de longitud media de poblaciones					
poblacional ( $\Delta F_i$ )						
	Relación tamaño y abundancia poblacional					
	Biomasa y abundancia (en número) total					
	Proporción de piscívoros					
	Peso medio individual					
	Tamaño espectral					

Fuente: Trenkel y Rochet (2003)

### 3. Indicadores proxies del ecosistema

No existen reglas para determinar cuál es el tipo más apropiado de indicador en casos particulares. Siempre que sea posible, el uso de indicadores directos y cuantitativos es recomendable, aunque el análisis se debe realizar caso por caso de acuerdo con criterios establecidos, como las fuentes de información, el costo de recopilar la información necesaria, etc. Lo más importante es, siempre, que los

indicadores deben ser verificables. Esto significa que la información necesaria tiene que ser accesible y que, con esta información, dos observadores distintos deberían ser capaces de llegar a la misma conclusión.

Por ejemplo, un indicador confiable de la abundancia del stock se puede obtener de la información recolectada de cruceros de evaluación standardizados. Los cruceros son "estándar" en el sentido de que ellos se fijan en el tiempo y el espacio, utiliza un diseño estadístico designado, emplea un método constante de muestreo de un año a otro, especialmente para especies de fondo, tales cruceros tienden a ser utilizado en la construcción de índices para varias especie de peces que puede informar sobre los cambios de la composición en comunidades de peces (Kennet, 1997).

Sin embargo, cuando no se posee esta información un indicador o variable proxy es necesaria para explicar un determinado proceso. En pesquerías, un proxy de la abundancia del stock se estima como la captura media de todo (o algunos) los barcos en ese período, o Captura por unidad de esfuerzo (CPUE) (Alvarez *et al*, 2001). Por ejemplo, Alvarez (2001) calculó un proxy del stock como "el promedio total del desembarque por unidad de esfuerzo mensual". Otros autores han utilizado "la media geométrica de la captura por viaje de un subconjunto de los barcos que pescaron en todos los meses del año.

James (1997) analiza cómo la turbulencia influye en la primera alimentación de larvas y sus presa. Los resultados de modelos estudiados sugieren la mezcla de la capa superior provocada por el viento puede ser beneficioso o perjudicial para la sobrevivencia larval del pez dependiendo de la intensidad de la turbulencia. Claramente, hay aspectos de la turbulencia y su impacto en sobrevivencia larval que no se conocen. Utiliza la velocidad de viento al cubo como un proxy de la turbulencia y examina la influencia de este índice en las observaciones. Las pautas que surgieron cuando se comparó la sobrevivencia larval y el índice son (1) viento fuerte durante el período que primera alimentación se asociaron con períodos de sobrevivencia baja, y (2) los períodos de sobrevivencia más alta fue asociada con períodos de viento de calma a menudo interrumpido por mezclas fuertes (Bailey y Macklin 1994). Algunos resultados notan que los índices desarrollados a partir de modelos físicos de circulación debe ser utilizado en vez de descriptores ambientales crudos (por ejemplo, la temperatura profundidad-promediado de agua) conduciendo análisis estadísticos exploratorios de los efectos de tales procesos en el reclutamiento del bacalao del atlántico (James, 1997).

Otra aplicación de variables proxies la encontramos en datos ambientales tomados durante cruceros de investigación, que rara vez se utilizan para análisis retrospectivo y para modelar la pesquería. Las series de tiempo ambientales se analizan y modelan más a menudo con la utilización de monitoreos meteorológicos rutinarios y parámetros oceanográficos que representan índices anuales en el tiempo (es decir, un valor por año) y regional en el espacio (es decir, el hábitat total o el área de desove del stock). Sin embargo, los datos verdaderamente utilizados son a menudo valores proxies para estas escalas. Por ejemplo, la escala anual puede ser representado por dos meses de temperatura media representando las condiciones ambientales de una temporada del desove.

La escala espacial generalmente se asume que representa las condiciones sobre una escala espacial regional; sin embargo, los datos utilizados a menudo se derivan de una sola estación de la costa y son por lo tanto los índices proxies de micro-escala para una escala espacial más grande (Parrish, 1997). Hay muchos índices ambientales disponibles. En escalas espacio-temporales grandes, el Pacific Decadal Oscillation (PDO) se expresa en anomalías de la temperatura superficial del mar. La oscilación del PDO (positivo a negativo) se ha asociado con pautas del cambio en la producción oceánica, y específicamente en el crecimiento y producción comercial de especies como el salmón. En una escala regional, los índices de tiempo que integra tanto los datos de la temperatura como la precipitación, pueden ser proxies útiles del flujo de un río, la temporada en que crece el estuario, y la producción de la especie específica (Parrish *et al.*, 2000).

En ocasiones una sola variable no es suficiente como proxy de un fenómeno o proceso en estudio, en el estudio de la variabilidad climática y área de desove de sardina de California (GLOBEC, 1999), se observó que en general existe una relación consistente entre un rango particular de temperatura del agua y la distribución del desove para determinado año y región del crucero, pero existen diferencias substanciales para la misma especie entre años y en ecosistemas diferentes que indican que sólo la temperatura no es suficiente como una variable proxy para la determinación del área de desove. Claramente, un proxy del forraje así como las masas de agua son necesarios.

Para Parrish *et al.* (2000), la completa caracterización de un sistema (estuario), inclusive los componentes físicos, biológicos y socioeconómicos, requiere el desarrollo de un conjunto de indicadores que indiquen el estado de la salud y la integridad ecológica del sistema. La habilidad del sistema de mantener la biomasa y biodiversidad para su extracción es una medida de la salud de sistema, y más allá de eso, de la salud del sistema socioeconómico. Sin embargo, la extracción continuada de recursos puede alterar la integridad de ecosistema, aún cuando el sistema continúe produciendo la biomasa requerida. En extremos, la especie explotada puede llegar a ser amenazada, o comercialmente extinta. La explotación puede ser comercial y deportiva. Definimos los índices de la explotación depende de dos parámetros: biomasa y biodiversidad. La biodiversidad se mide directamente para muchas pesquerías comerciales, tanto para la especie objetivo como la fauna

acompañante. Para pesquerías deportiva, las licencias de pesca se pueden utilizar como un proxy de la biodiversidad.

En el caso del bienestar humano, el funcionamiento económico local se mide por indicadores que utilizan las ganancias totales y empleo total. El funcionamiento económico de un sistema-dependiente se mide por indicadores que utilizan las ganancias de los recursos naturales (por ejemplo, cosecha del cultivo, la pesca comercial, manejo de los recursos naturales) y el empleo dentro de esos sectores, relativo a ganancias y empleo local general. Proxies sencillos pueden ser el valor total de recursos extraídos –comercial y deportivos – relativo al total de las ganancias regionales. El bien social, o la calidad de vida, es una mezcla del bien económico (proxies como la media del ingreso local relativo al del estado) y las medidas de la estabilidad social inclusive el nivel medio de la educación.

Un desarrollo prometedor para la administración de pesquerías son los indicadores directos o indirectos (proxies). Tales indicadores actuarían como puntos de referencia utilizados en la administración de pesquerías. El desafío será identificar indicadores que sean medibles por usuarios, válidos y aceptables a escalas más grandes (Degnbol, 2003). Será la variación de estos lo que nos ayude a comprender conceptualmente el sistema que se estudie, y si el aumento o disminución de un parámetro es bueno o malo para el sistema (Parrish *et al*, 2000).

#### 4. Referencias

- Alvarez, A. 2001. Different proxies for unmeasured fish stock in fishing production functions. Department of Economics, University of Oviedo, Spain. www.ualg.pt/feua/uk/Papers/P15.pdf
- Arcos, D., L. Cubillos y S. Núñez. 2001. The jack mackerel fishery and El Niño 1997-98 effects off Chile. Progress in Oceanography 49, 597-617.

- Bailey, K.M. y S.A. Mcklin. 1994. Analysis of patterns in larval walleye pollock *Theragra chalcogramma* survival and wind mixing events in shelikof strait. Gulf of Alaska. Mar. Ecol. Prog. Ser. 113.
- Barbieri M.A., A. González y E. Yáñez. 1995. Time-space variability of sea surface temperature and pelagic resources in northern Chile (1987-92). *In:* Quantitative Remote Sensing for Science and Applications. T. Stein (Ed.), IGARSS, Vol. I, 300-302.
- Cubillos, L., S. Núñez y D. Arcos. 2003. Relating Chilean jack mackerel recruitment to sea surface temperature (SST): looking for spatial pattern and SST indexes. *In*: M. Barange (Ed.) Report of the 2nd Meeting of the SPACC/IOC Study Group on "Use of environmental indices in the management of pelagic fish populations (December 2002, Paris, France). GLOBEC Special Contribution N° 6, 156 pp.
- Cubillos, L. y D. Arcos. 2002. Recruitment of common sardine (*Strangomera bentincki*) and anchovy (*Engraulis ringens*) in the 1990s, and impact of the 1997-98 El Niño. Aquatic Living Resources 15, 87-94.
- **Cubillos, L., D. Arcos, D. Bucarey y M. Canales. 2001.** Seasonal growth of small pelagic fish off Talcahuano (37°S-73°W), Chile: a consequence of their reproductive strategy to seasonal upwelling?. Aquatic Living Resources 14(2), 115-124.
- Cury, P. y V. Christensen. 2001. Quantitative Ecosystem Indicators for Fisheries Management. SCOR/IOC Working Group 119. www.ecosystemindicators.org.
- Degnbol, P. 2003. Knowledge in co-management. Institute for fisheries management and coastal community development. http://www.ifm.dk/publications.html.
- FAO. 1995. Code of conduct for responsible fisheries. FAO, Rome, 15 pp.
- FAO. 1999. Indicators for sustainable development of marine capture fisheries.FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries N°8, 68 pp.

- García, S.M., D.J. Staples y J. Chesson. 2000. The FAO guidelines for the development and use of indicators for sustainable development of marine capture fisheries and an Australian example of their application. Ocean Coast. Manag. 43: 537-556.
- Gislason, H., M. Sinclair, K. Sainsbury y R. O'Boyle. 2000. Symposium overview: incorporating ecosystem objetctives within fisheries management. ICES Journal of Marine Science 57, 468-475.
- GLOBEC. 1999. Climate variability and spawning habitat: A progress report from SPACC Working Group 8. NOAA, Southwest Fisheries Science Center, La Jolla, USA. Globec International Newsletter October 1999. 8-11.
- GLOBEC Special Contribution No. 5. Report of the 1st meeting of the SPACC/IOC study group on "Use of environmental indices in the management of pelagic fish populations". 3-5 September 2001, Cape Town, South Africa.
- GLOBEC Special Contribution No. 6: Report of the 2nd meeting of the SPACC/IOC study group on "Use of environmental indices in the management of pelagic fish populations". 9-11 November 2002, Paris, France.
- ICES 2000. Ecosystem effects of fishing. Proceedings of an ICES/SCOR Symposium held in Montpellier, France, 16-19 March 1999. ICES Journal of Marine Science Vol. 57 (3), 791pp.
- James D. 1997. Application of Environmental Data in Fisheries Science: Examples from Fisheries. *In* G.W. Boehlert and J. D. Schumacher (eds.), Changing oceans and changing fisheries: environmental data for fisheries research and management.126
- Jamieson, G., R. O'Boyle, J. Arbour, D. Cobb, S. Courtnay, R. Gregory, C. Levings, J. Munro, I. Perry y H. Vandermeulen. 2001. Proceedings of the national workshop on objectives and indicators for ecosystem based

management. Sidney, British Columbia. Canadian Science Advisory Secretariat Proceeding 2001/009.

http://www.dfompo.gc.ca/csas/csas/English/Proceedings%20\_Years/2001e.htm

- Jordan, 2001. Indicators of ecosystem health. Chesapeake Bay Fisheries Ecosystem Plan Workshop, 6 pp.
- Jordan, S. y P.A. Vaas. 2000. An index of ecosystem integrity for Northern Chesapeake Bay. Environmental Science and Policy 3, 59-88.
- Kenneth, T. 1997. Use of environmental data in biological and assessment surveys. *In* G.W. Boehlert and J. D. Schumacher (eds.), Changing oceans and changing fisheries: environmental data for fisheries research and management. 17-23.
- Nieto K., E. Yáñez, C. Silva y M.A. Barbieri. 2001. Probable fishing grounds for anchovy in the northern Chile using an expert system. Geoscience and Remote Sensing Symposium: Scanning the Present and Resolving the Future. Australia, 9-13 July 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International, Volume 7, 2985-2987.
- NMFS. 1999. Ecosystem based fisheries management. A report to congress. http://www.nmfs.noaa.gov/sfa/EPAPrpt.pdf
- Parrish, R. 1997. Time, space and fish scales: applications of retrospective environmental data to fisheries research. *In* G.W. Boehlert and J. D. Schumacher (eds.), Changing oceans and changing fisheries: environmental data for fisheries research and management 24-29.
- Parrish, J.K., K. Bell, E. Logerwell y C. Roegner. 2000. Indicators of West Coast Estuary Health.

http://pdata.fish.washington.edu/pdfs/2000archapter1.pdf

- **Pitcher, T.J., P.J. Hart y D. Pauly. 1998.** Reinventing fisheries management. Kluwer Academic publisher, Fish and Fisheries Series 23, 435 pp.
- Rochet, M. y V.M. Trenkel. 2003. Which community indicators can measure the impact of fishing? A reviesçw and proposals. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 60(1), 86-99.

- Sainsury y Sumaila, 2002. Incorporating ecosystem objetives into management of sustainable marine fisheries, incluiding "best practice" reference points and use of marine protected areas. *In*: Responsible fisheries in the marine ecosystem. M. Sinclair y G. Valdimarsson (Eds.). Joint Publication: FAO and CABI Publishing, 343-361
- Serra, R. 1991. Long-tern variability of the chilean sardine. *In*: Long-term variability of pelagic fish populations and their environment. T. Kawasaki, S. Tanaka, Y. Toba y A. Taniguchi (Eds.). Pergamon Pres, 165-172
- Serra, R. 1991. Important life history aspects of the Chilean jack mackerel, *Trachurus symmetricus murphyi*. Invest. Pesq. (Chile), 36, 67-83.
- Silva, C., K. Nieto, M.A. Barbieri y E. Yáñez. 2002. "Expert systems for fishing ground prediction models: a management tool in the Humboldt ecosystem affected by ENSO". Invest. Mar., Valparaíso, Vol. 30(1): 201-204.
- Rochet, M. y V.M. Trenkel. 2003. Which community indicators can measure the impact of fishing? A reviews and proposals. Can. J. Fish. Aquat. Sci./J. Can. Sci. Halieut. Aquat. 60(1): 86-99.
- Trenkel V.M. y Rochet M. 2003. Performance of indicators derived from abundance estimates for detecting impact of fishing on a fish community. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 60, 67-85.
- Yáñez E. y M.A. Barbieri. 1988. Principal pelagic resources exploited in northern Chile and their relationship to environmental variations. *In*: Long Term Changes in Marine Fish Populations. T. Wyatt y M.G. Larreñeta (Eds.), Inst. Invest. Mar., Vigo, España, 197-219.
- Yáñez E., M.A. Barbieri y L. Santillán. 1992. Long-term environmental variability and pelagic fisheries in Talcahuano, Chile. *In*: Benguela Trophic Functioning. Payne, A.I.L., Brink, K.H., Mann, K.H. and R. Hilborn (Eds). S. Afr. J. mar. Sci. 12: 175-188.

- Yáñez E., M.A. Barbieri, A. González, O. Pizarro, M. Bravo, C. Canales y S. Salinas. 1994. Sea surface thermal structure associated to the pelagic fish resources distribution in northern Chile. *In*: Remote Sensing for Marine and Coastal Environments: Needs, Solutions and Applications. ERIM, Michigan-USA, Vol. II, 149-162.
- Yáñez E., M.A. Barbieri y V. Catasti. 1997. Sea surface thermal structure associated to the small pelagic fish resources distribution in central Chile. *In*: Remote Sensing for Marine and Coastal Environments: Technology and Applications. ERIM, Michigan, USA, Vol. I, 583-592.
- Yáñez E., M. García y M.A. Barbieri. 1998. Pelagic fish stocks and environmental changes in the south-east Pacific. *In*: Global versus Local Changes in Upwelling Systems. M. Durand, P. Cury, R. Mendelssohn, C. Roy, A. Bakun y D. Pauly (Eds.), ORSTOM Editions, Paris, 275-291.
- Yáñez E., M.A. Barbieri, C. Silva, K. Nieto & F. Espíndola. 2001. Climate variability and pelagic fisheries in northern Chile. Progress in Oceanography 49, 581-596.
- Yáñez E., M.A. Barbieri, C. Silva, J. Castillo, K. Nieto, G. Böhm, F. Gómez & J. Cordova. 2002a. Climate variability and pelagic fisheries in the South-Eastern Pacific. Globec International Newsletter, Vol. 8, Nº 2, 18-19.
- Yáñez E., C. Silva, K. Nieto, M.A. Barbieri, G. Martinez y B. Ramírez. 2002b. Prediction of probable fishing grounds in northern Chile from pelagic fisheries distributions and environmental conditions. GLOBEC Report 16 (1-97), 24-26.
- Yáñez E. R., M.A. Barbieri B. y C. Silva G. 2003. Fluctuaciones ambientales de baja frecuencia y principales pesquerías pelágicas chilenas. *In*: Actividad Pesquera y de Acuicultura en Chile. E. Yáñez (Ed.), Escuela de Ciencias del Mar, PUCV, 109-122.

# ANEXO 3. Estandarización de las tasas de captura de las pesquerías pelágicas de la zona norte de Chile<sup>\*</sup>

E. Yáñez R.<sup>1</sup> F. Espíndola R.<sup>1,2</sup>, y F. Goméz.<sup>1</sup> <sup>1</sup>Escuela de Ciencias del Mar, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso Casilla 1020, Valparaíso, Chile. E-mail: eyanez@ucv.cl <sup>2</sup>Departamento de Física de la Atmósfera y Océano, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile. E-mail: fespindola@udec.cl

**RESUMEN.** Se usó el modelo lineal generalizado (MLG) para estandarizar el índice de abundancia relativa captura por unidad de esfuerzo (CPUE) de anchoveta (*Engraulis ringens*), sardina (*Sardinops sagax*) y jurel (*Trachurus murphyi*), en la zona norte de Chile (18°21'-24°S), entre 1987 y 2002. Para la anchoveta, sardina y jurel se tomaron en cuenta las variables categoría de embarcación, la zona de pesca, la estación del año y el año. Estas variables muestran en general efectos bastante significativos en el logaritmo de la CPUE. Además, interacciones significativas son identificadas para anchoveta, sardina y jurel entre trimestre\*año, trimestre\*zona, año\*zona y trimestre\*año\*zona. Así, los modelos ajustados toman en cuenta un 20%, 27% y 34% de la variación total observada de la CPUE fueron explicadas por los MLG planteados para dichos recursos, resultado esperado debido esencialmente al carácter aleatorio de la pesca cuando se trabaja con información diaria y probablemente la no inclusión de otras variables significativas.

Palabras claves: estandarización, CPUE, pelágicos, MLG, interacciones, zona norte de Chile.

Proyecto FIP 2003-33.

#### **INTRODUCCIÓN**

Los datos de captura por unidad de esfuerzo (CPUE) de la flota pesquera industrial de la zona norte de Chile son empleados frecuentemente para calcular índices de abundancia relativa de las pesquerías pelágicas (Böhm *et al.*, 1996, 1998). La CPUE ha sido utilizada como indicador indirecto de la abundancia de recursos pesqueros y en la calibración de modelos de evaluación de stocks (Hilborn y Walters, 1992; Gascuel y Thiam, 1993; Quinn y Deriso, 1999).

El uso de la CPUE como índice de abundancia ha sido muy criticado, dado el sesgo producido por los cambios del poder de pesca y de la composición de las embarcaciones en el tiempo, además de las variaciones espacio-temporales del patrón de explotación. Para minimizar este sesgo, normalmente se estiman factores potenciales de las diferentes clases de embarcaciones, los que luego se emplean para estimar la CPUE estandarizada. Uno de los métodos más utilizados en dicho análisis es el modelo lineal (Gulland, 1956; Robson, 1966; Laurec y Fonteneau, 1979). Posteriormente se considera el uso de modelos lineales generalizados (MLG), los más usado para estandarizar la CPUE bajo una distribución lognormal, con el objeto de tomar en cuenta las interacciones siempre presentes entre las variables explicativas (Gavaris, 1980; Kimura, 1981, 1988; Allen y Punsly, 1984; Punsley, 1987; Large, 1992; Yáñez *et al.*, 1999; Punt *et al.*, 2000; Yokawa *et al.*, 2001; Wu y Yeh, 2002). Los MLG proveen un camino para estimar una función que relaciona la respuesta media de una combinación lineal de un conjunto de variables predictivas y la capacidad de tomar en cuenta una variedad de familias de distribuciones (McCullagh y Nelder, 1989).

En este trabajo se hace uso de MLG para estimar CPUE estandarizadas de anchoveta (*Engraulis ringens*), sardina (*Sardinops sagax*) y jurel (*Trachurus murphyi*) del norte de Chile, entre 1987 y 2002. De esta forma se estiman, para las pesquerías en cuestión, los poderes de pesca por categorías de embarcación, índices anuales de abundancia e interacciones significativas.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El área de estudio esta comprendida entre los 18°21' y 24° S, desde la costa hasta los 73° W, y el trabajo cubre el período 1987-2002. La información que se analiza proviene de los registros técnicos operacionales de las embarcaciones cerqueras industriales que operaron en la zona norte en el período de estudio. Esta flota se define como aquella integrada por embarcaciones mayores o iguales a 80 m<sup>3</sup> de capacidad de bodega (CB), que emplean equipos y redes de cerco (Martínez *et al.*, 1992). Los registros provienen de las bitácoras diarias de pesca disponibles de 110 embarcaciones cerqueras industriales (Tabla 1).

$CB(m^3)$	Embarcaciones
100	1
140	13
180	1
200	8
240	4
270	9
275	4
280	2
290	9
300	6
330	11
350	16
375	1
390	1
400	5
420	2
450	4
490	4
530	1
535	6
550	2

Tabla 1. Embarcaciones por CB.

Dichas embarcaciones operaron normalmente en la zona y período de estudio. Sin embargo, dado que la distribución espacial del esfuerzo de pesca no es homogénea para permitir el ajuste del modelo usando las 110 embarcaciones, además del efecto no lineal de la variable continua CB, se considera la agrupación de barcos en categorías de acuerdo a su capacidad de bodega (Tabla 2). Por otra parte, dado que en ciertos meses las capturas son casi nulas debido a las vedas, se consideró que esta influencia externa se minimiza al agrupar trimestralmente la información. Se utilizaron las zonas de pesca definidas por Böhm *et al.* (1998) para la pesquería de anchoveta y sardina (Fig. 1a y 1b), mientras que para la pesquería de jurel se emplearon las zonas definidas por Böhm *et al.* (1996) (Fig. 1c). Dichas zonas se establecieron estadísticamente a través de un análisis de la CPUE promedio mensual, empleándose los tests no paramétricos de Kruskal- Wallis (K-W), Student Neuman Keuls (SNK) y Sokal.

Categoría	Anchoveta <sup>1</sup>	Sardina <sup>1</sup>	Jurel <sup>2</sup>
1	80 a 115	80 a 115	< 179
2	120 a 180	120 a 180	180 a 239
3	200 a 270	200 a 280	240 a 399
4	275 a 370	290 a 390	400 a 489
5	390 a 535	400 a 535	490 a 599
6	> 550	550 a 650	600 a 639
7		> 700	> 640

Tabla 2. Categorías de embarcación según la CB (m<sup>3</sup>).

<sup>1</sup>Böhm et al. (1996a) y <sup>2</sup>Böhm et al. (1996b).



Figura 1. Zonas de pesca definidas para las pesquerías pelágicas de la zona norte de Chile; a) sardina (Böhm *et al.*, 1998), b) anchoveta (Böhm *et al.*, 1998) y c) jurel (Böhm *et al.*, 1996).

La CPUE ha sido ampliamente utilizada como un índice de abundancia relativa, basado en el supuesto de que existe una proporcionalidad dada por:

$$C_{ij} = q_{ij} f_{ij} N_i \tag{1}$$

donde  $C_{ij}$ ,  $f_{ij}$  y  $q_{ij}$  representan la captura, el esfuerzo de pesca y la capturabilidad respectivamente, en el año *i* y la embarcación *j*, y  $\overline{N}_i$  la abundancia promedio en el año *i*. Kimura (1981) señala que todas las variables que influyen en la eficiencia de pesca pueden ser incorporadas en  $q_{ij}$ . Dichas variables incluyen las características físicas de la embarcación (registro grueso, caballos de fuerza, entre otros), artes de pesca (diseño de la red, equipo de virado, equipo acústico, entre otros) y factores ambientales (Allen y Punsly, 1984; Hinton y Nakano, 1996; Sainsbury *et al.*, 1997; Yáñez *et al.*, 1999). Si la CPUE se distribuye lognormal, entonces la variable debe resultar de un conjunto de procesos que actúan multiplicativamente (Aitchinson y Brown, 1957). Uno de estos procesos corresponde a los cambios periódicos en la abundancia del stock, dado por:

$$E[CPUE_{t,\{j\}}] = \alpha \eta_t \{Q_j\}, \quad t=1,...,T; \quad \{j\} = \{\}, \quad (2)$$

donde  $\alpha$  es una constante,  $\eta_t$  el efecto de la variación periódica (por ejemplo anual) de la abundancia y  $\{Q_j\}$  un conjunto de efectos derivados de características y decisiones de pesca de cada barco. El objetivo es despejar el efecto del término  $\eta$  a través de los años, separandolo de los factores que afectan la eficiencia de pesca y que surgen de las propiedades de los barcos, representadas en  $\{Q\}$ . Suponiendo que  $\{Q\}$  está integrado por las variables discretas barco ( $\alpha$ ) y zonas de pesca (b), y una variable continua o discreta (x) que representa al poder de pesca:

$$CPUE_{t,i,j}(x) = \alpha \eta_t a_i b_j x^{y} \varepsilon_{t,i,j}, \qquad (3)$$

donde  $\gamma$  es un parámetro y  $\varepsilon$  el error aleatorio que se distribuye idéntica e independientemente lognormal, con media k=1 y varianza  $\sigma^2$  desconocida, para todo *t,i,j*. La ecuación anterior pertenece a los MLG (McCullagh y Nelder, 1989), e indica que la CPUE agregada para cada cruce de la categoría período (*t*), barco (*i*) y zona (*j*), esta determinada por un valor global constante ( $\alpha$ ), el efecto de las tres categorías ( $\eta$ , a y b), el efecto del poder de pesca (x) y un error lognormal propio de los procesos multiplicativos. El MLG de la ecuación anterior corresponde a:

$$\ln[CPUE_{t,i,j}(x)] = \ln(\alpha) + \ln(\eta_t) + \ln(a_i) + \ln(b_j) + y\ln(x) + \ln(\varepsilon_{t,i,j})$$
(4)

donde los errores aleatorios  $\ln(\varepsilon_{t,i,j})$  se distribuyen idéntica e independientemente normal. El ajuste por mínimos cuadrados es entonces un ajuste de máxima verosimilitud. Bajo este modelo la aplicación de una partición de varianza en sus componentes (Searle *et al.*, 1992), permite identificar los estimadores de  $\ln(\eta_t)$  de cada año. Para llegar finalmente a la serie de los  $\eta_t$ , se aplica la transformada inversa de una función exponencial con corrección por sesgo:

$$\hat{\eta'_{t}} = e^{\hat{v_{t}}} e^{\frac{-\beta_{t}^{2}}{2}}$$
(5)

donde vt=ln( $\eta$ t) y los " $\wedge$ " indican estimaciones del ajuste del MLG. Los cálculos mediante la ecuación anterior para cada t, con una ANOVA y la partición de sus componentes, implica la hipótesis nula a contrastar de que no hay diferencias entre las medias de cada factor. Estos índices de abundancia relativa se pueden usar en la calibración de modelos de evaluación de stock estructurados a la edad.

El ajuste es realizado añadiendo al modelo MLG variables significativas en el orden de su probabilidad nominal (P<0,001), asociadas a su estadístico F de ingreso al modelo. Normalmente las variables no significativas deben ser eliminadas para evitar una parametrización excesiva, lo que podría diluir los efectos de los años usados para describir cambios en las tasas de captura que no pueden ser atribuidos a los otros factores del modelo. Es decir, cambios en la abundancia de selección descritos por Allen y Punsly (1984).

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Del análisis de regresión se determinó que algunas variables e interacciones ejercen efectos significativos sobre la CPUE de anchoveta (Tabla 3). Para la sardina (Tabla 4) y el jurel (Tabla 5) se encontraron resultados similares. De esta forma, los modelos ajustados para la anchoveta, la sardina y el jurel es:

$$Y_{ijklm} = \alpha + E_i + A_j + C_k + D_m + EA_{ij} + EC_{ik} + AC_{jk} + EAC_{ijk} + \varepsilon_{ijkm}$$
(6)

- $Y_{ijklm}$  = logaritmo de la CPUE
- $\alpha$  = promedio general
- $E_i$  = efecto del trimestre i
- $A_j$  = efecto del año j
- $C_k$  = efecto de la zona de pesca k
- $D_m$  = efecto de la categoría de embarcación m
- $EA_{ij}$  = efecto de la interacción Ei y Aj
- $EC_{ik}$  = efecto de la interacción Ei y Ck
- $AC_{jk}$  = efecto de la interacción Aj y Ck
- $C_k \gamma T$  = efecto de la interacción Ck y T
- $\varepsilon_{ijklm}$  = error residual.

Cabe señalar que los modelos ajustados explican menos de la mitad de la variación del logaritmo de la CPUE de anchoveta ( $R^2=0,20$ ), sardina ( $R^2=0,27$ ) y jurel ( $R^2=0,34$ ).

Tabla 3. Análisis de	e var	ianz	za de	l logar	itmo de	la Cl	PUI	E de	anc	hove	eta,	segi	ín	el r	noc	lelo
ajustado para el período 1987-2002.																
									1							
	0	1	1	a	1	0	1	1	* *	1	1	D	1	1 **	1 . 1	1

	Grados de	Suma de	Cuadrado	Valor de	Probabilidad
	Libertad	Cuadrados	Medio	F	
Trimestre (E)	3	969	323	335	0,000
Año(A)	15	7.136	476	493	0,000
Zona(C)	5	151	30	31	0,000
Categoría (D)	5	3.370	674	699	0,000
ΕxΑ	43	4.197	98	101	0,000
E x C	15	331	22	23	0,000
A x C	66	587	9	9	0,000
ExAxC	152	1.441	9	10	0,000
Residual	77.522	74.781	1		

Tabla 4. Análisis de varianza del logaritmo de la CPUE de sardina, según el modelo ajustado para el período 1987-2002.

	Grados de	Suma de	Cuadrado	Valor	Probabilidad
	Libertad	Cuadrados	Medio	de F	
Trimestre (E)	3	232	77	94	0,000
Año(A)	15	2.356	157	191	0,000
Zona(C)	6	1.014	169	206	0,000
Categoría (D)	5	2.227	446	542	0,000
ExA	43	1.118	26	32	0,000
ExC	18	92	5	6	0,000
A x C	80	548	7	8	0,000
ExAxC	151	608	4	5	0,000
Residual	26.752	21.986	0,8		

Tabla 5. Análisis de varianza del logaritmo de la CPUE de jurel, según el modelo ajustado para el período 1987-2002.

	Grados de	Suma de	Cuadrado	Valor	Probabilidad
	Libertad	Cuadrados	Medio	de F	
Trimestre (E)	3	639	213	181	0,000
Año(A)	15	5.198	347	294	0,000
Zona(C)	5	495	99	84	0,000
Categoría (D)	5	1.095	219	186	0,000
ΕxΑ	45	3.382	75	64	0,000
E x C	12	182	15	13	0,000
A x C	45	883	20	17	0,000
ExAxC	118	1.296	11	9	0,000
Residual	22.213	26.198	1,2		

En las tablas 3, 4 y 5 se muestran los efectos generalmente más significativos de las variables, comparados con los efectos de las interacciones de primer y segundo orden. No obstante, las interacciones en su totalidad toman en cuenta el 36%, 29% y 44% de la variación total explicada por los modelos seleccionados para anchoveta, sardina y jurel, respectivamente. Cabe indicar que la incorporación de los efectos del año en las interacciones de los modelos seleccionados impide el logro de estimaciones insesgadas de las variaciones anuales de la CPUE. En este caso se deben descartar estas interacciones de los modelos, considerando sus efectos como un residuo en un modelo sub-óptimo.

Durante el período de estudio se observa para anchoveta el bajo nivel del índice de abundancia en 1987 (Fig. 2), lo cual se asocia al moderado evento "El Niño" acontecido durante este año (Yáñez et al., 1995). El índice de abundancia estandarizado para anchoveta aumenta notablemente en 1988-89, asociado a años más normales desde el punto de vista de la estructura térmica superficial. Luego este índice vuelve a disminuir, al mismo tiempo que se produce un notable enfriamiento en 1990 y el fenómeno "El Niño" de regular intensidad en 1991-92, cuyas anomalías de TSM perduran por lo menos hasta 1994 (Barría et al., 1998). Según Castillo et al. (1997), los mayores niveles de reclutamiento de la época se registraron en 1991-92, a tamaños intermedio del stock desovante. No obstante, los reclutamientos de 1993-94 tienen magnitudes similares, a pesar de la gran discrepancia en los tamaños de los stocks desovantes. Lo que permitió que el índice de abundancia permaneciera casi constante durante el periodo 1992-94. Durante el periodo 1995-98 el índice de abundancia presenta una clara tendencia negativa hasta 1998, además del evento "El Niño" que se produce en 1997, alcanzando el nivel más bajo del índice de abundancia para el periodo analizado. Yáñez y Espíndola (1998) señalan que los niveles de reclutamiento de anchoveta muestran los valores más bajos en este periodo. Por otra parte, Böhm et al. (1998) muestran que las capturas de anchoveta se reducen en un 24% y un 43% en 1994-95 y 1995-96 respectivamente; y en 1997 presenta los niveles promedios similares a 1992-94, pero bastante más bajos a los de 1988-89.



Figura 2. Variación anual del logaritmo de la CPUE de anchoveta.

Para sardina se observa que en los primeros años del período de estudio analizado, se registran los mayores valores del índice de abundancia, en tanto que después de 1989 hasta 1988 el índice de abundancia disminuye notablemente (Fig. 3). Esto concuerda con la evolución de los desembarques, los cuales pasan de un promedio de 1,6 millones de t en 1987-89, a 0,7 millones de t en 1990-92, mostrando posteriormente una fuerte tendencia descendente hasta obtener tan sólo 4 mil t en 1997 (SERNAPESCA, 1987-97). Yáñez y Espíndola (1998) señalan que los altos niveles de CPUE alcanzados hasta 1989 estarían asociados a los altos niveles de reclutamientos de sardina alcanzados durante 1987-88, que posteriormente disminuyen drásticamente al igual que el índice de abundancia relativa hasta 1998.



Figura 3. Variación anual del logaritmo de la CPUE de sardina.

Entre 1998-99 la CPUE de sardina presenta un notable incremento, presentando una recuperación a los niveles alcanzando en el 1994-95. Ya al final del periodo, la sardina presenta una tendencia negativa del índice de abundancia hasta alcanzar los valores más bajos del periodo analizado. Cabe señalar que durante el período analizado el índice de abundancia relativa disminuye más de un 90% entre 1987 y 2002.

La CPUE estandarizada del jurel muestra que en los siete primeros años del período de estudio analizado una tendencia constante, salvo 1989 y 1993 (Fig. 4). Según Barria *et al.* (1998), en 1989 se presentan los valores de CPUE más altos. Sin embargo, en 1992-93 se presenta un notable aumento del índice de abundancia, inmediatamente después del evento "El Niño" de 1991-92. Posteriormente el índice de abundancia relativa de jurel presenta una tendencia negativa hasta 1999. Entre 2000-01, el índice de abundancia presenta una tendencia creciente hasta alcanzar los niveles registrados en 1990-91 y 1994-95. Sin

embargo, al final de periodo analizado el índice de abundancia de jurel alcanza el nivel más bajo del periodo analizado.



Figura 4. Variación anual del logaritmo de la CPUE de jurel.

Normalmente se espera que los poderes de pesca presenten una relación directa con la capacidad de bodega de las embarcaciones, debido a la eliminación progresiva del efecto de saturación (referido a la combinación arte-bodega). En este sentido, en la captura de anchoveta esta eliminación prácticamente no desaparece, aunque resultan bastante similares las categorías 5 y 6 (Fig. 5). Para la pesca de sardina esta eliminación prácticamente no aparece, debido a que las categorías mayores (4, 5 y 6) operaron normalmente durante el periodo de estudio, en tanto que las categorías menores (1 y 2) son poco representativas en el periodo analizado (Fig. 6). En cambio en la captura del jurel esta saturación se alcanza claramente después de la categoría 4 (Fig. 7). Esto puede ser entonces un problema

asociado a la relación arte-bodega y a la menor habilidad de los barcos de mayor tamaño, producto de sus dimensiones.



Figura. 5. Poderes de pesca por categoría de embarcación de anchoveta.


Figura. 6. Poderes de pesca por categoría de embarcación de sardina.



Figura. 7. Poderes de pesca por categoría de embarcación de jurel.

El efecto estacional del logaritmo de la CPUE varía de año en año (Fig. 8, 9 y 10). Estas variaciones son bastante fuertes para las tres especies e impiden ver claramente un patrón temporal. La anchoveta presenta al comienzo del período de estudio los mayores valores en el primer trimestre (ene-mar) y los menores en el cuarto (oct-dic); en tanto que al final del periodo de estudio los mayores valores se registran en el cuarto trimestre (oct-dic) y los menores valores en el primer (ene-mar) y segundo (abr-jun). Para la sardina, al comienzo del periodo de estudio se presenta valores similares en todos los trimestres. Al final del periodo, el índice de abundancia muestra una clara tendencia negativa y los mayores valores se alcanzan en el primer trimestre. Para jurel, al comienzo del periodo analizado los mayores valores se alcanzan en el tercer trimestre y los menores en el primer trimestre; al final del periodo los mayores valores se alcanzan en el tercer trimestre y los menores en el primer trimestre; al final del periodo los mayores valores se alcanzan en el tercer trimestre y los menores en el primer trimestre; al final del periodo los mayores valores se alcanzan en el tercer trimestre y los menores en el primer trimestre; al final del periodo los mayores valores se alcanzan en el tercer trimestre y los menores en el primer trimestre; al final del periodo los mayores valores se alcanzan en el tercer trimestre y los menores en el primer trimestre; al final del periodo los mayores valores se alcanzan en el primer trimestre y los menores en el primer trimestre; al final del periodo los mayores valores se alcanzan en el tercer trimestre y los menores en el primer trimestre; al final del periodo los mayores valores se alcanzan en el primer trimestre y los menores en el segundo y tercer trimestre.



Figura 9. Variación trimestral del logaritmo de la CPUE de anchoveta en el período 1987-2002.



Figura 10. Variación trimestral del logaritmo de la CPUE de sardina en el período 1987-2002.



Figura 11. Variación trimestral del logaritmo de la CPUE de jurel en el período 1987-2002.

De este modo, la interacción entre los efectos año y trimestre implica que el patrón estacional de densidad de anchoveta, sardina y jurel no es constante en el período 1987-2002. Este comportamiento estacional sería causado por la fuerte agregación con fines reproductivos que presentan estos recursos y por los cambios del ambiente asociados a la ocurrencia de eventos fríos y cálidos. Los recursos pelágicos analizados presentan variaciones espaciales intra e interanuales, las cuales se relacionan con procesos biológicos y fluctuaciones del medio ambiente (Yáñez *et al.*, 2001). En efecto, los eventos de surgencia, la variabilidad de la estructura térmica y el evento "El Niño", son factores que condicionan la distribución y abundancia de estos peces pelágicos.

Los modelos desarrollados en el presente documento parecen adecuados para la estimación anual del índice de abundancia CPUE, sin desmerecer estimaciones independientes de la abundancia hechas durante campañas científicas (por ejemplo hidroacústicas). Los resultados presentados en este documento son coincidentes con otros análisis de datos de CPUE usando modelos lineales generalizados, donde la variación en la CPUE no explicada es también bastante considerable: 90% para el atún aleta amarilla (Allen y Punsly, 1984), 45% para el atún patudo, 67% para el atún de aleta amarilla (Punsly y Nakano, 1992) y 60% para el lenguado (Large, 1992). Lo mismo ocurre con el atún aleta azul (Sainsbury *et al.*, 1997) y los stock de bacalado y pescadilla (Millischer y Gascuel, 1997).

La contribución relativamente grande del error, comparada con la de las variables bajo estudio, podría explicarse por la gran variabilidad en la probabilidad de encuentro entre una unidad de pesca y el cardumen, dada la distribución gregaria del recurso, la gran variabilidad en el tamaño de los cardúmenes y por ocupar información diaria de pesca, no así cuando se emplea resúmenes de pesca mensuales, donde la variabilidad explicada por los modelos es mucho mayor (Gatica y Cubillos, 2002). Otros motivos serian los factores del poder de pesca no tomados en cuenta, como por ejemplo las diferencias entre equipos de detección hidroacustico, tamaño de red y experiencia del capitán, o bien por factores temporales a escala fina (hora de pesca) y factores ambientales (velocidad del viento, color del mar, temperatura del agua) que influyen sobre la capturabilidad. Pero explicar 20% de

la variabilidad de 77.827 observaciones para anchoveta, 27% de 27.074 observaciones para sardina y 34% de 22.462 observaciones para jurel, resulta bastantes apreciables.

Se debe señalar que durante eventos "El Niño" se producen notables disminuciones de la abundancia y/o disponibilidad en la zona de estudio, particularmente de anchoveta, así como cambios en el patrón espacio-temporal de la CPUE, la interacción entre los efectos año y zonas de pesca presentes en los modelos planteados indican que la distribución espacial del índice de abundancia de anchoveta, sardina y jurel no permanece constante de año en año (Fig. 12, 13 y 14), observandose fuertes cambios espaciales, lo cual coincide con lo mostrado por Yáñez *et al.* (1993, 1995, 1999). Además, cuando los datos usados son de pesca comercial, es probable que los pescadores traten de distribuir el esfuerzo para obtener el máximo beneficio, lo que significa que el esfuerzo depende de la densidad. El uso de MLG compensa parcialmente esos efectos en las pesquerías analizadas, por ejemplo, se necesita recolectar la información sobre los esfuerzos sin pesca, aunque es dificil identificar la intencionalidad de la pesca y la zona de búsqueda, particularmente con información histórica de pesca.

Con la unidad de esfuerzo empleada (día de pesca) se mide la fracción de los días de operación en los cuales se registran las capturas. Sin embargo, estos no consideran los tiempos de búsqueda y los tiempos de operación del lance, lo cual no permite tener una unidad de esfuerzo que mida la presión real a la cual es sometido el stock. Sainsbury *et al.* (1997) y Gauthiez (1995) señalan que existen problemas ligados al carácter inadecuado de los datos de pesca, como la extensión espacial del stock y la intención de las pesquerías comerciales de mantener altas tasas de captura que no reflejan la real abundancia de la unidad de stock. Al respecto cabe señalar, que la utilización de MLG tiene el problema que no esta basado en el análisis de procesos explicativos. Es difícil en este tipo de













gestión incorporar un modelo de conocimiento, o las hipótesis particulares sobre el comportamiento del recurso y los procesos de captura.

Richards y Schnute (1986) presentan un modelo experimental y general para comprobar si la CPUE puede considerarse un índice de abundancia relativa. Estos comparan estimaciones de densidad con datos de CPUE, encontrando que no hay una relación estrictamente proporcional. Por otra parte, si las salidas de esta proporcionalidad fueron a bajas o altas densidades, o ambas. El valor del índice de abundancia depende de la forma de la relación entre la CPUE y la abundancia, con su nivel de confianza asociado.

Mucho se ha argumentado sobre el uso de datos de CPUE en pesquerías y la importancia de entender la distribución espacial de los recursos y la ubicación del esfuerzo pesquero para interpretar dichos datos. La forma más común de no proporcionalidad es cuando la CPUE permanece alta mientras la abundancia declina. Esto es conocido como "hiperestabilidad" y puede llevar a una sobreestimación de la biomasa y una subestimación de la mortalidad por pesca (Hilborn y Walters, 1992).

Harley *et al.* (2001) encontraron una fuerte presencia de "hiperestabilidad" en la relación CPUE-abundancia; es decir, cuando la CPUE permanece alta y la abundancia esta declinando, lo cual ha llevado a la sobreexplotación de los recursos. Entonces se debe incorporar esta información sobre la relación entre CPUE y abundancia en los modelos estructurados de evaluación de stock, para disminuir la incertidumbre sobre los procesos y obtener estimaciones más realistas y que conlleven un mejor manejo de los recursos pesqueros.

## REFERENCIAS

Aitchinson, J. y J.A.C. Brown. 1957. The lognormal distribution. Cambridge University. 176 pp.

Allen, R.L. y R.G. Punsly. 1984. Catch rates as indices of abundance of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, in the eastern Pacific Ocean. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. Bull. 18(4): 301-379.

Barria, P., A. Zuleta, G. Böhm, V. Catasti, M.A. Barbieri, E. Yáñez, A. Gonzalez, K. Nieto, C. Silva y F. Espíndola. 1998. Análisis de la dinámica del patron de explotación de la flota cerquera en la zona norte y su relación con el medio ambiente. Informe Final Proyecto FIP 96-03, IFOP-UCV, 110 pp.

**Böhm, G., M.A. Barbieri, E. Yáñez, A. González, C. Canales y V. Catasti. 1996a.** Análisis de la captura y del esfuerzo de pesca de las unidades de pesquería de sardina española y anchoveta de la zona norte. Informe Final Proyecto FIP 24/94, IFOP-UCV, 111 pp. y Anexos.

Böhm, G., M.A. Barbieri, E. Yáñez, A. González, C. Canales y V. Catasti. 1996b. Análisis de la captura y del esfuerzo de pesca de las unidades de pesquería del jurel de la zona centro-sur y norte. Informe Final Proyecto FIP 25/94, IFOP-UCV, 122 pp. y Anexos.

**Böhm, G., V. Catasti, P. Barria, R. Serra, L. Caballero, G. Rosson y C. Fonfach. 1998.** Análisis de la captura y del esfuerzo de pesca de las unidades de pesquerías pelágicas de sardina española y anchoveta de la I a IV regiones. Informe Final Proyecto FIP 96/05, IFOP, 60 pp. + Figuras, Tablas y Anexos.

**Castillo, J., M. Espejo, S. Lillo, J. Cordova, J.L. Blanco, J. Osses y P. Barria. 1997.** Estimación del reclutamiento de anchoveta en las regiones I y II. Informe Técnico FIP-IT/96-02, 216 pp.

Gavaris, S. 1980. Use of a multiplicative model to estimate catch rate and effort from comercial data. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37: 2272-2275.

**Gascuel, D. y M. Thiam. 1993.** Evolution de l'abondance des ressources démersales sénégalaises: estimation par modélisation linéaire des PUE. *In*: M. Barry-Gérard, T. Diouf et A. Fonteneau (Eds.). L'evaluation des ressources exploitables par la pêche artisanale sénégalaise. Symposium Dakar, 191-213.

**Gatica, C. y L. Cubillos. 2002.** Análisis de las tasas de captura de jurel (*Trachurus symmetricus*) en la zona centro-sur de Chile (1987-1999). Invest. Mar., Valparaíso, 30 (2): 45-56.

**Gulland, J. 1956.** On the fishing effort in English demersal fisheries. Fish. Invest., MAFF London, Series 2, 20(5): 1-41.

**Gauthiez, F. 1995.** Estimation des puissances de pêche. *In*: J. Ferraris, D. Pelletier, Marie-Joelle Rochat (Eds.). Méthodes d'etude des systémes halieutiques et aquacoles. Actes du Deuxiéme Forum Halieumétrique, Nantes, 71-77.

Harley, S.J., R.A. Myers y A. Dunn. 2001. Is catch-per-unit-effort proportional to abundance?. Can. J. Fish. Aquat. Sci, 58: 1760-1772.

Hilborn, R. y C. Walters. 1992. Quantitative fisheries stock assessment: Choice, dynamics and uncertainty. Chapman and Hall. New York, 570 pp.

**Hinton. M.G. y H. Nakano. 1996.** Standarizing catch and effort statistics using physiological, ecological, or behavioral constraints and environmental data, with an aplication to blue marlin (*Makaira nigricans*) catch and effort data from japanese longline fisheries in the pacific. Inter-Am. Trop.Tuna Comm. Bull. 21(4):171-197.

**Kimura, D.K. 1981.** Standardized measures of relative abundance based on modelling log (CPUE), and their application to Pacific ocean perch (*Sebastes alutus*). Journal du Conseil, Conseil International pour l'Exploration de la Mer 39: 211-218.

**Kimura, D.K. 1988.** Analyzing relative abundance indices with log-linear models. N. Amer. J. Fish. Manage. 8: 175-180.

**Large, P.A. 1992.** Use of a multiplicative model to estimate abundance from commercial CPUE data. ICES J. mar. Sci., 49: 253-261.

**Laurec, A. y A. Fonteneau. 1979.** Estimation de l'abondance d'une clase d'âge: utilisation des C.P.U.E. de plusieurs engins, en differentes zones et saisons. Collective Volume of Scientific Papers, International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, Vol. VIII, N°45, 117 pp.

Martínez, C., L. Caballero, G. Böhm, J. Oliva, R. Gili, V. Bocic, P. Barría y R. Serra. 1992. Diagnóstico de las principales pesquerías nacionales: pesquerías pelágicas de la zona norte. CORFO-IFOP, SIG 92/1, 51 p.

McCullagh, P. y J.A. Nelder. 1989. Generalized linear models. Monographs on Statistics and Applied Probabibilty. Chapman and Hall, London, 511 pp.

**Millischer, L. y D. Gascuel. 1997.** Estimation des puissances de pêche: Etude des flotilles industrielles de Bretagne Sud. *In*: La Surexploitation. Troisiéme Forum de L'Association Francaise d'Halieumétrie. Montpellier, 1-3 juillet 1997.

**Punsly, R. G. 1987.** Estimation of relative annual abundance of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, in the eastern Pacific Ocean during 1970-1985. Inter-Am. Trop.Tuna Comm. Bull. 19 (1): 265 - 306.

**Punsly, R. y H. Nakano. 1992.** Analysis of variance and standarization of longline hook rates of bigeye (*Thunnus obesus*) and yellowfin (*Thunnus albacares*) tunas in the eastern pacific ocean during 1975-1987. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. Bull. 20(4): 179-184.

Punt, A.E., T.I. Walker, B.L. Taylor y F. Pribac. 2000. Standardization of catch and effort data in a spatially-structured shark fishery. Fisheries Research 45: 129-145.

Quinn, T.J. y R.B. Deriso. 1999. Quantitaive fish dynamics. Oxford University Press, New York, 542 pp.

**Richards, L.J. y J.T. Schnute. 1986.** An experimental and statistical approach to the question: is CPUE an index of abundance?. Can.J. Fish. Aquat. Sci. 43: 1214-1227.

**Robson, D.S. 1966.** Estimation of the relative fishing power of individual ships. ICNAF, Res. Bull. 3: 5-14.

Sainsbury, K., T. Polacheck, N. Klaer, J. Gunn, R. Campbell, W. Hearn, T. Davis, A. Betlehem, A. Preece y A. Cowling. 1997. Recent developments and methods in the southern bluefin tuna fishery assessments. CSIRO, Division of Marine Research, Hobart, Australia.

Searle, S.R., G. Casella y C.E. McCulloch. 1992. Variance components. Willey Inter. Science, N.Y., 528 pp.

**SERNAPESCA. 1987-97.** Anuarios estadísticos de pesca. Servicio Nacional de Pesca, Ministerio de Economía, Chile.

**Wu, C.L. y S.Y. Yeh. 2002.** Standardized catch rates of south atlantic albacore, Thunnus alalunga, from the taiwanese longline fisheries during 1968-1999. Col. Sci. Pap. ICCAT, 54(5): 1515-1528.

**Yáñez, E., C. Canales, M.A. Barbieri, A. González y V. Cataste. 1993.** Estandarización del esfuerzo de pesca y distribución espacial e interanual de la CPUE de anchoveta y sardina en la zona norte de Chile 1987 y 1992. Invest. Mar., Valparaíso, 21: 111-132.

**Yáñez, E., A. González y M.A. Barbieri. 1995.** Estructura térmica superficial del mar asociada a la distribución espacio-temporal de sardina y anchoveta en la zona norte de Chile entre 1987 y 1992. Invest. Mar., Valparaíso, 23: 123 - 147.

**Yáñez, E. y F. Espíndola. 1998.** Análisis de las ventanas ambientales óptimas para los reclutamientos de sardina y anchoveta. Estudios y Documentos, Escuela de Ciencias del Mar, UCV, Valparaíso, 25/98, 17 pp.

**Yáñez, E., F. Espíndola, P. Fréon, M.A. Barbieri e I. Guerrero. 1999.** Estandarización de tasas de captura de pesquerías pelágicas de la zona norte de Chile durante 1987-92. Invest. Mar., Valparaíso, 27: 53-63.

Yáñez, E., M.A. Barbieri, C. Silva, K. Nieto y F. Espíndola. 2001 "Climate variability and pelagic fisheries in northern Chile". Progress in Oceanography 49, 581-596.

Yokawa, K., Y. Takeuchi, M. Okazaki y Y. Uozumi. 2001. Standardizations of CPUE of blue marlin and white marlin caught by Japanese longliners in the Atlantic Ocean. Col. Sci. Pap. ICCAT, 53: 345-355.

An	choveta											
1	1	Jun -	- And									Jui
9	4::	fr.	- A									Le la
8	•		d									q
7		**										
	Sugaras		L. gene									
1	Aris -		- Ani	874	Art	0 0 Ani	0 0 00	Jun .	o 33m	2 Contraction		- Mai
9								c				
8					8.8				° d8g			
8									• • •		• •	
	Lace		Lan					- Arte		L'Arts		- Long
1	An		Art	Arti		• 000004m		Ser.	- Million	Arii		
1 0		8		- ° 8	8			9			0 %	
8		- A									& 	8
9			80				°**		•		8 8	
-	°	Ĵ		<u>.</u>	• 💖		• 88		° 8/		0000 0000	• <u> </u>
			• <u>8</u>	·							Page Ja	
	Larte	Laran	Olygerte	Sin arts	Superior	Laran	Laren	Larts	Larte	Larte	of	o Larte
1	8	oregani	•	• · · · · · · · ·		arii	0 0 0. JAM	o Ari	· •	000000 00 <sup>40</sup>	8. 8888	·
9		8		· · ·		° °			· 600	o 8	0000000	° • • •
9		d		- 0000	00		· · · · ·		ė.		:	° ° °
0				00000	00000 00000	*****				88		• - 8 <u>°</u> 8
			o 8							<u> </u>	• •	
			- Artec	- Bare	o h-prec	andre o	Legen	- Corec	- Arte	Laren	Laren	Larte
								7				

## Anexo 4. Cartografía mensual de CPUE de anchoveta, sardina y jurel del periodo 1987-02 en la zona norte de Chile.

1 9 9			 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	• • • •	• · · · · · · ·		
1		 00 0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 0	 ° °		 	o to	Lyer.	
1 9 9 2						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
1 9 9 3		e					0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	
1 9 9 4			C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	l l l l l l l l l l l l l l l l l l l		C C C C C C C C C C C C C C C C C C C		

9 9 8	1	9 7	1 9		9 6	9	1		5	9	1 0
PR	Contraction of the second seco			<u>ی</u> موجود ا			Lante	fr.			
Pit Pit							8	fr.			
	Contraction of the second seco		o Best Anto	° 8000	· °a	• 000 a	Strantc				
( Pk			Aria Bi		··:;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;		8 Ante				
			S-enta	00000 0 0000 0 0 0 0 0 0 0 0	88800	a:• a	0 000000000000				
				· · · · ·	· 8 1	0 <sup>108</sup> 00	0 0 00000000 Arts 0				*
Pit	or oor Strentc oor Ars		- Aris		0.000	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •		• • • • • • • • • • • • • • • • • • •		00 · · ·	0.0.0 0 Ani
Pk		°;	Aria			0 00 0 000 · · ·	o ·····			• • •	0 0 · 00 · 00 · 04 · 0
Pit		• • • • • • • • • • • • • • • • • • •	••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	_	_	_		08 · fr	• • • • •	<u>ింగ</u>	·
	Correction of the second secon	···	Aria	<u>م</u>	····	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Antc	*****		0.000	0 000 04m
			o contra	o :	······································		e se ante	0.000 0.000 0.000		0 0 00	0 An
	Larre Larre			······································	0,0		antc 				:

1 9 9 9 9 0				00 - 500 - 5		• • • • • • • • • • • • • • • • • • •	-		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	.
				000 XVI 000 000 000 000 000 000 000 000 000 0		o Contraction of the second se	Contraction of the second seco			
2 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0			o re iteration	0		entre contraction of the second secon	-		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	err err iiii iiii iiiii iiiii iiiii iiiiii
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·								. Pit	on      oo      oo      oo        oo      oo      oo      oo      oo        iiiiiiiiiiiiiiiiiiiiiiiiiiiiiiiiiiii
Ene	feb	mar	abr	may	jun j	jul	ago s	ep	oct ne	ov dic

S	ardina							
1 9 8 7		Name  Name		Constraints of the second seco	eeno			
1 9 8 8		Oran		00      00<				
1 9 8 9			00000000000000000000000000000000000000	0      0		A construction of the second s		
1 9 9 0		.      .		•      •	•      •	0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	

	9 4	1 9		9 3	1		9 2	1 9		9 1	1 9
							0	0 0			
		• 00				00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	0 0 0	0 0 00		0	
ento			Antc	0.0 0 0	· · ·	Antc		0 Ari	8 Sejilit	· : {	Ari
								° 0			••
											• :
mejilik Grento		Ari	Arte	Pite Ha	Ari	Lante	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	○ Ariı ∞	tijejili:		
								0000			
- Mejik Lerto	· : •	Ari	of Ante	****	· · · · · ·	8 Maili			Mejille	8	Arii ; ;
							° °	000			
		o Ari	Ante		· · · · · · · · · · · ·			~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	O Melilic	·····	O Aria
							• • •	0 0			
				• · ·		<u>د 8</u>	; ;;- 8	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~			° .
jejili:		Arii Fit	Antc	Pk 	Arii			Ari	Anto		Arii Pic
							0				_
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			- fe Sente		Ari			- Ari	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		······································
							0	•• • •			∞ ∘ ∘
			•				°:				0
est of the second secon	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	o Ari	- fe	····	Ari	o fe	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	o · Ari	O Mille Oranto		Ari
								0	  		800 0
			ංදී		•		• •••• •		0 0 0 0		•
o de la constante de la consta		Ari	Antc	in the second se	Ari	- South	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Ari	Mejille	····	Ari
			c							• •	∞ ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° °
o of	·	ari - Piz	2 88		Ari		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Ari	- Jante		o Pit
							000	0		0	80 0 80 0 0 80
- Lante	· · ·		o fe · · · · · ·	00000 0 0 00000 0 00000 00000	· Ari	of the second se	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	Larte	8.0.00 8.0.00 0.000 0.000 0.000 0.000	• 8 } ari
					•	0	<u>.</u> °	00	0 0 0		
						0 00 0 0	·• 0	••••• •			
Anto	·  a · · · (	Pit	- fe 			entc	• Pit • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	Ari			00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
										0	
					• •oc	- 000				8.0	00 
- Lante		eri Fit	Jarite	800 800 900		Ante		o.	- fe Gante	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	

1 9 9 8	/	1 9 9 7	0	1 9 9 6		9 5	1 9
					· Jan	:	
		ri:	k	i i q	re te	ā	rti 
		Pi					
гь 				10 15 16			
Pero Pero Pero Pero Pero Pero Pero Pero		Pit	offe Openie	Ari			o Arii
Pr.				- Arb	Se farte		Pit Pit
							Pi
		PH					Ari Pit
							- Ari
	,				Larte		Pit:
		- Ari		Pite Pite			Pit Pit
	- Carte				0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		Pit
		ari Pi					Ariı Pik

2 0 0
Anto
- Anto
Anto
Anto
Anto
Anto
Anto
Anto
Lante
Lante
Lante

Ju	rel									
1 9 8 7		in a second seco	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000		···· ··· ··· ··· ··· ··· ··· ··· ··· ·	Contraction of the second seco		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
1 9 8 8							o o o o o o o o o o o o o o o o o o o	8	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
1 9 8 9			o Esam	S Control Cont	0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	o o o o o o o o o o o o o o o o o o o			

1 9 9 0		8 8 8 9 9 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	d d d d d d						0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	
	1 9 9 0 1				000°	e e e e e e e e e e e e e e e e e e e						0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
			C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	on on bene		So 3 m	C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		0 VV	00 000000 00 000000 0 0000000000000000	
	1 9 9 3 	or of the second	Control of the second s		Received and the second					 0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 0		0 80000 0 8 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9

.....

  -

 

1 9 4		re Pe Pe Pe Pe Pe Pe Pe Pe Pe Pe Pe Pe Pe		. c: Ari 	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				
1 9 9 5	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0								
1 9 9 6								0 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
1 9 9 7		8,000 8,0000 8,000 8,0000 8,000 8,000 8,000 8,000 8,00							

 - - - -

2 0 0 1	2 0 0 0	1 9 9 9	1 9 9 8
	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	S An S	
0		en e	
			Aris -
			o o o o o o o o o o o o o o o o o o o
		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
.:			
		Carls	d d d d d
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0			· Jon
	er 		



Figura 94. Cartografía mensual de CPUE de jurel en el periodo 1987-02 en la zona norte de Chile.

ANEXO 5. Distribución espacio – temporal de la TSM satelital promedio mensual durante el período 1987 - 2002.
































#### ANEXO 6. Análisis de cruceros oceanográficos

En el presente informe se analizaron y procesaron más de 9242 estaciones de la zona norte de Chile entre los 18°-24°S y 70°-74°W que conforman una serie histórica de más de 35 años de datos oceanográficos. Se identificaron las principales masas de agua presentes en la zona de estudio (Agua Subtropical, Agua Ecuatorial Subsuperficial, Agua Intermedia Antartica). Se calculó la Profundidad de la Capa de Mezcla (PCM) presentando la variabilidad, para invierno(julio-septiembre), otoño(abril-junio), primavera(octubrediciembre) y verano(enero-marzo), para las tres regiones seleccionadas (Arica, Iquique y Antofagasta), observándose una variabilidad temporal estacional en las tres regiones, debido fundamentalmente a la presencia de una termoclina estacional, presentándose una PCM somera de alrededor de 5-8 m en la zona costera y del orden de 12-18 m en sector más oceánico en el período de verano, profundizándose para el período de invierno, por la desaparición de la termoclina estacional. Por otra parte la profundidad de las isotermas menores a 15°C mostraron una variabilidad interanual. En general las perturbaciones en la zona costera fueron mayores a la zona oceánica, presentándose más cálida la zona oceánica. Las isotermas de 11°, 12° y 13°C y la profundidad de la termoclina, mostraron una variabilidad semianual que estaría relacionada con las perturbaciones ecuatoriales. La Profundidad de la capa de mezcla mostró una variabilidad estacional. En cuanto a la variabilidad de la mínima de oxígeno disuelto ( $<1 \text{ ml} \cdot L^{-1}$ ) esta presentó una variación interanual. De igual forma la profundidad de la oxiclina (isolinea de oxígeno disuelto de 1  $ml \bullet L^{-1}$ ) mostró en general una variabilidad interanual.

En muchos aspectos la climatología preparada para las tres zonas del norte de Chile (Arica, Iquique y Antofagasta) es similar a los patrones identificados en estudio previos fuera de la costa de Chile (Brandhorst, 1971; Wyrtki, 1964; Silva y Know, 1975; Fonseca, 1989; Fuenzalida, 1989; Silva, 1998; Silva, N & R. Rojas. 1984;Blanco *et al*, 2001; Bravo, 2002). Cuantificando en general la circulación y distribución promedio de las masas de agua. Ahora bien, si se compara esta climatología con las globales se observan diferencias las cuales deben ser tomadas en cuenta al realizar estudios de procesos físicos, biológicos y químicos (Morales *et al*.1999; Blanco *et al*. 2001). Ya que en la zona oceánica la climatología global captura en general los gradientes meridionales pudiendo incluso subestimar los valores de temperatura y salinidad. Sin embargo, la climatología de la PCM y profundidad de la termoclina es coincidente con estudios anteriores que se encuentran bien documentados (Brandhorst, 1971; Wyrtki, 1964; Silva y Know, 1975; Silva, 1998; Silva, N & R. Rojas. 1984; Blanco *et al*, 2001; Bravo, 2002).

### Masas de Agua

El patrón general de los diagramas T-S para cada uno de las sectores (Arica, Iquique y Antofagasta) es resultado de un flujo de aguas relativamente frías y menos salina a profundidades medias fuera de la costa (ASAA). La mayor variabilidad se observó en la capa superficial (< 150 m de profundidad) lo que corresponde a la mezcla de AST y ASAA lo cual puede deberse principalmente al escurrimiento del aporte de aguas frescas desde

altas latitudes las cuales son de bajas salinidades (Rojas y Silva; Blanco *et al*, 2001). Se observó además, en un menor grado, la presencia de AESS. Para todos los diagramas T-S el patrón de mezcla de aguas profundas parece no cambiar estacionalmente. De igual forma (fuera de la costa) AST en la capa superficial aparece más cálida y salina en el período de primavera, verano y otoño en Arica e Iquique y sólo en verano y otoño en Antofagasta (Blanco *et al*, 2001).

El resultado de la distribución de los diagramas T-S para las localidades de Arica, Iquique y Antofagasta (Figuras 58, 59 y 60 respectivamente) es el resultado de la presencia de un flujo hacia el Ecuador de agua relativamente fría de características Subantártica (ASAA). En la capa superficial se puede inferir la presencia de un flujo hacia el polo de aguas ecuatoriales (AST) y bajo los 500 m de profundidad aproximadamente, se observa además la presencia de AIA. Se infiere además que a profundidades medias se tiene una contracorriente hacia el polo (AESS).

En general los diagramas T-S presentan variaciones según la estación del año (Blanco *et al*, 2001). Sin embargo, son más claras y evidentes las diferencias a nivel latitudinal, ya que la zona de Antofagasta esta menos influenciadas por las aguas de características AST(Fig. 60), presentando una mayor influencia de ASAA y AESS, a diferencia de Arica e Iquique que presentan una importante influencia de aguas de características de AST y AESS (Fig. 58 y 59)

En síntesis los diagramas T-S mostraron una clara influencia de AESS, la cual aumenta hacia bajas latitudes. A su vez la influencia de ASAA disminuye hacia el norte y la influencia sobre las aguas de Arica es muy débil. No así la influencia de ASAA que es más evidente en Antofagasta, lo que muestra y sugiere la existencia de un gran flujo hacia el Ecuador.

El AIA fue inferida solamente por la disminución de la salinidad y el aumento de oxígeno bajo los 250 m de profundidad aun cuando el núcleo según los diagramas T-S esta en los 500 m de profundidad. A su vez en los períodos de primavera y verano se presentan lenguas de aguas menos salinas (34,0-34,5 psu) lo que se extiende hasta el norte debido a el aporte de aguas de menor salinidad desde altas latitudes (región de fiordos y canales del sur de Chile) a unos 100 m de profundidad (Rojas y Silva, 1996; Blanco *et al*, 2001). Shaffer *et al.* 1995 también muestra que esta zona presenta bajas salinidades y plantea que el origen de estas bajas salinidades en la zona central de Chile es bebido al aporte de aguas desde altas latitudes, reportando flujos promedios hacia el polo de 12 y 12.8 cm·s<sup>-1</sup>. a 250 m de profundidad a 10 km fuera de la costa a los 30°S.

Características espaciales y estacionales de las condiciones oceanográficas de la zona norte de Chile.

# Estructura Superficial

En la Figs. 61a, b y c se muestra la variabilidad estacional de las variables temperatura, salinidad y profundidad de la termoclina considerando la profundidad de la isoterma de 15°C. Se puede observar que la temperatura y la salinidad muestra un fuerte ciclo anual con máximos en la zona oceánica en el período de verano (24°C y de 35.3 psu). La presencia de los menores valores se observó en el período de invierno con valores de temperatura entre 16-17°C y de salinidades entre 34.8-35 psu.

En general dentro de los 100 Km desde la costa, las isolineas fueron paralelas a esta. Observándose en invierno una intensa surgencia de aguas más frías y menos salinas, debidas principalmente a la presencia de vientos favorables a la surgencia costera (Fuenzalida, 1989; Blanco *et al.* 2001)

Según Bravo, 2000, la profundidad de las isotermas de 13°, 14° y 15°C para las localidades de Arica, Iquique y Antofagasta presentan un ciclo anual con una componente semianual con una amplitud de 12 m y durante los meses de diciembre estas isotermas alcanzan las máximas profundidades (150-250, 90-250, 50-120 m de profundidad respectivamente) en la zona costera, lo cual es coincidente con los resultados obtenidos.

En cuanto al gradiente perpendicular a la costa, tanto la temperatura como la salinidad presentaron valores máximos en verano, observándose una disminución de norte a sur en todas las estaciones del año. Lo que refleja la menor de influencia de las aguas de características ecuatoriales en la zona oceánica.

A su vez en el sector oceánico de las tres zonas de estudio las isolineas presentaron una orientación zonal con un gradiente perpendicular a la costa asociado al calentamiento solar. La profundidad la termoclina se profundiza fuera de la costa en todas las estaciones del año (Morales, 1999; Blanco *et al.* 2001; Bravo, 2002).

La profundidad de la termoclina en el sector costero es menor a 30 m de profundidad en todas las estaciones del año presentándose valores más profundos en el sector oceánico (> 72°W) pudiendo observar valores mayores a 70 m de profundidad.

El movimiento perpendicular a la costa de la isopleta de 40 m de profundidad muestra claramente la variabilidad estacional de la profundidad de la termoclina (Fig. 60c). Con un gradiente máximo en otoño y verano, y mínimo en invierno-primavera, situación similar es mostrada por Morales *et al*, 1999.

### Estructura vertical de la columna de agua

# <u>Temperatura</u>

En la Fig. 62 se presenta la estructura vertical perpendicular a la costa de la temperatura, hasta los 400 km exteriores para Arica, Iquique y Antofagasta.

La estructura térmica mostró una estratificación vertical máxima en verano para cada una de las zonas estudiadas (Fig. 62).

En Arica se presenta una fuerte estratificación superficial en invierno. En la medida que nos acercamos a la costa (bajo los 150 m de profundidad) las isotermas de 10°C, 11°C y 12°C se profundizan lo cual es producto de un flujo hacia el polo asociado con una contracorriente. En general este comportamiento se presenta durante casi todo el año en la zona de Antofagasta, lo cual puede disminuir o desaparecer en el período invernal en las transectas de Arica e Iquique (Fig. 62).

A su vez las isotermas de 12°C y 13°C nos pueden mostrar hasta donde abarca la zona de transición de la capa superficial de la zona de surgencia y por ende del límite del flujo hacia el Ecuador y del flujo hacia el polo. Además nos entregan información de la variabilidad estacional y latitudinal al comparar las tres zonas seleccionadas (Arica, Iquique y Antofagasta).

En general se observó una continua profundización de la isoterma de  $12^{\circ}$ C desde Antofagasta hacia Arica en todas las estaciones. Observándose profundidades de ~ 275 m en la zona costera de Arica en verano y profundidades de ~ 190 m en invierno.

A su vez, en la zona oceánica la variación en profundidad de la isoterma de 12°C no es tan marcada como en la zona costera para casi todas las estaciones del año siendo cercana a 200 m de profundidad. La zona de Iquique presenta un comportamiento muy similar a la de Arica.

Caso distinto es Antofagasta que mostró profundidades mínimas en primavera. Lo que puede implicar una mayor intensidad de la corriente hacia el polo y de la contracorriente en el período de verano (Blanco *et al*, 2001).

La zona oceánica en general se presentó más cálida que la zona costera para casi todos los meses del año, y estas diferencias se presentaron sobre los 50 m de profundidad, lo que da cuenta de la variabilidad de la capa superficial (Fig. 64, 65, 66) y de los intensos procesos de surgencia en la zona.

En la capa profunda (>100 m de profundidad) las variaciones de temperatura no son de gran magnitud, no existen grandes diferencias al comparar la zona oceánica y costera, lo que muestra que en la zona más profunda las variaciones son mucho menores y el sistema es mucho más estable durante todo el año (Fig. 64, 65 y 66).

Esta zona (Arica, Iquique y Antofagasta) se caracteriza por poseer un régimen de surgencia costera que se presenta casi todo el año, con una máxima intensidad durante el verano y mínima durante el invierno (Fuenzalida, 1990; Morales, 1999; Yañez et al, 1995). La zona de estudio mostró una clara variabilidad interanual, lo cual muestra la variabilidad del sistema, presentándose una profundización de las isotermas de 13°, 14° y 15° en los años en que se evidencio el evento de El Niño (Fig.68a), siendo más intensa esta profundización en el evento 1996-1997, lo cual es concordante con lo mostrado por Morales *et al*, 1999. La variabilidad de la columna de agua en a zona oceánica no presenta grandes variaciones interanuales, presentando una estructura más calida (Fig.69a) para la zona de Arica. Situación similar se presentó en los sectores costeros y oceánicos de Iquique (Fig.70a y 71a) y Antofagasta (Fig. 72a y 73a).

## Salinidad

En las Fig. 62 se presenta la estructura vertical perpendicular a la costa de la salinidad, hasta los 400 km exteriores para Arica, Iquique y Antofagasta.

La variabilidad vertical de la estructura salina esta determinada principalmente por la presencia de cuatro masas de agua (ASAA, AESS, AST y AIA) en la región de estudio. Donde la surgencia costera modula el ciclo anual de la temperatura y salinidad y a sy vez las masas de aguas están fuertemente influenciadas por las AIAA

En el área de estudio claramente se observa la influencia del AIAA debido a las mínimas salinidades en profundidad. A su vez, entre los 100-300 m de profundidad en la zona adyacente al sector costero el AESS crea un máximo relativo de salinidad y las mínimas relativas de salinidad en el sector más oceánico que es resultado de las AESS las cuales son modificadas por ASAA (Silva, 1998; Silva, N & R. Rojas. 1984; Blanco *et al*, 2001). Las altas salinidades en este sector son debido a la influencia en la mezcla de las AST. Las aguas más salinas (>35,1 psu) se presentan en las capas superficiales de la zona oceánica el período de verano y otoño. Las salinidades observadas en la capa superficial (< 50 m de profundidad) muestran que la surgencia costera lleva aguas menos salinas hacia la superficie durante casi todo el año, pero esto es más débil en invierno e intenso en verano. En general las aguas de surgencia en la zona de estudio son AESS o ASAA, o una combinación de ambas (Fig. 63).

En síntesis se observaron los máximos valores fuera de la costa en verano (>24°C y 34,8-35.0 psu) y los mínimos valores en invierno (16-17°C y 34,8-35,0 psu). En cuanto al gradiente perpendicular a la costa tanto para la temperatura y salinidad es máxima en verano y disminuye de norte a sur en casi todas las estaciones del año, lo cual muestra que la influencia de las aguas superficiales ecuatoriales disminuye hacia el sur (Fig. 58, 59 y 60).

En el sector oceánico (> 72°W) las isotermas e isohalinas están orientadas zonalmente, lo cual es consistente con el gradiente latitudinal de ambas variables debido al calentamiento solar. La isoterma de 15°C se profundiza hacia la zona oceánica y es menos profunda hacia la zona costera (Fig. 62).

En cuanto a la profundidad de la termoclina (criterio de la isoterma de 15°C) considerando la isolinea de 40m de profundidad, nos muestra el grado de la variabilidad estacional en las isotermas superficiales.

Para el caso de la salinidad no es factible establecer claramente un patrón que muestre una variabilidad interanual, (Fig.69b) para la zona de Arica. Situación similar se presentó en los sectores costeros y oceánicos de Iquique (Fig.70b y 71b) y Antofagasta (Fig. 72b y 73b).

# Profundidad de la capa de Mezcla

Los ciclos del El Niño generan cambios en la estructura térmica de la columna de agua, por lo tanto afectan en forma directa la profundidad de la capa de mezcla y de la termoclina, en donde las perturbaciones originadas en el Pacífico Ecuatorial pueden tener un mayor efecto en la zona costera. (Enfield & Allen, 1980)

A su vez, en la zona norte de Chile la surgencia costera que se relaciona dinámicamente con la distribución del campo de vientos y el intercambio de calor océano-atmósfera controlan la variabilidad espacial y temporal de la profundidad de la capa de mezcla (PCM) y de la termoclina (PT).

En el presente informe, se obtuvo la distribución espacial y temporal de la PCM a partir del algoritmo de Kara *et al*, 2000, observándose en general que la estructura espacial de PCM aumenta hacia la zona oceánica. Distribuyéndose las mayores profundidades zonalmente fuera de los 72°W. Presentando profundidades entre 8-10m en el sector costero y de 18-20 m en el oceánico en enero (Fig. 74). En febrero y marzo la estructura es muy similar a la de enero presentando casi los mismos valores (Fig. 74). Para abril y mayo se observaron valores entre 12-16 m de PCM en el sector costero y entre 18-30 m en el oceánico, a diferencia de junio que en la costa se presentaron valores promedio entre 20-25 m PCM y de 35-40 m en el sector oceánico (Fig. 75).

En julio, agosto, septiembre y octubre se presentó una estructura similar, con máximos valores en estos meses en la zona oceánica (50-70 m de PCM). En el sector costero la PCM vario entre 20-30 m (Fig. 76). Para noviembre y diciembre se presentaron los menores valores de PCM, los cuales variaron entre 8-10 m en la zona costera y entre 10-18 m en la zona oceánica (Fig. 77).

En síntesis, a variabilidad estacional mostró que en verano, producto de la presencia de la termoclina estacional la PCM es más somera variando entre 8-14 m en la zona costera y entre 10-12 m en la zona oceánica (Fig. 78).

En invierno, la PCM se hace más intensa debido a la desaparición de la termoclina estacional profundizándose la PCM por acción del viento, presentando valores de PCM entre 20-30 m en la zona costera y de 40-65 en la zona oceánica.

En otoño, la PCM presentó valores entre 14-16 m en la zona costera y de 16-20 m en a oceánica y en primavera la PCM vario entre 10-14 m en la costa y entre 12-16 m en la zona oceánica (Fig. 78). Observándose claramente un ciclo anual con máximos valores de PCM tanto en la zona costera y oceánica en los meses de invierno (Fig. 79)

En general, la climatología preparada para el presente informe muestra bastante similitud a los valores reportados en publicaciones anteriores para la zona de estudio (Wyrtki, 1964; Blanco *et al*, 2001; Bravo, 2002), siendo comparativos los valores con climatologías globales (Monterrey & Levitus, 1997).



Figura 54. Distribución geográfica de las estaciones oceanográficas obtenidas por parte del CENDOC (Centro Nacional de Datos Oceanográficos de Chile), para el período de estudio comprendido entre 1964-1998 en las localidades de Arica, Iquique y Antofagasta.



Figura 55. Distribución de las estaciones oceanográficas utilizadas para el cálculo de la climatología (profundidad de la capa de mezcla, profundidad de las isotermas de 12°, 13° y 14°C, profundidad de la oxiclina, profundidad de la termoclina (isoterma de 15°C)), para el período de estudio comprendido entre 1964 y 1998 en las localidades de Arica, Iquique y Antofagasta.



Figura 56. a) Distribución temporal zonal y b) meridional de la base de datos hidrográficos obtenida desde el Centro Nacional de Datos Oceanográficos de Chile (CENDOC) desde 1964 al 2000.



Figura 57. Esquema para la determinación de PCI (h  $_{L(T)}$ ) y PCM (h  $_{L(\sigma t)}$ ) usando los perfiles de temperatura y densidad respectivamente.



Figura 58. Perfiles verticales de temperatura, salinidad, oxígeno y diagrama T-S para la zona de Arica, donde se incluyen todos los datos (malla costera y oceánica).



Figura 59. Perfiles verticales de temperatura, salinidad, oxígeno y diagrama T-S para la zona de Iquique, en donde se incluyen todos los datos (malla costera y oceánica).



Figura 60. Perfiles verticales de temperatura, salinidad, oxígeno y diagrama T-S para la zona de Antofagasta, en donde se incluyen todos los datos (malla costera y oceánica).



Figura. 61. Distribución espacial de los promedios estacionales de temperatura, salinidad y profundidad de la termoclina (considerando la isoterma de 15°C) para la región de estudio del norte de Chile (Gentileza: Blanco *et al.* 2001).



Figura 62. Distribución vertical estacional de temperatura para Arica, Iquique y Antofagasta. (Gentileza: Blanco *et al.* 2001).



Figura 63. Distribución vertical estacional de salinidad para Arica, Iquique y Antofagasta (Gentileza: Blanco *et al.* 2001).



Figura 64. Perfiles verticales promedio para todos los meses para el período comprendido entre 1965-1998 en la zona costera (línea roja) y oceánica (línea azul) de Arica.



Figura 65. Perfiles verticales promedio para todos los meses para el período comprendido entre 1965-1998 en la zona costera (línea roja)y oceánica (línea azul) de Iquique.



Figura 66. Perfiles verticales promedio para todos los meses para el periodo comprendido entre 1965-1998 en la zona costera (línea roja)y oceánica (línea azul) de Antofagasta.



Figura 67. Distribución vertical estacional de oxígeno disuelto para Arica, Iquique y Antofagasta. (Gentileza: Blanco *et al.* 2001).



Figura 68. Diagrama de Hovmoller para a) la temperatura, donde la isolinea verde punteda muestra como varia la isoterma de 15°C ( $\sim$  prof. de la termoclina), la isolinea punteada en azul como varia la isoterma de 14°C, y la roja como varia la isoterma de 13°C. b) La salinidad y c) la concentración de oxigeno disuelto donde la liean roja representa la profundidad de la oxiclina (isolinea de 1 ml·L<sup>-1</sup>) para la zona costera de Arica, entre 1965-1998.



Figura 69. Diagrama de Hovmoller para a) la temperatura, donde la isolinea verde punteda muestra como varia la isoterma de 15°C ( $\sim$  prof. de la termoclina), la isolinea punteada en azul como varia la isoterma de 14°C, y la roja como varia la isoterma de 13°C. b) La salinidad y c) la concentración de oxigeno disuelto donde la linea roja representa la profundidad de la oxiclina (isolinea de 1 ml·L<sup>-1</sup>) para la zona oceánica de Arica, entre 1964-1998.



Figura 70. Diagrama de Hovmoller para a) la temperatura, donde la isolinea verde punteda muestra como varia la isoterma de 15°C ( $\sim$  prof. de la termoclina), la isolinea punteada en azul como varia la isoterma de 14°C, y la roja como varia la isoterma de 13°C. b) La salinidad y c) la concentración de oxigeno disuelto donde la linea roja representa la profundidad de la oxiclina (isolinea de 1 ml·L<sup>-1</sup>) para la zona costera de Iquique, entre 1964-1998.



Figura 71. Diagrama de Hovmoller para a) la temperatura, donde la isolinea verde punteada muestra como varia la isoterma de 15°C ( $\sim$  prof. de la termoclina), la isolinea punteada en azul como varia la isoterma de 14°C, y la roja como varia la isoterma de 13°C. b) La salinidad y c) la concentración de oxigeno disuelto donde la linea roja representa la profundidad de la oxiclina (isolinea de 1 ml·L<sup>-1</sup>) para la zona oceánica de Iquique, entre 1964-1998.



Figura 72. Diagrama de Hovmoller para a) la temperatura, donde la isolinea verde punteada muestra como varia la isoterma de 15°C (~ prof. de la termoclina), la isolinea punteada en azul como varia la isoterma de 14°C, y la roja como varia la isoterma de 13°C. b) La salinidad y c) la concentración de oxigeno disuelto donde la linea roja representa la profundidad de la oxiclina (isolinea de 1 ml·L<sup>-1</sup>) para la zona costera de Antofagasta, entre 1964-1998.



Figura 73. Diagrama de Hovmoller para a) la temperatura, donde la isolinea verde punteda muestra como varia la isoterma de 15°C ( $\sim$  prof. de la termoclina), la isolinea punteada en azul como varia la isoterma de 14°C, y la roja como varia la isoterma de 13°C. b) La salinidad y c) la concentración de oxigeno disuelto donde la linea roja representa la profundidad de la oxiclina (isolinea de 1 ml·L<sup>-1</sup>) para la zona oceánica de Antofagasta, entre 1964-1998.

#### Enero



Figura 74. Distribución espacial y temporal de la climatología de la profundidad de la capa de mezcla (PCM) calculada utilizando el algoritmo de Kara, 2000. para la serie hidrográfica comprendida entre 1965-1998 para la zona norte de Chile para enero, febrero y marzo.

## Abril



Figura 75. Distribución espacial y temporal de la climatología de la profundidad de la capa de mezcla (PCM) calculada utilizando el algoritmo de Kara, 2000. para la serie hidrográfica comprendida entre 1965-1998 para la zona norte de Chile para abril, mayo y junio.

#### Julio



Figura 76. Distribución espacial y temporal de la climatología de la profundidad de la capa de mezcla (PCM) calculada utilizando el algoritmo de Kara, 2000. para la serie hidrográfica comprendida entre 1965-1998 para la zona norte de Chile para julio, agosto y septiembre.

# Octubre









# Noviembre



Х

#### Diciembre



Figura 77. Distribución espacial y temporal de la climatología de la profundidad de la capa de mezcla (PCM) calculada utilizando el algoritmo de Kara, 2000. para la serie hidrográfica comprendida entre 1965-1998 para la zona norte de Chile para octubre, noviembre y diciembre.



Figura 78. Distribución espacial y estacional de la climatología de la profundidad de la capa de mezcla (PCM) calculada utilizando el algoritmo de Kara, 2000. para la serie hidrográfica comprendida entre 1965-1998 para la zona norte de Chile para otoño, invierno, primavera y verano.



Figura 79. Distribución temporal promedio mensual de la profundidad de la capa de mezcla (PCM) calculada utilizando el algoritmo de Kara, 2000. para la serie hidrográfica comprendida entre 1965-1998 para la zona costera y oceánica del norte de Chile utilizando tres criterios ( $0.5^{\circ}$ C,  $0.125\sigma_{t}$ , vr  $0.5^{\circ}$ C).



Figura 80. Distribución espacial y promedio anual de la profundidad de la capa de mezcla (PCM) calculada utilizando el algoritmo de Kara, 2000. para la serie hidrográfica comprendida entre 1965-1998 para la zona norte de Chile.

# ANEXO 7. Distribución Espacio-temporal de Clorofila Satelital Durante los Cruceros MPH 1999-2002.

En 1999 (Fig. I), altos niveles de cloa se presentan en toda lo costa, sin embargo los mayores focos (>2,5 mg/m<sup>3</sup>) se localizan entre Pisagua e Iquique, en la zona del río Loa y en Mejillones-Antofagasta. Otro foco de alta concentración se presenta al sur de Tocopilla (19-27 agosto). Esto coincidiría en parte con la distribución de huevos, que se extiende principalmente desde Arica al sur de Tocopilla. En el 2000 (Fig. II) altos niveles de cloa se presentan entre 20°50'-21°40'S, en el principal foco del desove. Lamentablemente las imágenes de cloa disponible no permiten obtener una visión de la parte norte de la zona de estudio (por contaminación de los píxeles con nubes). En el 2001 (Fig. III) también se presenta un problema de cobertura nubosa en la parte norte, que limita el número de píxeles para el análisis. Las aguas con mayores niveles de cloa se observan entre los 20°-21°S. Focos más puntuales se localizan en Mejillones y Antofagasta. Dichas zonas corresponden a focos de mayor densidad de huevos. El 2002 (Fig. IV) se presentan altos niveles de cloa, tanto en el sector costero como oceánico. Las mayores concentraciones ocurren en la zona costera al sur de Arica, la zona del río Loa y Antofagasta. Coincidente con mayores valores de cloa en el sector oceánico, la zona de desove se extiende entre Arica y Antofagasta alrededor de 60 mn de la costa.



Figura I. Distribución espacio-temporal de la clorofila satelital (en escala logarítmica), el 15 de agosto y 14 de septiembre de 1999 (Escala de colores de colores presentada en la figura 104).



Figura II. Distribución espacio-temporal de la clorofila satelital (en escala logarítmica), el 11 y 31 de agosto de 2000. El rango de cloa en la paleta de colores varía entre  $\log_{10}$  (0.25mg/m<sup>3</sup>) y  $\log_{10}(10 \text{ mg/m}^3)$ .



Figura III. Distribución espacio-temporal de la clorofila satelital (en escala logarítmica), el 6 y 26 agosto de 2001. El rango de cloa en la paleta de colores varía entre  $log_{10}(0.25mg/m^3)$  a  $log_{10}(10 mg/m^3)$ .


Figura IV. Distribución espacio-temporal de la clorofila satelital (en escala logarítmica), durante el 22 de agosto y 11 de septiembre de 2002. El rango de cloa en la paleta de colores varía entre  $\log_{10}(0.25 \text{mg/m}^3)$  a  $\log_{10}(10 \text{ mg/m}^3)$ .

ANEXO 8. Gráficos de plano fatcorial del análisis de ACP. 1) basado en los datos oceanográficos del periodo 1987-02. 2) basado en los datos 1997-98 de anchoveta. 3) basado en los datos del periodo 1999-02 de anchoveta



1. Primeros dos ejes del ACP, basado en los datos oceanográficos del periodo 1987-02. Las variables continuas activas en negro, y las continuas ilustrativas en azul. Los dos ejes explican el 65% de la variabilidad.



Figura 3. Primeros dos ejes del ACP, basado en los datos 1997-98 de anchoveta. Las variables continuas activas en negro, y las continuas ilustrativas en azul. Los dos ejes explican el 76% de la variabilidad.



Figura 4. Primeros dos ejes del ACP, basado en los datos del periodo 1999-02 de anchoveta. Las variables continuas activas en negro, y las continuas ilustrativas en azul. Los dos ejes explican el 74% de la variabilidad.

# ANEXO 9 . Equipo profesional y técnico que ha participado en las actividades realizadas en el proyecto.

Yáñez Rodríguez, E	leuterio
Título	:Ingeniero Pesquero, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
Postgrados	:Diplome d'Etudes Approfondies en Oceanographie Biologique
	: Doctorat 3ème Cycle en Oceanographie Biologique
	: Doctorat en Oceanologie (Ph.D)
Campo de Trabajo	: Biología y oceanografía pesquera
Categoría	: Jefe de Proyecto e Investigador
* Administración y o	dirección general del proyecto
Tiempo aproximado	ocupado del total comprometido: 150%

Hormazábal Fritz,	Samuel Ernesto			
Título	: Oceanógrafo, PUCV.			
Postgrados	: M.Sc. en Física, UEDC.			
-	Ph.D. en Oceanografía, Universidad de Copenhague, Dinamarca.			
Campo de Trabajo	: Oceanografía Física			
Cargo	Investigador			
* Caracterización ar	nbiental-satelital			
* Análisis de relacio	ones pesca-ambiente			
Tiempo aproximado	ocupado del total comprometido: 120%			

Montecinos, Aldo	
Título	: Oceanógrafo, PUCV.
Postgrados	: PhD en Oceanografía, Universidad de Concepción.
-	MSc en Ciencias Atmosféricas, Universidad de Chile
Campo de Trabajo	: Oceanografía Física
Cargo	:Investigador
Tiempo aproximado	ocupado del total comprometido: 120%

# Cubillos Santander, Luis Antonio

Título	: Biólogo Pesquero, Universidad Arturo Prat. Iquique- CHILE.
Postgrados	: Magíster en Ciencias con mención en Oceanografía. UDEC.
Campo de Trabajo	: Biología y Oceanografía Pesquera
Cargo	: Investigador
* Caracterización del	l reclutamiento
¥ A /1·· 1 1 ·	1 / • / 1• /

\* Análisis de relaciones reclutamiento-ambiente Tiempo aproximado ocupado del total comprometido: 120% Silva Gallinato, ClaudioTítulo:Ingeniero Pesquero, PUCV.Campo de Trabajo:Teledetección y SIG en oceanografía pesqueraCargo:Investigador\* Caracterización ambiental-satelital\* Análisis de relaciones pesca-ambienteTiempo aproximado ocupado del total comprometido: 150%

Pizarro, Oscar	
Título	: Oceanógrafo, PUCV.
Postgrados	: Ph.D. Department of Oceanography, Gothenburg Univ., Sweden.
Campo de Trabajo	: Oceanografía
Cargo	:Investigador
* Caracterización am	biental
Tiempo aproximado	ocupado del total comprometido: 50%

Silva Sandoval, Nels	on		
Título	: Profesor de Química; PUCV.		
Postgrados	: Master of Science en Oceanografía; U. Oregon, E.E.U.U.		
Campo de Trabajo	: Oceanografía Química		
Categoría	: Investigador		
* Caracterización cru	ceros oceanográficos		
Tiempo aproximado	ocupado del total comprometido: 20%		

#### Cañón Canales, José Raúl

Título	: Profesor de Historia, Geografía y Educación Cívica.		
	: Licenciado en Geografía Geógrafo U.Ch.		
Postgrados	: Master Science Mención en Oceanografía Biológica.		
Campo de Trabajo	: Oceanografía y biología pesquera		
Categoría	: Investigador		
* Caracterización ambiental			
Tiempo aproximado ocupado del total comprometido: 20%			

#### Valdenegro M, Alexander Adolfo

Título : Oceanógrafo, PUCV.

Campo de Trabajo : Oceanografía

Cargo : Colaborador

\* Caracterización cruceros oceanográficos

Tiempo aproximado ocupado del total comprometido: 80%

Gómez Romero, FabiánTítulo: Ingeniero Pesquero, Pontificia Universidad Católica de ValparaísoCampo de Trabajo: Biología PesqueraCategoría: Colaborador\* Caracterización Bio-pesquera\* Análisis de relaciones pesca-ambienteTiempo aproximado ocupado del total comprometido: 100%

# Órdenes Justiniano, Alejandra

Titulo : Ingeniero Pesquero, PUCV

Campo de Trabajo : Biología Pesquera

Categoría : Colaborador

\* Caracterización Bio-pesquera

\* Análisis de relaciones pesca-ambiente

Tiempo aproximado ocupado del total comprometido: 150%

#### Espíndola Rebolledo, Fernando Esteban

Título: Ingeniero Pesquero. PUCVPostgrados: Magíster en Ciencias Mención Pesquerías ©, UDEC.Campo de Trabajo: Oceanografía PesqueraCategoría: Colaborador\* Caracterización Bio-pesqueraTiempo aproximado ocupado del total comprometido: 95%

ANEXO 10. Invitación-programa, inscripciones y resultados obtenidos del "Taller de Difusión y Discusión de Resultados", proyecto FIP 2003-33 (Análisis Integrado Histórico Ambiente-Recursos, I y II Regiones).

## 1.- INVITACIÓN – PROGRAMA

# INVITACIÓN

La Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV) y la Universidad de Concepción (UEDC), tienen el agrado de invitar a Usted al "Taller de Difusión y Discusión de Resultados" del Proyecto FIP 2003-33 "Análisis Integrado Histórico Ambiente-Recursos, I y II Regiones". El Taller se realizará el 6 de mayo de 2005, en el Auditorium del Instituto de Fomento Pesquero, de acuerdo con el siguiente programa:

#### PROGRAMA

- 08:30-08:45 Introducción: E. Yáñez y S. Hormázabal
- **08:45-09:30** Relaciones Temporales Ambiente-Recursos: E. Yáñez, A. Montecinos y L. Cubillos
- 09:30-10:15 Relaciones Espacio-Temporales Ambiente-Recursos: S. Hormazábal, C. Silva y A. Ordenes
- **10:15-11:00** Discusión (Café)
- 11:00-11:20 Modelo Conceptual: E. Yáñez et al.
- 11:20-11:40 Variables Proxies: A. Ordenes et al.
- 11:40-12-10 Indicadores: C. Silva et al.
- 12:10-13:00 Discusión (Cafe y Sandwichs)
- **13:00-13:30** Conclusiones y Recomendaciones

# 2.- INSCRIPCIONES.

14

3

#### **INSCRIPCIONES**

Taller de Difusión y Discusión de Resultados Proyecto FIP 2003-33 Análisis Integrado Histórico Ambiente-Recursos, I y II Regiones.

6 de mayo de 2005, Valparaíso.

Nombre	Institución	e-mail
Daniela almos	PUCU	Danielo, ol mos Demail com
Jenoraper O Pellance	POCU	JeeloB2002 (DHotmail.com
Nurses lobos	PUCU	murysloso & Hotmail com
Paz Pantoja	Cong	Cone OSHOA. CI
Pablo numoz	'UV	pablo minoz QUU. Cl
Nando Selvine	PUCU	/
Fernando Espindo le	FROP	Ferrowdo, Espiruddo Offop (1
Herfor Bacigalupo	sonopesta	estendion Serigresia.
Juis heldos	Uber	LUcusillor O ledee of
Packs Buston	PUCU	Paolo Bustor R Chuikerin
Silving Henouber	Subscretaire	Stemander Subjesco
Hence Reyes	IFOP	HPRyes PIFOP. (1
Timin Jose Munice	Dest	Nanc jose nuncze of fatuci
forent Aleriez	PUCU	foreme Alvanes Astorge IP the
Ferricul Balucuten	UV	Fercundo Ballbouter OUV. C/
Mides/ Dojgemoutt	PUCU	micheli depreunoutto e Marinal con
PEOLNO AJUITEZ	PUCU	2001/22 Deptrilian
MArricia Brown	IFOP	moren pipo al
Enzo Acura S.	UCN-SCACM	eacuna a ucn I
Doniele Course NODEZ	PUCV	deviele _ori @ hotmail com
MillENA PiZARNO	IFOP	m Pizarro @ ifop. cl
NEISON SILVA S	PUCN	MSILVA Q UCV. 18

#### **INSCRIPCIONES**

Taller de Difusión y Discusión de Resultados

Proyecto FIP 2003-33

Análisis Integrado Histórico Ambiente-Recursos, I y II Regiones.

6 de mayo de 2005, Valparaíso.

Nombre	Institución	e-mail
Herman H. Waranda	1 IFOP	h hiranded yop, cl
Maria José Muñoz	U.C.S.C	marie sezo poza hotma la
R. SERRA	11012	rservak itop, y
Mariella Canales	IFOP	manales @ ifop. cl
Selvia Hermandez	SSP	Shernanolex DSubpesca.cl
Revendre Balloutin	V. de Valpinaiso	fernando. balborfin QUU. d
Juan Cor la Suive	BFOP	Suiroz @ itop. cl
HOMBORTO CHAMORIEU	convepach	EONFEPACH a TERRALCL
MARIO ACEVEDO 5.	SUBPESCA	macivedo p subperca. I
iltor (stasti	JEOP	
Ruben Pingchet	FIP-Subjexe	rpiradal Rouperad
Aldo Montremos	JGEO-UdsC	horo dicio diso. varc. cl
Eleuterio Yanez P.	PUEV	eyaneze utv.cl
Alymotic troling	Nev	depudio - ordenisover d
Υ		U

# 3.- RESULTADOS TALLER PROYECTO FIP 2003-33 "ANÁLISIS INTEGRADO AMBIENTE-RECURSOS, I Y II REGION"

Lugar: Instituto de Fomento Pesquero - Fecha: 0/may0/2005 - Asistentes: 50 personas			
Reconocimientos	Críticas	Recomendaciones	Acuerdos
Se destaca el esfuerzo realizado	Se critica la debilidad en	Afinar el análisis con datos de	Analizar propuestas de futuras
por el equipo de trabajo, ya que el	las series de datos,	biología básica y oceanografía fina;	investigaciones. Primera reunión en
proyecto contaba con poco tiempo	mencionando la falta de	y del bacteriopláncton	Viña del Mar, el miércoles 18 de
y financiamiento.	información más fina y		mayo, durante los "Congresos de
	continua en el tiempo.		Ciencias del Mar".
Se reconoce la cantidad	Se reconoce la falta de	Estudiar la distribución del alimento, en directa relación	Se abre la instancia de crítica al
considerable de datos analizados y	estudios en biología	con la distribución costera de la anchoveta.	FIP, por via e-mail o carta, para
resultados logrados.	básica y oceanografía	Estudiar el cambio en la oferta alimenticia en periodos El	gestionar la mejora de la
	fina espacio-temporal.	Niño- La Niña.	investigación.
Se reconoce que es una primera	¿Más que indicadores	Compartir la información para avanzar en la investigación.	Se solicitan recomendaciones para
aproximación, pero con resultados	ecosistémicos serían		confeccionar TBR, para un próximo
importantes y orientadores.	indicadores		proyecto donde se generen mejores
	poblacionales?		indicadores.
El proyecto se trata de realizar	Falta conocimiento	Expresar el modelo conceptual en un mapa conceptual,	
desde 1997, hasta que en el 2005	sobre los trabajos	para hacerlo más didáctico.	
se logra concretar por la iniciativa	realizados por el IFOP.		
del equipo de trabajo.			
	D ( (11) (		
	¿Porque no se utilizo en	Ir mas alla de la descripcion y el diagnostico, par entender	
	el analisis el indice	los procesos.	
	larval?.		
	Los indicadores ya se	Agregar en el modelo conceptual la escala asociada al	
	conocen; entonces	"Cambio Climático".	
	enfatizar en los	Agregar en la escala diaria-semanal el concepto de	
	integrados (FOE).	"productividad".	
		Agregar historia de vida de los recursos, buscando en la	
		bibliografía	

## Lugar: Instituto de Fomento Pesquero Fecha: 6/mayo/2005 Asistentes: 50 personas

# PROGRAMA DE INVESTIGACION: MECANISMOS DEL CLIMA E IMPACTOS ANTROPICOS EN EL ECOSISTEMA

- 1) Manejo de datos y propuesta de un sistema de monitoreo del ecosistema.
- 2) Impactos del clima y la pesca sobre los reclutamientos.
- 3) Cambios de regímenes en recursos demersales en relación con cambios de condiciones oceanográficas.
- 4) Respuesta de diferentes estrategias de historia de vida a los cambios de regímenes.
- 5) Indicadores ecosistémicos y modelos.