CENTRO DE INVESTIGACIONES
BIOLOGICAS DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

Propuesta de bases para un sistema de información ambiental para la pesquería de sardina del Golfo de California

T e s i s

Que para obtener el Grado de

Doctor en Ciencias

En el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales

P r e s e n t a

Salvador Emilio Lluch Cota

La Paz, B.C.S., México, Marzo del 2000

CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLOGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

DIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

La Dirección de Estudios de Posgrado del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. **CERTIFICA** que según obra en nuestros registros internos, el alumno de Doctorado en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales **SALVADOR EMILIO LLUCH COTA**, ha recibido **autorización** de todos y cada uno de los miembros del **Comité Revisor de Tesis** para proceder a la **impresión** correspondiente, trámite que se realizó vía correo electrónico en virtud de que cada uno de sus miembros se encuentra residiendo en países muy distantes.

Declaro lo anterior bajo protesta de decir verdad.

Atentamente.

Dr. Sergio Hernández Vázquez
Director de Estudios de Posgrado

VERIFICADO

LIC. OSVELIA IBARRA MORALES,
JEFE DEL DEPTO. CONTROL ESCOLAR

Mar Bermejo 195, Col. Playa Palo de Santa Rita C.P. 23090 - Apdo. Postal 128, La Paz, B.C.S., México, 23000
Tel. (01-1) 125-3633 ext. 3751 Fax (01-1) 122-0598 http://www.cibnor.mx/posgrado/posgrado.html

Agradecimientos

Esta investigación recibió apoyo por parte de los Proyectos SIMAC-970106044, CONACyT R-29374B y CIBNOR AYCG7.

El autor fue becario de Posgrado CONACyT Reg. 94964.

Se agradece el apoyo del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. y su titular Dr. Mario Martínez García. Programa de Formación de Recursos Humanos: Dr. Sergio Hernández Vázquez (Titular), Lic. Leticia González Rubio, Lic. Osvelia Ibarra Morales, Horacio Sandoval Gómez y Sra. Guadalupe Sanchez. Subdirección de Informática: Ing. Horacio Sánchez Mendoza (Titular), Lic. Ana María Talamantes Cota, Ing. Edgar Yuén Sánchez, Marco Antonio Díaz Serna, Lic. Josefina Villa, Lic. Verónica Vázquez, Ing. Héctor Campos Cruz, Ing. Fernando Von Borstel Luna, Ing. Cesar Estrada Enríquez, Ing. Roberto Morales Hernández y Lic. Larry Miller. Programa de Protección Ambiental y Cambio Global: Dr. Alfredo Ortega Rubio (Titular), Dr. Daniel Lluch Belda, Dr. Sergio Hernández Vázquez, M.C. Daniel B. Lluch Cota, M.C. Germán Ponce, M.C. Cesar A. Salinas Zavala, B.P. Ma Verónica Morales Zárate y B.P. Ehecatl M. Muñóz Mejía.

Soporte técnico: M.C. J. Jesús Bautista Romero, Ing. Carlos Pacheco Ayub y Sra. Eulalia Meza Chávez.

El Dr. Elis Glazier revisó la versión en inglés del presente documento, así como la mayoría de los manuscritos enlistados como publicaciones principales y adicionales.

Las siguientes Instituciones brindaron facilidades para la realización de estancias de investigación y visitas de trabajo: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FIRM-FAO-Roma, Italia), Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE-Ensenada, México), School of Marine Affairs-University of Washington (UW-Seattle, USA).

Por su tiempo, consejos y asesoría, estoy en deuda con: Dr. Alejandro Parés Sierra (CICESE), M.C. Manuel Otilio Nevárez Martínez (CRIP-Guaymas/INP), Dr. Emilio Beier (CICESE), Dra. Juli Berwald (USC), M.C. Rubén Rodríguez Sánchez (CICIMAR), Biól. Martín E. Hernández Rivas (CICIMAR), M.C. Juana López Martínez (CIBNOR-Guaymas) y Dra. Yanira Green Ruíz (CRIP-Mazatlán/INP).

Contenido

Acta de liberación de Tesis I
Comité Tutorial y Revisor de Tesis y Miembros del Jurado de examen II
Agradecimientos III
Presentación V
Resumen VII
Abstract IX

1. Generalidades 1
    1.1 Variabilidad de baja frecuencia (interdecadal) 1
    1.2 Variabilidad de alta frecuencia (interanual) 3
    1.3 El reto de las ciencias pesqueras modernas 4
        1.3.1 Procesos determinantes, fuentes de estrés ambiental y mecanismos de interacción 5
        1.3.2 Funciones, modelos y sistemas de información 10
2. La sardina del Golfo de California 13
    2.1 Caracterización ambiental del Golfo de California 13
    2.2 Sistemas de enriquecimiento 14
        2.2.1 Mezcla en la región de las grandes islas 15
        2.2.2 Enriquecimiento en la zona central del Golfo 15
        2.2.3 Indice de surgencias 16
    2.3 La sardina del Golfo de California 17
        2.3.1 Variabilidad de baja frecuencia (interdecadal) 18
        2.3.2 Variabilidad de alta frecuencia (interanual) 20
3. Propuesta de bases para un sistema de información ambiental para la pesquería de sardina del Golfo de California 22
    3.1 Procesos determinantes, fuentes de estrés ambiental y mecanismos de interacción 22
    3.2 Funciones y modelos 24
    3.3 Propuesta de sistema de información 26
        3.3.1 Modelación de concentración y retención 27
        3.3.2 Acciones futuras para la implementación del sistema 29
4. Resumen de resultados y conclusiones 31
5. Referencias 35

Anexo 1. Publicaciones principales
Anexo 2. Resúmenes de algunos trabajos adicionales

Presentación

El presente trabajo se realizó en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. como parte de las actividades para obtención del Título de Doctor en Ciencias en el Uso Manejo y Preservación de los Recursos Naturales del Programa de Estudios de Posgrado.

Esta tesis está basada en las siguientes publicaciones principales, citadas en el texto como se indica (artículos anexos):

R1. S.E. Lluch-Cota. 2000. Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. *Oceanologica Acta.* En prensa

R2. S.E. Lluch-Cota, D.B. Lluch-Cota, D. Lluch-Belda, M.O. Nevárez-Martínez, A. Parés-Sierra and S. Hernández-Vázquez. 1999. Variability of sardine catch as related to enrichment, concentration, and retention processess in the central Gulf of California. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 40: 184-190

R3. S.E. Lluch-Cota, D. Kiefer, A. Parés-Sierra, D.B. Lluch-Cota, J. Berwald and D. Lluch-Belda. Toward an environmental analisys system for the Gulf of California sardine fishery. *Lowell Wakefield Symposium Series.* Aceptado.

Se incluye un listado de publicaciones y manuscritos adicionales, no especificadas en el Plan de Trabajo Individual, pero generadas durante el mismo periodo y de utilidad para el presente trabajo. En el texto, se hace referencia a ellos con la clave que se indica (resúmenes anexos):

A1. Lluch-Cota, D.B., S. Hernández-Vázquez, and S.E. Lluch- Cota. 1997. Empirical investigation on the relationship between climate and small pelagic global regimes and El Niño-Southern Oscillation (ENSO). *FAO Fisheries Circular* No. 934. FAO, Rome. 48 pp

A2. A. Bakun, C. Roy and S.E. Lluch-Cota. 1998. Coastal Upwelling and Other Processes Regulating Ecosystem Productivity and Fish Production in the Western Indian Ocean. In: K. Sherman, E.N. Okemwa and M. Ntiba (eds.) Large Marine Ecosystems of the Indian Ocean: Assessment, Sustainability and Management. *Blackwell Science Ltd.* England, 103-141

A3. Schwartzlose, R.A., J. Alheit, A. Bakun, T. Baumgartner, R. Cloete, R. J. M. Crawford, W. J. Fletcher, Y. Green-Ruíz, E. Hagen, T. Kawasaki, D. Lluch-Belda, S. E. Lluch-Cota, A. D. MacCall, Y. Matsuura, M. O. Nevarez-Martinez, R. H. Parrish, C. Roy, R. Serra, K. V. Shust, N. M. Ward and J. Z. Zuzunaga. 1999. Worldwide large-scale fluctuations of sardine and anchovy populations. *Southafrican Journal of Marine Sciences.* 21: 289-347

A4. Lluch-Cota, D.B., D. Lluch-Belda, S.E. Lluch-Cota, J. López-Martínez, M.O. Nevárez-Martínez, G. Ponce Díaz, C.A. Salinas Zavala, A. Vega Velazquez, R. Lara-Lara, M.G. Hammann y J. Morales. Capítulo 5: Las Pesquerías y El Niño. In: V. O. Magaña R. (Ed). Los Impactos de El Niño en México. *DGPC/SG/UNAM/IAI/SEP-CONACYT*. México. 137-178.

A5. D. Lluch-Belda, S.E. Lluch-Cota, D.B. Lluch-Cota y S. Hernández-Vázquez. 1999. La variabilidad oceánica interanual y su impacto sobre las pesquerías. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 49: 219-227

A6. Lluch-Cota, S.E. y J.P. Arias Aréchiga. 2000. Sobre la importancia de considerar la existencia de Centros de Actividad Biológica para las regionalizaciones del océano: El caso del Golfo de California. *In*: D. Lluch-Belda, J. Elorduy-Garay, S.E. Lluch-Cota y G. Ponce Díaz (eds). *Centros de Actividad Biológica del Pacífico Mexicano.* Obra en proceso.

A7. S.E. Lluch-Cota and A. Parés-Sierra. Modeling scenarios of 0-order environment- spawning relations for the Gulf of California sardine. *Beyond El Nino Meeting La Jolla, California, U.S.A March 23 to 26, 2000.* Resumen de presentación oral.

A8. Nevárez-Martínez, M.O., D. Lluch-Belda, M.A. Cisneros-Mata, J.P. Santos-Molina, M.A. Martínez-Zavala and S.E. Lluch-Cota. Distribution and abundance of the Pacific sardine (*Sardinops caeruleus*) and their relation to temperature and upwelling in the Gulf of California, Mexico. *Beyond El 4Nino Meeting La Jolla, California, U.S.A March 23 to 26, 2000.* Presentación en poster y trabajo sometido a Progress in Oceanography.

A9. Lluch-Cota, S.E. y D. Lluch-Belda. 2000. Caso de estudio sobre el uso de bases de datos ambientales de baja resolución espacial, como una alternativa para inferir hábitat de desove. *Oceanides.* En prensa

A10. Lluch-Cota, S.E., D. Lluch-Belda and C. Roy. Low frequency variability of the Pacific sardine in the Gulf of California as related to Regime scale global synchrony. *Manuscrito en preparación*

A11. Lluch-Cota, S.E., C. Roy and D. Lluch-Belda. Testing Optimal Environmental Windows hypothesis at an enclosed sea. *Manuscrito en preparación*

Resumen

El manejo de las poblaciones de pelágicos menores demanda enormes esfuerzos de investigación, debido a su fuerte dependencia del ambiente. A pesar de haberse iniciado y desarrollado en regiones distantes, a diferentes tiempos y bajo esquemas de manejo diversos, las pesquerías de pelágicos menores del mundo comparten una historia de fluctuaciones de baja frecuencia (entre décadas), aproximadamente sincrónicas e independientes de los niveles de explotación. A otras escalas temporales (entre años), El ENSO representa la fuente de variabilidad más importante afectando características fisiológicas y ecológicas. Con la finalidad de considerar estas fuentes de variaciones en la biomasa de poblaciones en explotación, las ciencias pesqueras modernas se ven en la necesidad de incorporar enfoques de investigación multidisciplinarios e innovadores. Una posible ruta es estudiar procesos biológicos clave, las fuentes y mecanismos de estrés ambiental, modelar estas relaciones e implementar sistemas de información como herramientas para un manejo adecuado. Actualmente se sabe que el reclutamiento en pelágicos menores es altamente variable, y existen una serie de hipótesis respecto de los mecanismos mediante los cuales varía el éxito de reclutamiento. Al tratar de abordar estudios a escala regional, una posibilidad es adaptar dichas hipótesis a las condiciones locales mediante la selección de información pertinente, y la incorporación apropiada de técnicas de análisis y modelos. En este contexto, se puede considerar a la sardina de Golfo de California como un laboratorio natural para este tipo de enfoques de investigación, gracias a sus características ambientales y el grado de conocimiento del recurso. De manera similar a lo que ocurre en otras regiones pesqueras de pelágicos menores, este recurso es de importancia regional dado que representa una alta proporción de la captura nacional total; sin embargo, también representa uno de los recursos más variables. En la baja frecuencia, la sardina del golfo y la del sistema de la Corriente de California deben ser consideradas juntas y en sincronía con la señal del Régimen. En la alta frecuencia, el ENSO produce efectos directos en los movimientos anuales de distribución, los niveles de captura, el éxito reproductivo y el tamaño de las clases anuales. Las surgencias invernales por viento en la costa oriental del golfo es el proceso más importante en términos de producción biológica en el golfo central, el área de desove más importante de la sardina del golfo. Uno de los resultados de esta investigación es el cálculo de un índice de surgencias para esta zona, y el análisis de su variabilidad en el tiempo. Se concluye que la temperatura y los procesos físicos relacionados con la triada (enriquecimiento, concentración y retención) son las fuentes más importantes de fluctuaciones en el reclutamiento para la sardina del Golfo de California. Se diseñó y ajustó una función doble-logística para expresar el proceso biológico (éxito de desove como la razón de estaciones positivas sobre el totales de muestreos de huevos y larvas en el Golfo) como función de variables físicas (temperatura y el índice de surgencias), con la capacidad de ser no-lineal, no forzada a simetría, y que permitiera estimar parámetros de ajuste. A partir de las funciones se calcularos series de tiempo de

éxito reproductivo en función del ambiente, y se compararon con la serie de capturas. Los resultados muestran capacidad predictiva, especialmente ante eventos extremos (colapsos y recuperaciones rápidas). Este resultado es especialmente significativo si se considera que los datos utilizados para estimar el índice de éxito reproductivo son independientes de la pesquería y, más aún, fueron generados en su totalidad durante los 1970s y 1980s; es decir, entre 1989 y 1997 (el periodo con fluctuaciones más importantes), el indicador es completamente predictivo. Como parte de los resultados se propone un sistema de información que considera datos de entrada (viento y temperatura), la estimación de índices de éxito reproductivo expresado en función de procesos físicos (temperatura, enriquecimiento, concentración y retención), y la incorporación de herramientas de sistemas de información geográfica para combinarlos. Se menciona que en los casos de temperatura y enriquecimiento, el cálculo de indicadores de éxito puede utilizar como entrada información satelital, por lo que se aplica mayor atención a resolver los indicadores de concentración y retención. Se propone combinar salidas de modelos de circulación con estadísticas Lagrangianas y se prueban estos métodos a escala estacional y se explora la posibilidad de utilizar escenarios ambientales a otras escalas. Se presenta también una descripción de las acciones futuras que deberán tomarse para implementar este sistema. Se concluye que la información y experiencia generada durante la elaboración de esta investigación puede resultar de utilidad para la implementación de sistemas para otras pesquerías de ésta u otras regiones.

Abstract

Management of small pelagic fisheries is very research demanding due to their high environment-depending variability. Besides these fisheries have developed in different regions, times, and management approaches, they share a nearly synchronic decadal-scale growing/collapsing history, independently from exploitation levels. At the interannual scale, the ENSO is the most important source of variability driving direct physiological effects and ecological alterations. To contemplate these source of biomass variation, Modern fishery sciences must achieve new multidisciplinary and innovative research approaches. One possible route is to study key biological processes, the environmental sources and mechanisms underlying the variations in those processes, modeling the relations and implementing information systems as tools for suitable management. Regarding small pelagic fish, it has being already demonstrated recruitment is highly variable, and there is a number of integrative hypotheses already developed. At regional scale, one could try to adapt those hypotheses to local conditions, by the proper selection of data sources, analyzing technics, and models. The Gulf of California sardine is a suitable case for designing environmental information systems due to a number of properties. As in other regions, this fishery is massive and regionally important, but also highly variable. In the low frequency, the Gulf of California and the California sardine stocks should be regarded as one, and the system seems to be in synchrony with the Regime signal. At the high frequency, ENSO has apparent effects on southward movement , catch levels, reproduction, and strength of year classes. Winter wind-driven upwelling at the continental side is the key process controlling enrichment in the central Gulf, where most of the sardine spawning takes place. One product of this work is the computation of an upwelling index, the analysis of the resulting series and its incorporation to the analysis. Temperature and the triad processes are key stress sources controlling recruitment fluctuations in the Gulf of California sardine. A double-logistic function was designed and fitted to represent relations between physical variables (SST and UI) and biological processes (spawning success as eggs and larvae positive/total sampled stations) with the ability of being dome-shaped, nonlinear, not restricted to symmetry and with predictive value. From this functions, time series of reproductive success associated to SST and wind driven processes are reported and compared to catch series. Results show predictive capabilities specially for extreme events (collapses and fast recoveries). This is specially meaningful since data used for the estimation of reproductive success index were independent from catch data used for the comparission. Also, data for the double logistic function fitting were generated between the 1970s and 1989, meaning that between 1989 and 1997 (i.e. the period of greatest fluctuations) the proxy is merely predictive. The structure of an information system is proposed by considering input data (wind and SST), indices of environment-dependent reproduction probability (SST, enrichment, retention, and concentration), and the incorporation of a geographic information system. It is mentioned that for the system, SST and enrichment estimates could be obtained

by incorporating satellite-derived and Internet-accessible data bases, and special attention is placed to resolve indices of concentration and retention. In doing so, the combination of a general circulation model and Lagrangian statistics were considered and preliminary tested by a seasonal scale example and preliminary results of scenarios modeling. A general description of further steps at developing the system is provided. It is likely that the experience acquired through this research will be useful for the implementation of environmental information systems for other fish resources inside the Gulf of California and other areas of the world ocean.

1. Generalidades

La explotación de peces pelágicos menores (sardinas y anchovetas) es uno de los mejores ejemplos de pesquerías en las que la variabilidad de las poblaciones no depende únicamente de las variaciones en los niveles de captura; por el contrario, los cambios en el ambiente son una fuerza controladora de gran importancia. Estos recursos, que representan la fuente de biomasa marina más importante para consumo humano (A1), son altamente impredecibles y de difícil manejo (Beverton 1983) debido a su fuerte dependencia directa del ambiente[1].

1.1 Variabilidad de baja frecuencia (interdecadal)

Las grandes pesquerías de los sistemas de los bordes occidental (Japón) y oriental (California) del giro del Pacífico Norte, el oriental del Pacífico Sur (Humboldt), y la parte sur del Atlántico oriental (Benguela), se han iniciado y desarrollado a diferentes tiempos y bajo diferentes esquemas de manejo y, sin embargo, en todos los casos existe una alternancia entre periodos de crecimiento acelerado y dramáticos colapsos (A1). Más aún, existe un buen número de evidencias paleoecológicas que apuntan a que este comportamiento no es reciente y que tuvo características similares incluso antes de que existiera forma alguna de explotación por el humano (Soutar and Issacs 1974, Baumgartner *et al.* 1992).

De la observación comparativa de estas variaciones de baja frecuencia (escala de décadas) entre los sistemas, Kawasaki (1983) notó que además de que en todos existen variaciones similares, éstas son aparentemente sincrónicas; es decir, los niveles de abundancia de poblaciones de pelágicos menores en sistemas muy distantes del planeta covarían, a pesar de las enormes diferencias que existen entre características ambientales regionales y las particularidades de la dinámica de las poblaciones (Lluch-Belda *et al.* 1989, 1992c, A1).

Adicionalmente, se ha notado que existe una historia común de alternancia entre sardina y anchoveta, con la excepción de la Corriente de Benguela donde la anchoveta domina en periodos en que la sardina es abundante en el resto de los

[1] Son peces de ciclo de vida relativamente corto, acumulan grandes cantidades de biomasa, se encuentran cerca de la base de la trama trófica y presentan variaciones fuertes de reclutamiento.

sistemas y *vice versa*. Estas observaciones fueron integradas por expertos de diversos países a finales de la década de los 1980s bajo el nombre de Problema del Régimen (Lluch-Belda *et al.* 1989, 1992c) a partir del concepto de régimen climático acuñado por el Dr. J. Isaacs en 1976 (MacCall 1996), y como una hipótesis alternativa al estudio de los efectos de la explotación (Problema de la Pesca) y el Problema del Reclutamiento (Lasker and McCall 1983).

Los mecanismos que producen los cambios de régimen han sido explorados por dos vías principales: la primera supone la existencia de cambios ambientales graduales de baja frecuencia generando una alternancia entre periodos de condiciones óptimas y desfavorables para la distribución y reproducción de las especies (Lluch-Belda *et al.* 1989, 1992c). La segunda postula que eventos repentinos en el ambiente desatan cambios poblacionales en diferentes regiones del océano mundial y resultan en la formación de clases anuales anómalamente fuertes que generan un crecimiento poblacional acelerado, o especialmente débiles que resultan en declinación (A3).

De hecho, el conjunto de evidencias existente respecto de cada una de las vías indica que se trata de una combinación de mecanismos; es decir, que existen periodos de largo plazo (interdecadales) durante los cuales existe una mayor o menor frecuencia de eventos anómalos afectando positiva o negativamente el desarrollo de las poblaciones (A3). En cualquier caso, aparentemente se trata de señales a nivel planetario, por lo que su origen debe ser independiente de la dinámica de las poblaciones, de los efectos antropogénicos directos, o de cambios ecológicos regionales. De probarse cierto, este hecho resultaría de gran valor para las ciencias pesqueras pues la capacidad de entendimiento e incluso pronóstico de las variaciones en las poblaciones a esta escala temporal sería más factible (Bakun 1997).

Un hecho alentador, en términos de comprobar esta hipótesis, es que los pelágicos menores no parecen ser el único tipo de poblaciones que presenta variaciones sincrónicas. Bakun (1997) llamó la atención sobre este hecho al representar gráficamente las series de capturas (y en algunos casos biomasa) de varias pesquerías de diferentes partes del mundo.

1.2 Variabilidad de alta frecuencia (interanual)

Las poblaciones biológicas se encuentran sujetas a diversas escalas de variación ambiental. Mas allá de las variaciones cíclicas anuales, la escala más espectacular de variación, en términos de desviaciones respecto de las condiciones promedio, es sin duda la alta frecuencia asociada con El Niño-Oscilación del sur (ENSO, por sus siglas en inglés).

En la región de las costas americanas del Pacífico, las anomalías en las condiciones del ambiente costero repercuten de manera inmediata sobre los recursos pesqueros (A4). En términos generales, se presentan efectos fisiológicos directos como consecuencia de las altas temperaturas, la distribución de especies móviles se modifica, los procesos oceanográficos de enriquecimiento se ven afectados y la composición de las comunidades cambia de manera que se altera la disponibilidad de alimento y la cantidad de depredadores. El reciente evento de 1997-98 representó una excelente oportunidad para observar diversos ejemplos de este tipo de alteraciones ya que, además de ser uno de los eventos más fuertes del siglo, ha sido el mejor observado gracias a los avances que existen en materia de seguimiento ambiental y biológico y la acrecentada conciencia de hogaño en la comunidad científica (Kininmonth 1999). Una descripción más completa de los mecanismos físicos asociados al ENSO y sus efectos sobre los ecosistemas marinos, puede encontrarse en A4.

En el caso de las pesquerías de pelágicos menores, las dos fuentes de variación más importantes de los niveles de captura son los cambios de distribución y el éxito de reclutamiento por extensión de desove, supervivencia, estado fisiológico, etc. Este tipo de cambios resultan en temporadas de pesca pobres y en que la industria de extracción obtenga menores ganacias. Sin embargo, los efectos más importantes de la variabilidad ambiental sobre este tipo de recursos se presentan a escala interdecadal[2], debido a que los regímenes de baja o alta abundancia sostenida se reflejan en el desarrollo y colapsos de las industrias pesqueras con el consecuente impacto social y económico en los países involucrados (Everett *et al.* 1996).

---

[2] Existe una fuerte polémica respecto de si existe relación entre la frecuencia e intensidad de ENSOs con los regímenes interdecadales de variación. Para mayores referencias consultar Mann *et al.* *(In press)* y A1.

1.3 El reto de las ciencias pesqueras modernas

Las ciencias pesqueras tradicionales[3] han llegado a reconocer la importancia de considerar la variabilidad ambiental para las estimaciones de parámetros poblacionales y la toma de decisiones en la administración de recursos, expresado por Hilborn and Mangel (1997) en su obra El detective ecológico[4]:

"La mayoría de los modelos de dinámica de poblaciones de peces ignoran la variabilidad ambiental, excepto en la forma de ruido blanco afectando el reclutamiento del stock. Sin embargo, existe un creciente número de evidencias respecto a que una parte considerable de las variaciones en los stocks de muchas especies se debe a cambios ambientales. Lo que muchas veces percibimos como sobrepesca puede ser en realidad reflejo de una disminución debida a cambios en el ambiente.

El problema es que a las escalas temporales a las que normalmente se cuenta con datos para el estudio de las pesquerías es difícil, si no imposible, diferenciar entre un cambio en la abundancia de los stocks producido por un cambio sistemático en el ambiente de aquel que resulta de la actividad de explotación. Debido a que la presión de pesca puede ser modulada mientras que el ambiente no, en los modelos pesqueros y las medidas de manejo se asume que los cambios son debidos al esfuerzo. Como consecuencia, utilizamos modelos sin variabilidad ambiental y dejamos el reto de considerar realísticamente cambios ambientales a la siguiente generación de detectives ecológicos".

La principal implicación es que, para que la explotación de recursos se pueda llevar a cabo de manera eficiente y oportuna, los esquemas administrativos deben adquirir la capacidad de ajustarse a condiciones cambiantes en el tiempo (A5). El reto de las ciencias pesqueras modernas es rescatar el enorme acervo de información y metodologías desarrollado por las ciencias pesqueras tradicionales, combinarlo con otras ramas de las ciencias como la ecología, la fisiología, la

---

[3] En el presente trabajo se refiere a la parte de las ciencias pesqueras basadas en el concepto de que una población crece hasta un nivel máximo que es constante, y a una velocidad que depende de su tamaño (A5)

[4] Traducción del autor

oceanografía y la meteorología marina, y abordar el estudio de la dinámica de las poblaciones y su interacción con las diferentes fuentes de variabilidad (presión de pesca, ambiente físico e interacciones ecológicas) para generar nuevos modelos y sistemas de inforrnación que permitan incorporar una fuente de variabilidad reconocida. Algunos de los problemas a los que nos enfrentamos en esta tarea incluyen el que encaramos diversas escalas de variabilidad, que se requiere aplicar un enfoque multidisciplinario y que aún no existen métodos de estudio bien establecidos.

De manera simplificada, una de las rutas que han seguido las investigaciones para incorporar las mediciones de variabilidad ambiental a los esquemas de manejo, mas allá de las simples relaciones empíricas, es: a) estudiar qué procesos son determinantes para la abundancia de las poblaciones, identificar qué fuentes de variabilidad ambiental afectan más significativamente a dichos procesos e investigar los posibles mecanismos que gobiernan estas relaciones, y b) diseñar modelos que permitan representar dichos mecanismos expresando el proceso biológico como función del proceso físico, adoptando sistemas de información y análisis ambiental que permitan integrar dichos modelos y utilizarlos con oportunidad y operatividad (R3).

1.3.1 Procesos determinantes, fuentes de estrés ambiental y mecanismos de interacción

Los cambios de biomasa en una población resultan del balance entre la mortalidad (natural y por pesca) y la suma del crecimiento individual y el reclutamiento. El éxito del reclutamiento puede ser conceptualizado como la integración de eventos actuando a través de varias etapas de la vida de los organismos: desde la magnitud y condición del desove en un extremo, hasta la supervivencia de pre-reclutas en el otro. Es decir, que la cantidad de individuos nuevos que entran a la población cada año depende del número de huevos que son producidos y la supervivencia de éstos a través de diversos estadios de desarrollo, hasta la etapa de juveniles.

En el caso de los pelágicos menores, es claro que la combinación de ciclos de vida cortos y la fuerte dependencia del ambiente resultan en altos niveles de variabilidad en el reclutamiento (Lasker 1975, Cury and Roy 1989, Bakun 1996).

Por este motivo, no existe aún capacidad de anticiparse a las fluctuaciones producidas por el ambiente y en consecuencia ajustar las estrategias de manejo (Cole and McGlade 1998).

La mayor parte de los esfuerzos de investigación respecto de la variabilidad en la abundancia de pelágicos menores se ha enfocado al efecto del ambiente sobre la sobrevivencia de estadios tempranos. Recientemente, Cole and McGlade (1998) realizaron una revisión y clasificación de las hipótesis existentes sobre las relaciones entre las variaciones de la supervivencia en estadios tempranos y el ambiente. En su trabajo, reconocen dos tipos de hipótesis: mecanicísticas y sintéticas.

Las hipótesis mecanicísticas, *sensu* Cole and McGlade (1998), son aquellas que abordan fuentes específicas de mortalidad larval, y se reconocen dos principales grupos: las basadas en procesos denso-dependientes, como el canibalismo y la depredación, y las denso-independientes, como la muerte de larvas por inanición y la pérdida de las larvas por salida del hábitat adecuado.

Hjort (1914) fue el primero en plantear este tipo de ideas en su hipótesis del periodo crítico que menciona que la supervivencia larval depende de que éstas encuentren alimento suficiente justo en el paso de la fuente interna a externa de alimentación (paso de huevo a larva, cuando el saco vitelino ha sido consumido). A partir de las investigaciones de Hjort, se han desarrollado un buen número de hipótesis que amplían el concepto del periodo crítico, como la de "match-mismatch" de Cushing (1975) que plantéa que el reclutamiento exitoso en una región depende de la sincronización entre los ciclos reproductivos y los ciclos de producción. La idea es que entre más se sobrepongan la máxima abundancia de larvas con los máximos valores de producción (alimento) mayor será la proporción de larvas que sobrevivan.

Otra hipótesis derivada de los trabajos de Hjort se refiere a la importancia de la estabilidad de la columna de agua. Lasker (1975, 1978) menciona que las condiciones adecuadas para que las larvas se alimenten y sobrevivan depende de que los procesos oceanográficos regionales permitan un balance entre el enriquecimiento de la capa iluminada (aporte de nutrientes) y estratificación de la columna (formación de clinas). En apoyo a esta última, diversos autores han

argumentado que la turbulencia, cuando presenta valores muy altos, tiene efectos negativos sobre estos estadios críticos al impedir la formación de agregados entre las larvas y las partículas alimenticias y por lo tanto dificultando la actividad de alimentación (May 1974, Lasker 1981, 1985; Peterman and Bradford 1987).

Por su parte, la advección puede también tener efectos negativos sobre la reproducción, especialmente en zonas de surgencia. Parrish *et al.* (1983) mencionan que la mortalidad de las larvas se relaciona con la pérdida de éstas cuando no existen estructuras (p.e. giros o frentes) que retengan a las larvas en la zona donde el alimento y la dinámica de la columna son adecuados para su supervivencia.

Las hipótesis sintéticas integran la mayoría de las hipótesis y pruebas mecanicísticas en modelos conceptuales más amplios. Gracias a que involucran diferentes procesos biológicos y diferentes fuentes de forzamiento ambiental, este tipo de hipótesis son las que pueden permitir idealizar el sistema natural de manera que sea factible plantear modelos y sistemas de información con valor predictivo.

La respuesta fisiológica de los organismos ante presiones ambientales suele ser no lineal. En muchos casos, esta respuesta puede ser representada como una curva en forma de domo donde a niveles muy bajos o muy altos de la variable ambiental el desarrollo biológico se encuentra limitado (Shelford 1913 en Odum 1972). Estos domos son frecuentemente encontrados y descritos por biólogos experimentales al someter a organismos a estrés para determinar niveles óptimos y límites de tolerancia. Uno de los ejemplos más comunes es la respuesta fisiológica ante la temperatura.

Sin embargo, existen respuestas similares ante variables menos directamente relacionadas y de muy difícil reproducción en laboratorio. En estos casos, donde la experimentación es impracticable, la investigación se apoya en el método comparativo (Bakun 1996). Uno de los ejemplos más claros y mejor documentados de estas relaciones es la existencia de ventanas ambientales óptimas (OEW; Cury and Roy 1989) de intensidad del viento para la reproducción de pelágicos menores observadas en diversos sistemas y diferentes especies (A2).

A pesar de que el viento no ejerce una acción directa sobre los pelágicos menores, sus efectos en la dinámica del océano son determinantes para diversos procesos biológicos. El viento es comúnmente la fuente de energía para el bombeo de aguas ricas en nutrientes a la capa iluminada del océano. A mayor intensidad de viento mayor cantidad de material disponible para la producción biológica. Sin embargo, cuando el viento es muy intenso puede ser responsable de altos niveles de turbulencia y transporte horizontal que resultan en detrimento de la actividad reproductiva de las especies (Bakun 1996). Estas observaciones han sido recientemente integradas en el concepto de Triada Fundamental (Bakun 1996) de tres procesos principales que al combinarse resultan en condiciones favorables para la reproducción de muchos tipos de peces, incluidos los pelágicos menores: enriquecimiento como los procesos de abastecimiento de nutrientes a la capa iluminada (surgencias, mezcla, etc.), concentración de partículas (convergencia, formación de frentes, estabilidad de la columna de agua, etc.), y retención de las larvas en el hábitat adecuado, o advección hacia él (A2).

En contraste a la gran cantidad de trabajos que existen respecto del efecto del ambiente sobre la supervivencia larval, algunos trabajos mencionan que las fluctuaciones en el reclutamiento están también influídas por la magnitud del desove (Lluch-Belda 1994). La idea básica es que las poblaciones tienden a desovar en condiciones óptimas y a ocupar para la reproducción la mayor cantidad de hábitat disponible[5], de manera que las condiciones ambientales determinan la disponibilidad de este hábitat y ésta, a su vez, la magnitud del desove y por lo tanto la cantidad de huevos que produce la población. Las implicaciones de esta hipótesis son que, incluso sin mortalidad durante los estadios tempranos, el ambiente afecta el reclutamiento y por lo tanto los niveles de biomasa de años subsecuentes.

Sin pretender abordar extensivamente la descripción del modelo de cuenca de MacCall (1990), consideraré algunos puntos para esta sección. En el modelo se menciona que los organismos de una población tienden a ocupar al máximo un hábitat definido como la combinación de niveles adecuados de todos los factores que determinan la distribución. El autor idealiza la ocupación del hábitat como una

[5] Hábitat disponible en el sentido de presentar condiciones adecuadas para el desove respecto de las diferentes variables ambientales críticas (temperatura, turbulencia, disponibilidad de alimento, etc.)

cuenca donde la profundidad representa la biomasa total ocupando el hábitat disponible y la línea de costa las fronteras donde las características del hábitat limitan la distribución. La forma de domo invertido resulta de que hacia el centro de la cuenca se combinan las mejores condiciones ambientales, por lo que los organismos tienden a ocuparla en mayor medida, mientras que hacia la periferia la calidad del hábitat es menor, por lo que los organismos tienden a evitarla. Por esta razón, los limitantes del crecimiento poblacional son los factores denso-independientes hacia la periferia de la cuenca (menor calidad de condiciones ambientales) y denso-dependientes en el centro (mayor número de organismos); es decir, que hay un equilibro entre la tendencia a ocupar el centro, promovido por el gradiente de las condiciones ambientales, y a ubicarse en la periferia por presiones de denso-dependencia.

En este modelo, los procesos de expansión y contracción de las poblaciones se reflejan como cambios en el tamaño de la cuenca derivados de un aumento en la biomasa total (factores densodependientes presionando de adentro hacia afuera) y cambios en los factores denso-independientes (modificando las fronteras de la cuenca).

Esta bien documentado que durante eventos o periodos donde dominan condiciones térmicas adversas, los stocks de pelágicos menores tienden a contraer su distribución a pequeñas regiones adyacentes a la costa (Lluch-Belda *et al.* 1991, 1992b, Cole and McGlade 1998), mientras que durante condiciones óptimas se presenta una expansión del área de desove. A nivel interanual, la extensión geográfica del hábitat de desove, definido sobre la base de niveles preferenciales ante condiciones ambientales (p.e. condiciones térmicas y niveles de surgencias por viento), se ha relacionado exitosamente con los niveles de abundancia de años posteriores en poblaciones de pelágicos menores de diferentes sistemas (Lluch-Belda *et al.* 1989, 1992a, 1992b, Watanabe *et al.* 1996, 1997, Bautista-Romero 1997).

En resumen, en la mayoría de los casos resulta muy difícil determinar qué parte del proceso reproductivo está afectando más directamente los niveles de reclutamiento, pero es claro que de manera general la reproducción de los pelágicos menores (sea por la supervivencia durante los estadios tempranos de desarrollo o por la magnitud del desove) está influenciada por grupos similares de

variables ambientales en los diferentes sistemas (básicamente temperatura y procesos derivados de viento).

1.3.2 Funciones, modelos y sistemas de información

El desarrollo de sistemas de información para la predicción de procesos biológicos sobre la base de información ambiental depende tanto del conjunto de variables ambientales que se seleccionan como de la aplicación de modelos apropiados para investigar la naturaleza de las relaciones.

Los paquetes de información ambiental que se seleccionan deben, además de ser relevantes para el proceso en investigación, ser confiables, de fácil adquisición y de relativamente bajo costo (Cole and McGlade 1998). Por otro lado, dado que la disponibilidad de información biológica (estimaciones de biomasa, cruceros de huevos y larvas, etc.) es generalmente escasa, se debe procurar que no sea la cantidad de datos de los indicadores ambientales selecionados los que limiten los análisis; es decir, que se cuente con suficiente inforrnación histórica.

Específicamente en el caso de investigaciones para predicción del reclutamiento, las variables ambientales más frecuentemente consideradas son aquellas relacionadas con procesos ambientales de conocida importancia para las cuales existe información histórica y fácil acceso; básicamente temperatura superficial del mar e indicadores derivados de registros de viento (Cole and McGlade 1998).

Sin embargo, no siempre se cuenta con indicadores de todos los procesos relevantes. Por ejemplo, de los tres elementos de la triada fundamental de Bakun (Bakun 1996), únicamente el enriquecimiento ha sido cuantificado por medio de indicadores derivados de viento y campos térmicos. Resalta el hecho de que, para poner a prueba la hipótesis de la triada y asignarle un valor de utilidad para el desarrollo de modelos predictivos y sistemas de información, es necesario implementar indicadores de concentración y retención sobre la base de información de fácil adquisición y con la posibilidad de evaluar la actividad de estos procesos en el pasado (Cole and McGlade 1998).

Una vez identificadas las fuentes de información ambiental y biológica, la modelación ecológica tiene la tarea de relacionarlas mediante el diseño de sistemas de ecuaciones que reflejen lo más fielmente posible la compleja realidad del ambiente natural (Ware *in press*); es decir, debe basarse en el conocimiento de los mecanismos de interacción pertinentes y en considerar aspectos como la forma de la relación, la combinación de respuestas ante diferentes variables y los cambios en las formas de las relaciones a través del tiempo.

Una forma de aplicar este tipo de enfoques a investigaciones a nivel regional, es aprovechar el acervo de información que se ha generado mediante las investigaciones comparativas (Bakun *et al.* 1998, Bakun 1998). Es decir, considerar las hipótesis existentes, adaptarlas y comprobarlas para el caso particular con el apoyo de los conocimientos respecto del stock en cuestión y las características ambientales regionales. Con este fin, el uso de hipótesis sintéticas asegura que se involucran diversos procesos y relaciones y representan la mejor oportunidad de generar un sistema de información útil para el estudio a nivel regional.

Sin embargo, para poner a prueba las hipótesis respecto de los mecanismos es necesario recurrir a técnicas y modelos adecuados para expresar las funciones. Un error recurrente en este tipo de investigaciones es la aplicación de modelos y ecuaciones que asumen formas de la relación entre variables y obligan a los datos a seguir un comportamiento *a priori*. El caso más frecuente es, sin duda, la aplicación de modelos lineales para relacionar procesos físicos y biológicos.

Una de las técnicas que se ha empleado en la investigación sobre reclutamiento para evitar este problema es permitir que sean los datos quienes sugieran la forma de la relación. Por ejemplo, Cury and Roy (1989) utilizaron exitosamente transformaciones empíricas no lineales (p.e. Breiman and Friedman 1985) para relacionar el reclutamiento con la intensidad del viento. Este enfoque ha sido aplicado a diversas especies de clupeidos en diferentes regiones del mundo con resultados que, por lo general, apoyan la existencia de ventanas ambientales óptimas donde los máximos valores de reclutamiento corresponden a niveles moderados de viento del orden de 5 a 6 ms^{-1} (p.e. Cury and Roy 1989, Roy *et al.* 1992, Faure and Cury 1998, Serra *et al.* 1998, A11). Sin embargo, este tipo de transformaciones tienen limitantes respecto de la posibilidad de modelar por sistemas de ecuaciones (Cury and Roy 1989).

Quizá una de las enseñanzas más importantes respecto del estudio de este tipo de organismos es que los patrones que rigen su comportamiento son sumamente complejos y de difícil predicción. Existen diversos ejemplos en los que las relaciones que prueban bondad para un periodo se pierden con el paso del tiempo (Cole and McGlade 1998). Por este motivo, es importante mantener una actitud de mejoramiento permanente; es decir, permitir que el sistema aprenda de la experiencia y buscar la manera de incluir los conocimientos a los sistemas de información conforme se van generando.

2. La sardina del Golfo de California

2.1 Caracterización ambiental del Golfo de California

El Golfo de California (Figura 1) es un mar epicontinental largo y delgado localizado en el noroeste mexicano, rodeado por los Estados de Sonora y Sinaloa al este, y la Península de Baja California al oeste. Es considerado una cuenca semicerrada tanto en el sentido oceanográfico como meteorológico debido a que se encuentra casi totalmente rodeado por elevaciones topográficas y conectado al océano abierto únicamente en su extremo sur (Badán *et al.* 1991). Estas propiedades, junto con el hecho de encontrarse en una zona transicional templado-tropical, resultan en un juego de características atmosféricas, oceanográficas y ecológicas únicas (A6).

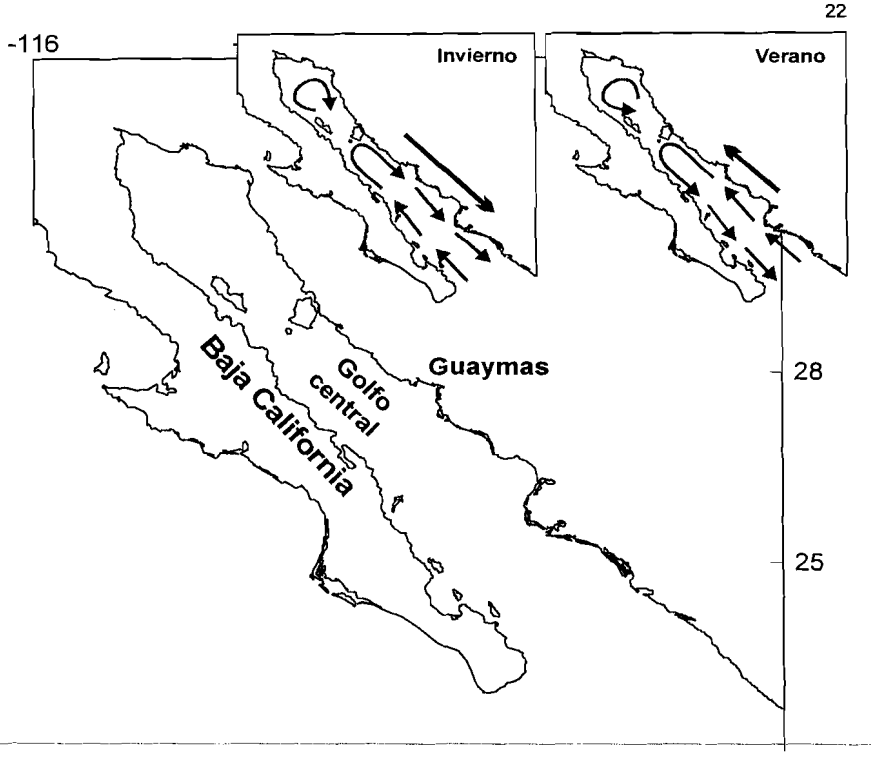

Figura 1. Ubicación del Golfo de California y esquema de condiciones de circulación superficial y vientos durante invierno y verano

El forzamiento atmosférico ha sido idealizado como la interacción de dos condiciones extremas: vientos fuertes del noroeste durante el invierno y vientos débiles en dirección suroeste a sureste durante el verano (Roden 1964). Sin embargo, la variabilidad espacial en la dirección y magnitud de los vientos es aparentemente mayor, especialmente durante la condición de verano (R1).

La circulación superficial en el Golfo resulta de la interacción entre la forma de la cuenca y las fuentes de forzamiento como viento, influencia oceánica de origen tropical (ondas Kelvin costeras), intercambio de calor y efecto de mareas. Algunos resultados recientes de modelación (Beier 1997, com. pers. A. Parés-Sierra, CICESE, México) han demostrado la dominancia de un giro anticiclónico durante el invierno y ciclónico durante el verano hasta la altura de las grandes islas, y una celda de circulación similar en la parte norte (Figura 1). Este patrón general ha sido verificado por cálculos geostróficos, observaciones Lagrangianas y sugerido a partir de imágenes de satélite (Paden *et al.* 1991).

2.2 Sistemas de enriquecimiento

La configuración de masas de agua del Golfo de California permite que se requiera de relativamente poca energía para hacer aflorar aguas someras con altas concentraciones de nutrientes (Alvarez-Borrego and Lara-Lara 1991), lo que resulta en niveles de producción primaria comparables a los de algunas de las regiones oceánicas más productivas del mundo (p.e. Bahía de Bengala, la costa de California y el norte de Africa; Zeitzchel 1969). Sin embargo, el enriquecimiento se presenta de manera heterogénea espacialmente y a lo largo del año. La Figura 2 muestra una regionalización del Golfo propuesta a partir del agrupamiento de patrones anuales de concentración pigmentaria de todos los foteles de la cuenca representados en las

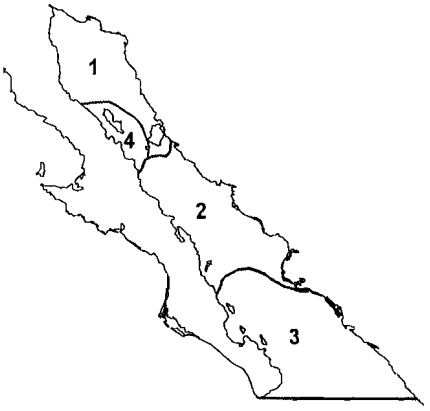

Figura 2. Regionalización del Golfo de California basada en un análisis de conglomerados (k-medias) de patrones anuales de concentración pigmentaria (CZCS) de pixeles individuales (periodo 1978-1986). Modificada de A6.

imágenes del CZCS. Para los fines de la presente sección, cabe resaltar las dos regiones donde se presentan los procesos de enriquecimiento más importantes: la zona de las grandes islas y el área central.

2.2.1 Mezcla en la región de las grandes islas

Análisis de imágenes de satélite (AVHRR) han revelado que en la región de las grandes islas se presentan aguas superficiales más frías que en el resto del Golfo durante todo el año, de manera independiente a la intensidad y dirección del viento (Badán *et al.* 1985). Este patrón resulta de la intensificación de las corrientes de marea por una disminución rápida de la profundidad entre la región de las cuencas profundas (Bray 1988) y la zona de las grandes islas, donde se separan las partes profunda y sornera, aunada a una disminución de la luz de flujo en la horizontal por la presencia de las islas.

Las fuertes corrientes que se generan y las condiciones de fuerte mezcla de la columna de agua resultan en un bombeo contínuo de aguas frías y ricas en nutrientes a la superficie iluminada. Además de su importancia como fuente de nutrientes a la capa fótica, esta zona representa un sitio de refugio para especies de afinidad templado-transicional durante la parte cálida del año, o durante eventos anómalos tipo El Niño (Lluch-Belda *et al.* 1986).

2.2.2 Enriquecimiento en la zona central del Golfo

El patrón de vientos sobre el Golfo de California sugiere el desarrollo de surgencias costeras a lo largo de la costa continental durante el invierno (vientos noroestes) y peninsular durante el verano (surestes). Sin embargo, la existencia de la segunda condición es aún tema de debate (Lavín *et al.* 1997).

Algunas observaciones de imágenes individuales de satélite sugieren que las surgencias de verano se presentan (Badán 1985); sin embargo, también existe la posibilidad de que la incipiente presencia de plumas frías a lo largo de la costa occidental se deba más bien a la advección de aguas mezcladas de la zona del canal de Ballenas (Paden *et al.* 1991). Después de analizar imágenes de satélite de temperatura superficial del mar (AVHRR) mediante funciones empíricas ortogonales, Paden (1990) no encontró evidencias del desarrollo de surgencias de

CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLOGICAS

verano. Resultados similares se obtuvieron de un procesamiento equivalente utilizando imágenes de pigmentos (CZCS; R1).

Si bien la intención de este trabajo no es resolver si existen o no surgencias de verano, es importante reconocer algunas de las posibles razones por las que se presenta esta asimetría entre costas: a) la circulación superficial es ciclónica en el verano y anticiclónica en el invierno, es decir, que el sentido de las corrientes es siempre igual al del viento en la costa continental y opuesto en la costa peninsular; b) la plataforma continental en la costa peninsular es más estrecha que del lado este, lo que dificulta el desarrollo de surgencias tipo Ekman; c) durante el verano se presenta la mayor intrusión de aguas tropicales y la termoclina se abate, por lo que se requiere de mayor energía para generar surgencias que durante el invierno; d) los vientos de verano son más débiles que los de invierno, y su sentido es menos constante. En cualquier caso, es claro que no se trata de una característica regular en el Golfo, o al menos no representa una fuente importante de enriquecimiento biológico, mientras que las surgencias de invierno determinan mayormente el comportamiento de la región central (R1).

A pesar de la importancia de los índices de surgencia para el estudio de la circulación del océano, la variabilidad ambiental y las relaciones entre el ambiente y recursos pesqueros[6], no existía hasta antes de este trabajo un indicador de este proceso en el Golfo de California, ni forma de evaluar su variabilidad a diferentes escalas temporales. Por este motivo, uno de los productos de este trabajo es la estimación de un índice de surgencias, el análisis de la serie resultante y su uso en el estudio del hábitat reproductivo de la sardina.

2.2.3 Indice de surgencias

Se calculó un índice de surgencias para la costa continental del Golfo central siguiendo la metodología de Bakun (1972), pero utilizando registros diarios de

[6] Específicamente en el caso del Golfo, desde hace tiempo se reconoce la importancia de las surgencias como modulador de la actividad reproductiva de los pelágicos menores, pero no ha sido posible profundizar en el estudio de dichas relaciones por la falta de información ambiental.

vientos en la estación de Empalme, Sonora, México para el periodo 1970 a 1997[7]. La serie resultante se relacionó significativamente con los valores mensuales de concentración pigmentaria promedio para la región central mediante un modelo exponencial (Figura 3, modificada de R3).

A escala estacional, existe coherencia entre los patrones de surgencias, concentración de pigmentos y temperatura superficial del mar tanto en el tiempo como en la distribución espacial (R1). Interanualmente, el hecho más relevante es que la señal de surgencias por viento no presenta una relación clara con indicadores de actividad tropical. Esto puede deberse a que, a pesar de que no se presenta un cambio importante en las condiciones de viento durante eventos ENSO, si se da una fuerte invasión de masas de agua del Pacífico Tropical Oriental y agua subtropical subsuperficial, lo que resulta en que la termoclina se ubique más profunda de lo normal y el enriquecimiento biológico sea menos eficiente (A4); Esto sugiere que en la región del Golfo de California, los efectos más directos del ENSO son vía oceánica, como ondas Kelvin, y no atmosférica, como teleconecciones atmosféricas y cambios en los campos de presión (R1). También implica que es importante considerar indicadores ambientales independientes al viento (p.e. tempertatura) si se pretende abordar esta escala de variabilidad.

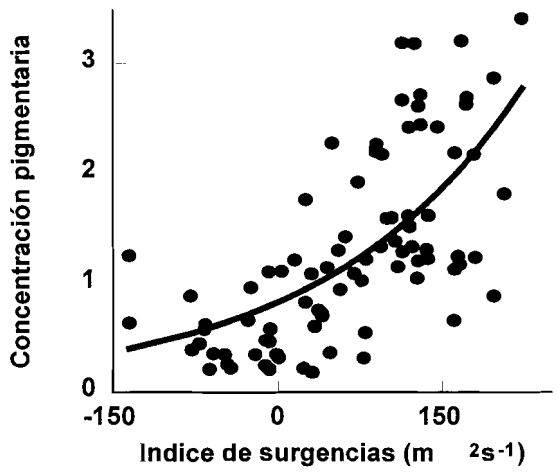

Figura 3. Modelo exponencial relacionando el índice de surgencias calculado con el promedio de concentración pigmentaria para el Golfo Central.

2.3 La sardina del Golfo de California

En México, la pesquería de pelágicos menores es la más importante en

[7]El índice de surgencias de Bakun (1972) se calcula a partir de transporte geostrófico, utilizando como datos primarios campos de presión atmosférica.

términos de número y peso, llegando a contribuir con más del 40% del peso total de la captura de recursos marinos (Anónimo 1990). La mayor parte de la extracción es desembarcada en el puerto de Guaymas, Son. (Lluch-Belda *et al.* 1986, Cisneros-Mata *et al.* 1995) dentro del Golfo. A pesar de que se trata de una pesquería multiespecífica (Lluch-Belda *et al.* 1995), la especie mejor estudiada y de mayor importancia en captura y preferencia es la sardina del Pacífico (*Sardinops sagax*). Consecuentemente, las mayores fluctuaciones en las capturas totales han resultado de cambios en ésta (Nevárez-Martínez 1990, A8).

A diferencia de otras regiones donde se presentan este tipo de recursos (p.e. las costas de California-Baja California, Chile-Perú, Benguela, Japón, etc.), el Golfo es una cuenca semicerrada, por lo que la advección hacia afuera de la costa está limitada por la presencia de la península y se facilita la formación de giros de concentración hacia el centro del Golfo (R3). Ademas, está regido por una fuerte señal estacional tanto en la intensidad de los vientos y la circulación superficial como en su sentido.

Otra diferencia importante, sobre todo respecto de la Corriente de California, es que el Golfo representa el límite cálido (tropical) de distribución de la sardina del Pacífico nororiental (Lluch-Belda *et al.* 1995). Esto provoca que durante el verano, cuando intruyen al Golfo aguas tropicales de elevada temperatura y baja concentración de nutrientes, la sardina restrinja su distribución a las cercanías de las grandes islas, mientras que durante el invierno el enfriamiento estacional, aunado al efecto de surgencias a lo largo de la costa continental, permite a la sardina ocupar casi todo el Golfo y desovar (Lluch-Belda *et al.* 1986, Hammann *et al.* 1998). La forma de la cuenca (cerrada al norte) y por la forma en que se distribuye la sardina en el Golfo (restringida a las grandes islas durante la época cálida), es posible que en esta zona la sardina sea más susceptible a eventos de tropicalización en comparación a la costa abierta, ya que le resulta imposible realizar movimientios latitudinales compensatorios.

2.3.1 Variabilidad de baja frecuencia (interdecadal)

La pesquería de sardina del Golfo de California inició su crecimiento durante los 1970s y alcanzó sus máximos niveles en 1988-89. Entre esa temporada récord y el promedio de los últimos años (1994-95 a 1997-98), las capturas se han

sostenido en niveles superiores al 50% del máximo. Sin embargo, entre el periodo de máximas capturas y los años recientes se presentaron tanto un colapso dramático (disminución de más del 97% respecto del máximo histórico en sólo tres temporadas) como una recuperación rápida (de 2 a 57% respecto del máximo histórico en dos años). Por su escala temporal, esta fuerte señal interanual parece estar más relacionada con variabilidad interanual de origen tropical.

A pesar de dicha señal, la baja frecuencia de la serie de capturas del Golfo muestra correspondencia con otras pesquerías de pelágicos menores de regiones distantes, como lo demuestra la coherencia con la serie indicadora del régimen (RIS[8], por sus siglas en inglés). De hecho, la similitud entre la serie del Golfo y el RIS es significativa e incluso mayor que la de otros sistemas típicamente reconocidos como sincrónicos (Tabla 1).

Tabla 1. Coeficientes de correlación entre capturas de sardina y anchoveta y la RIS (1970-1996). Reproducidos de A10.

Sistema	Especie	Correlación $p<0.05$
California (biomasa)	Sardina	-0.12
Humboldt	Sardina	*0.95*
Japón	Sardina	*0.92*
Benguela	Anchoveta	0.34
California (biomasa)	Anchoveta	-0.33
Humboldt	Anchoveta	*-0.59*
Japón	Anchoveta	*-0.70*
Benguela	Sardina	*-0.84*
Golfo de California	Sardina	*0.62*
California+Golfo de California	Sardina	*0.57*

La sincronía entre las series de los principales sistemas donde se capturan estos recursos ha sido bien documentada (Kawasaki 1991, Lluch-Belda *et al.* 1989, 1992). Sin embargo, existen algunas inconsistencias al patrón general, en especial en la serie de la sardina de California sin considerar la del Golfo de California. De mediados de los 1970s en adelante, las capturas de sardina se incrementaron en Japón y Humboldt, al igual que la anchoveta de Benguela; sin embargo, tanto los niveles de captura, como las estimaciones de biomasa de la sardina de California

[8] RIS: Serie indicadora del Régimen. Calculada como la diferencia entre la suma de las capturas estandarizadas de sardina en los sistemas de California, Japón, Humboldt, Canarias, y anchoveta de Benguela, menos las de anchoveta de California, Japón, Humboldt, Canarias y sardina de Benguela (A1). En octubre de 1997, durante el último taller de trabajo del SCORWG98, se recalculó mediante métodos multivariados, resultando en básicamente la misma forma (A3).

empezaron a mostrar síntomas de incremento hasta los 1980s y nunca alcanzaron proporciones comparables a aquellas de los 1940s. Durante talleres de trabajo del Grupo SCORWG98 (A3) se han planteado una serie de hipótesis para tratar de explicar este comportamiento, desde cambios de fase respecto del resto de los sistemas hasta que se trataba de consecuencias de la enorme presión de pesca impuesta en los 1940s. Cuando se reconstruye el ejercicio practicado por Kawasaki a principios de los 1980s (Kawasaki 1983), y se incluye, como él lo hizo, todas las capturas de sardina del Pacífico Nororiental desde Columbia Británica hasta el Golfo de California, la forma de la curva vuelve a sugerir una clara sincronía (A10).

Tradicionalmente se reconocen tres stocks de sardina en el Pacífico Nororiental, dos en la costa pacífica (del norte de Baja California hasta Alaska y la parte sur de Baja California) y uno separado en el Golfo de California. Esta diferenciación de stocks es congruente con el hecho de que el Golfo se encuentra separado de la Corriente de California por la península que intruye la zona tropical, por lo que el intercambio de especies templadas parece difícil. Sin embargo, existen evidencias indirectas que apuntan a que, al menos en términos de variabilidad en la escala del Régimen, la sardina de California y del Golfo de California deben considerarse juntas (A10).

A nivel genético no existen diferencias importantes entre las sardinas del Golfo de California, de Baja California y de más al norte (Hedgecock *et al.* 1989), lo que sugiere que existe intercambio genético entre stocks. Por otro lado, comparaciones de registros paleoecológicos de la cuenca de Guaymas y el sur de California sugieren cambios de distribución entre estas zonas a escalas temporales de varias décadas (Holmgren and Baumgartner 1993). Finalmente, a pesar del aislamiento entre las dos regiones y a las fuertes diferencias ambientales que existen tanto en condiciones térmicas como en los patrones de circulación de vientos y corrientes oceánicas, existen similitudes respecto del hábitat reproductivo entre los stocks de California y el Golfo de California (Hammann *et al.* 1998, A11).

2.3.2 Variabilidad de alta frecuencia (interanual)

Si bien en la mayoría de los casos la frecuencia interdecadal representa la escala de variación mas importante en términos de planeación regional, en el Golfo de California las enormes fluctuaciones relacionadas a la baja frecuencia (ENSO)

en combinación con las características de la industria en la zona han generado problemas importantes[9].

Las altas temperaturas y los bajos niveles de producción biológica asociados a los efectos oceánicos del ENSO en el Golfo de California ocasionan que la sardina disminuya, e incluso suspenda, su movimiento anual hacia el sur (la región central) y permanezca en las inmediaciones de las grandes islas durante el invierno (Lluch-Belda *et al.* 1986, Huato-Soberanis and Lluch-Belda 1997, A5). Esto resulta en fuertes decrementos en los niveles de captura, disminución de la actividad reproductiva y la generación de clases anuales débiles.

Durante este tipo de eventos, la fuerte caída en las capturas de sardina del Pacífico en el Golfo de California se ve hasta cierto punto mitigada por aumento en las capturas de otros pelágicos menores, como la sardina crinuda de afinidad tropical (Lluch-Belda *et al.* 1986) y la anchoveta (Cisneros-Mata *et al.* 1987, Cisneros-Mata *et al.* 1991). Por este motivo, parte de la industria (la dedicada a la elaboración de harinas) no es tan afectada a esta escala de variación; sin embargo, la mayor parte de los problemas sociales y económicos se asocian más a la industria del procesamiento (enlatadoras) que presentan una clara preferencia por la sardina del Pacífico (com. pers. M.O. Nevárez-Martínez. CRIP-INP Guaymas, México).

[9] El colapso pesquero de 1989-90 provocó severos daños económicos y sociales incluyendo la pérdida de más de 3,000 empleos directos, y cerca de la mitad de la flota y la capacidad instalada para procesamiento (Cisneros-Mata *et al.* 1995).

3. Propuesta de bases para un sistema de información ambiental para la pesquería de sardina del Golfo de California

Esta contribución pretende aportar elementos para un adecuado esquema de manejo mediante la propuesta de implementación de un sistema de información ambiental para la pesquería, basado en el estudio de los mecanismos mediante los cuales el ambiente produce variaciones en el reclutamiento. En el proceso, el caso de estudio permitió contribuir al desarrollo de propuestas metodológicas de aplicación para otras regiones del océano mundial, y al desarrollo de conocimientos de valor para otros recursos de la zona.

La pesquería de sardina del Golfo de California representa un excelente caso de estudio para el diseño de sistemas de información ambiental y la búsqueda de relaciones entre ambiente y procesos biológicos, gracias a la combinación de ciertas características: El tamaño y configuración del Golfo permite la aplicación de modelos de circulación (Ripa 1997), se encuentra libre de nubosidad gran parte del año por lo que la tecnología satelital es especialmente útil (Badán *et al.* 1985), y existe un monto importante de información respecto de las características ambientales y la biología básica del recurso (Nevárez-Martínez 1990).

Otra propiedad importante es la historia misma de la pesquería. A pesar de ser una actividad relativamente reciente, en los últimos 15 años se han presentado fuertes fluctuaciones que resultaron en importantes problemas para la industria y las medidas de manejo, pero para nosotros representa un buen caso de estudio para explorar las capacidades de pronóstico y detección temprana de estas variaciones (R3).

3.1 Procesos determinantes, fuentes de estrés ambiental y mecanismos de interacción

En el caso de la sardina del Golfo, y sobre la base de la información con que se cuenta, es difícil diferenciar entre las etapas del reclutamiento y determinar cual de ellas es la fuente de mayor variabilidad (magnitud del desove o supervivencia en estadios tempranos). Lo que es claro es que durante la migración al sur en invierno los organismos están influidos por el ambiente. En el presente trabajo, el

análisis permite determinar disponibilidad de hábitat reproductivo que, si bien no ofrece una respuesta fina respecto de los mecanismos que operan, permite calcular en el tiempo un indicador que hasta cierto punto resume la variabilidad de las etapas de desove y desarrollo temprano.

La temperatura ha sido ampliamente reconocida como una fuerza de restricción del área que ocupan los adultos para el desove (Lluch-Belda *et al.* 1986). Hammann *et al.* (1998) infirieron el hábitat de desove en temperatura para la sardina del Golfo a partir de distribución de huevos y larvas obtenida en cruceros oceanográficos, y las temperaturas superficiales asociadas al muestreo. Los resultados de un ajuste polinomial mostraron una relación en forma de campana donde los niveles óptimos de temperatura se encuentran alrededor de los 18.9°C ± 1.9°C. Resultados similares fueron reproducidos posteriormente considerando temperaturas superficiales de baja resolución obtenidas de una base pública (A9, utilizando datos de la base Reynolds and Smith 1994).

Respecto a los procesos derivados de viento, la Figura 4 muestra un esquema idealizado sobre la operación de la hipótesis de triada fundamental de Bakun (1996) en el caso particular del Golfo. La mezcla vertical por corrientes de marea en la región del Canal de Ballenas resulta en altos niveles de turbulencia inapropiados para la reproducción de la sardina (ver Lasker and MacCall 1983). Sin embargo, está asociada a una exportación de aguas ricas en nutrientes hacia las zonas circundantes donde las condiciones de estabilidad permiten altos niveles de florecimiento fitoplanctónico. Durante el invierno, cuando el viento noroeste sopla paralelo a la costa, se presenta enriquecimiento adicional por surgencias costeras a lo largo del margen continental del Golfo. Las aguas enriquecidas de ambos sistemas de bombeo son llevadas hacia el sur a lo largo de la costa de Sonora por las corrientes superficiales dominantes y hacia la costa peninsular por transporte de Ekman. En

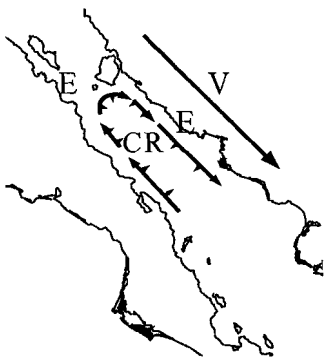

Figura 4. Sistema de triada propuesto para la sardina del Golfo de California. E: enriquecimiento, CR: concentración y retención. V: dirección del viento. Modificado de R2.

la región central, se presentan condiciones de baja dinámica, propicias para la reproducción de sardina gracias a los altos niveles de concentración de alimento, alta estabilidad de la columna de agua, y retención de larvas.

Con la idea de no asumir una forma de la relación entre los procesos derivados de viento y el reclutamiento, se realizó una exploración mediante la aplicación de transformaciones empíricas no lineales entre dos predictores: el número de adultos desovantes y el índice de surgencias por viento para la región central del Golfo como un indicador grueso de los procesos derivados de viento (circulación, transporte, enriquecimiento, turbulencia, etc.), y una serie de reclutamiento (número de reclutas) como variable independiente[10] (A11).

En el caso de la transformación del índice de surgencias, se evidencia una relación en forma de domo con el máximo alrededor de los 100 a 120 m^3s^{-1} (equivalente a entre 5 y 6 ms^{-1} de viento noroeste) . Este resultado es congruente, tanto en forma de la relación como en las magnitudes de viento asociadas al máximo de reclutamiento, con reportes previos para sardinas de otras partes del mundo (Cury and Roy 1989, Serra *et al.* 1998, A2)

3.2 Funciones y modelos

Para explorar la factibilidad de expresar el éxito de un proceso biológico como función de variables ambientales de fácil medición, se construyó un indicador de éxito reproductivo[11] y se relacionó con indicadores ambientales seleccionados; temperatura superficial para un cuadrante de 2°x2° de la zona central del Golfo (Reynolds and Smith 1994) y valores mensuales del índice de surgencias (R1) como un indicador de los procesos derivados de viento. Estas variables cuentan con información histórica confiable y de fácil acceso.

---

[10] Los datos de número de adultos y número de reclutas fueron tomados de Cisneros-Mata *et al.* (1995), y representan una serie de valores anuales entre la temporada de pesca desde 1974-75 y 1987-88. Actualmente, Nevárez-Martínez (tesis doctoral en proceso) se encuentra actualizando y recalculando estos indicadores.

[11] Proporción de estaciones positivas sobre número total de estaciones muestreadas de huevos y larvas para cada uno de los 24 cruceros abarcando el Golfo central entre 1971 y 1987 realizados por el Instituto Nacional de la Pesca y amablemente proporcionados para este trabajo por el M.C. M.O. Nevárez-Martínez.

En la búsqueda de una función que permitiera asumir relaciones no lineales, no forzada simétricamente y con valor predictivo, se diseñó una función doble-logística (R2) donde la probabilidad de éxito se expresa como función de un proceso físico limitante hacia cada extremo de la curva (Figura 5).

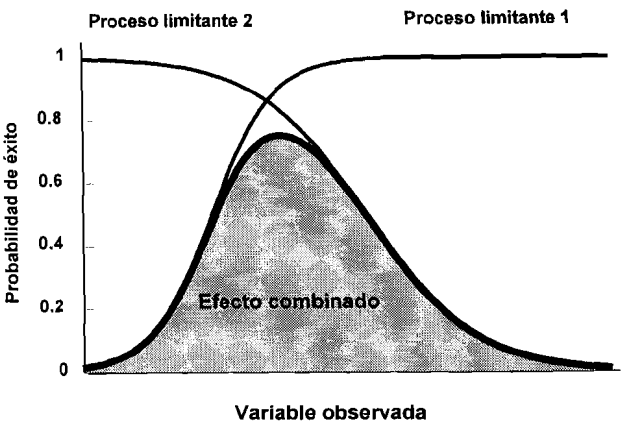

Figura 5. Fundamento teórico de la función

Esta función se ajustó a los valores de temperatura mensual e índice de surgencias correspondientes a cada crucero, y a partir de los parámetros de ajuste se calcularon las series anuales (promedio de noviembre a mayo, la temporada de desove; Hammann *et al.* 1998) de probabilidad de éxito reproductivo a partir de las series originales de temperatura y surgencias, y se compararon con la serie de capturas (R3).

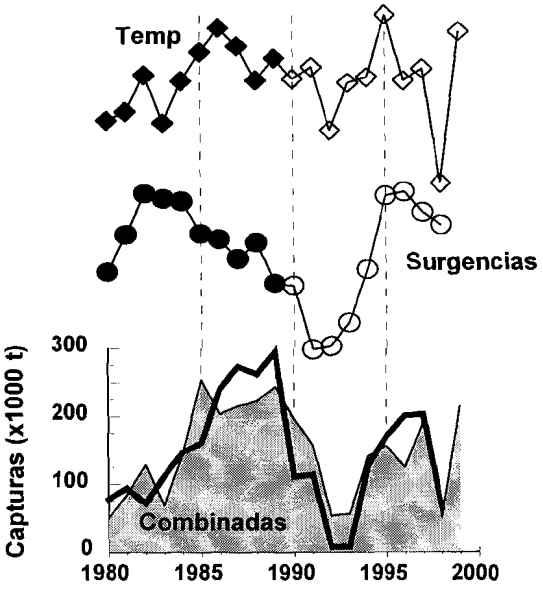

Figura 6. Series de probabilidad de éxito reproductivo en función de temperatura (panel superior), surgencias (panel intermedio) y combinadas (sombreado, panel inferior), y comparación con la serie de capturas.

Se calculó también una serie donde se combinan las funciones de temperatura y surgencias en una sola probabilidad en función del ambiente[12], y se comparó con la serie de capturas (Figura 6, modificada de R3). Las coincidencias son alentadoras, especialmente por la capacidad de predecir el colapso (1990-1993), la recuperación (1993-1997) y el decrecimiento durante

[12] La mejor forma de combinar las series resultó ser el producto de la serie de probabilidad en función de surgencias a tiempo t-1 con la de temperatura a tiempo t.

1997-1998. Además, el último punto predice un incremento en las capturas de 1998-1999, periodo para el cual aún no se cuenta con cifra oficial de capturas, pero observaciones preliminares corroboran este comportamiento (com. pers. M.O. Nevárez-Martínez, CRIP-INP, Guaymas, México).

Vale la pena hacer dos observaciones: primero, que los datos utilizados para la estimación del indicador de éxito reproductivo son independientes de la curva de capturas con que se compara y, segundo, que los datos de cruceros utilizados para ajustar las funciones doble-logísticas abarcan únicamente hasta 1989; es decir, que entre ese año y 1997, periodo en que se presentaron las variaciones más fuertes de toda la serie, el indicador es completamente predictivo.

3.3 Propuesta de sistema de información

Como uno de los productos del presente trabajo, se propone la estructura de un sistema de información basado en las relaciones descritas en la sección anterior. La propuesta es organizar el sistema en tres niveles: la entrada de información respecto a variables ambientales medidas en tiempo casi-real (viento y temperatura), el cálculo de distribución espacio-temporal de indicadores de actividad reproductiva calculados a partir de funciones del ambiente (temperatura, enriquecimiento, retención y concentración), y la integración en un sistema de información geográfica que proporcione un indicador de hábitat reproductivo (Figura 7).

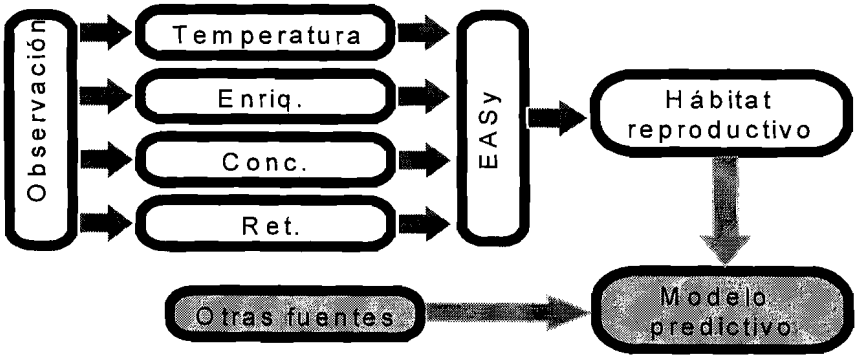

Figura 7. Representación esquemática del sistema de información para la pesquería de sardina del Golfo de California.

De las cuatro variables que considera el sistema (la temperatura y las tres de la triada de Bakun 1996), se prevé que las estimaciones de temperatura y enriquecimiento serán las que se resuelvan más fácilmente mediante la incorporación de datos generados por satélite y el uso de bases disponibles vía Internet. En cambio, la retención y concentración son procesos de muy difícil cuantificación en campo, y para los cuales no existen series de tiempo ni sistemas de monitoreo montados. Para resolver estos puntos, la ruta más factible es el uso de modelación numérica (modelos de circulación) y el cálculo de estadísticas Lagrangianas.

3.3.1 Modelación de concentración y retención

La concentración puede ser estimada a partir de la siembra de partículas en arreglos similares a la distribución de productos de desove observados en campo (p.e. Hammann *et al.* 1998) y registrando la ubicación promedio de dichas particulas después de un cierto tiempo (R3). De manera similar, la retención puede ser estimada como el tiempo que le toma a una partícula salir de una cierta área definida bajo criterios biológicos. Los valores adecuados de tiempo de salida y corrida del modelo deberán ser ajustados sobre la base de la experiencia (A7).

Para este trabajo se ha explorado la utilización de un modelo tipo "S-coordinate Rutgers University Model (SCRUM; Blumberg and Mellor 1987)" implementado para el Golfo por el Dr. Alejandro Parés-Sierra (CICESE, México) con las siguientes características: a) coordenadas sigma, red de 40 x 200 curvilíneas ortogonales en la horizontal (Arakawa C-grid); b) 20 niveles sigma con seguimiento de terreno en la vertical; c) superficie libre (sin fricción perpendicular a la frontera); d) mezcla vertical y difusión a profundidades constantes; e) frontera abierta en el sur (boca del Golfo); f) batimetría realísta; g) forzamiento por viento realista (campos mensuales interpolados a partir de datos COADs) y ondas Kelvin desde el sur (calculadas a partir de nivel medio del mar).

En una primera aproximación, la Figura 8 muestra en un ejemplo de aplicación la distribución de los indicadores ambientales ante dos escenarios de

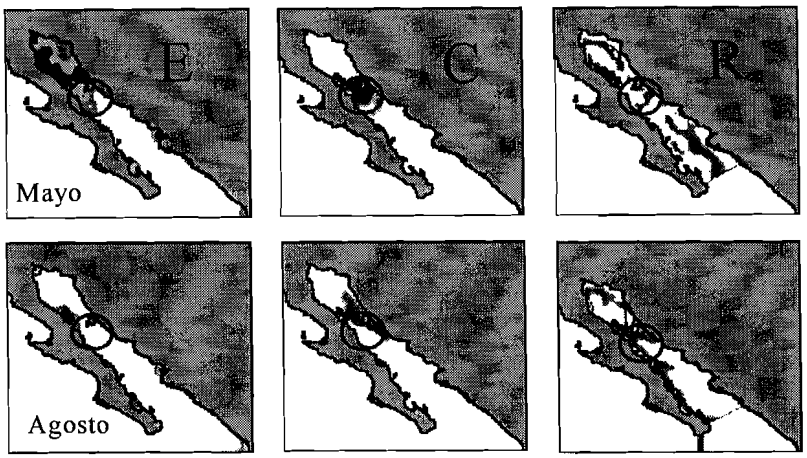

Figura 8. Ejemplo de aplicación del sistema de información y estimación de indicadores ambientales para dos meses del año. E: enriquecimiento, C: concentración, R: retención.

viento: mayo (final de la época de reproducción) y agosto (fuera del periodo reproductivo). Se presenta la distribución del promedio de concentración pigmentaria según los datos del CZCS (enriquecimiento), concentración de partículas a partir de estimaciones lagrangianas utilizando la circulación modelada con los vientos mensuales promedio respectivos (concentración), y retención como la velocidad de escape después de 15 días de circulación. En este ejemplo, los tres indicadores ambientales de la triada se encontraron presentes en el área seleccionada (zona del Golfo donde tiende a presentarse la mayor incidencia de huevos), únicamente durante el mes de mayo.

En un trabajo en curso (A7) se está probando el comportamiento de estos indicadores de los procesos de la triada en el Golfo de California ante diferentes escenarios ambientales (condiciones normales, ENSO, anti-ENSO, régimen climático previo al cambio de 1976 y posterior a 1976). Resultados parciales sugieren que los efectos de la influencia oceánica (onda Kelvin, como una intrusión de aguas tropicales con el consecuente abatimiento de la termoclina) tienen mayor importancia en la alta frecuencia (interanual asociada al ENSO), mientras que los cambios en la circulación atmosférica (dirección y velocidad de los vientos) se manifiestan mayormente en la baja frecuencia (cambios decadales). Las implicaciones de estos resultados para la población de sardina del Golfo son aún

materia de investigación.

3.3.2 Acciones futuras para la implementación del sistema

Una vez incorporados los indicadores de las cuatro variables, se propone la implementación de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la combinación de los resultados en estimados de hábitat reproductivo. Para este fin, una posibilidad es el uso del EASy (Environmental Analysis System), un SIG avanzado en desarrollo por personal de la Universidad del Sur de California y el System Science Applications (Tsontos and Kiefer 1999). Este sistema fue diseñado específicamente para ecosistemas marinos con la idea de incorporar diferentes tipos de información (datos de campo, datos de satélite y resultados de modelación) independientemente de su formato (tabular, textos, gráficas e imáges) y analizarla en una plataforma común multidimensional (tiempo, latitud, longitud y profundidad) mediante algoritmos y modelos predefinidos. Actualmente se está buscando la integración de una base de información ambiental histórica del Golfo de California basada en el uso del EASY como una de las actividades de un Proyecto de Investigación en curso financiado por CONACyT, y se espera contar con una primera versión hacia finales del año 2000 (Lluch-Cota *et al.* 2000).

Por su naturaleza, las capacidades predictivas que pueden llegar a desarrollarse con este sistema se encuentran en el orden de una o dos temporadas de pesca, y las posibilidades de ampliar este horizonte estarán limitadas por la capacidad de predecir el clima. Por su parte, la calidad de las predicciones estará dada por la capacidad de re-ajuste de las funciones conforme se genera nueva información o se incorpore información histórica. Por ejemplo, en un futuro habrá que incluir en el análisis indicadores ambientales de estructura vertical del océano (distribución de alimento en la columna, estabilidad, profundidad de la termoclina, etc.). Finalmente, será importante incorporar y adaptar técnicas de análisis y organización de la información para facilitar la operatibilidad del sistema. Por ejemplo, la aplicación de herramientas de modelación ecológica dinámica (Ware *in press*).

Por otro lado, es claro que el sistema deberá tender a incorporar, además del efecto ambiental sobre el éxito reproductivo, la información y modelos en desarrollo respecto de otras partes de la dinámica poblacional, aspectos pesqueros

y bioeconómicos (p.e. Nevárez-Martínez *et al.* 1999, De Anda *et al.* 1999, De Anda and Seijo 1999, Nevárez-Martínez tesis doctoral en proceso, A8).

Es probable que la experiencia adquirida con este caso de estudio, podrá ser de utilidad para la implementación de sistemas de información ambiental para otros recursos dentro del Golfo de California, y para otras regiones del océano mundial.

4. Resumen de resultados y conclusiones

1. Mediante el agrupamiento (k-medias conglomerados) de los patrones anuales en todos los foteles de concentración pigmentaria (CZCS) dentro del Golfo de California, se muestra que a pesar de los altos niveles de concentración pigmentaria que se presentan en todo el Golfo, el enriquecimiento se distribuye heterogéneamente en tiempo y espacio. Existen dos sistemas principales de enriquecimiento que se reconocen mediante el análisis de agrupamiento: la mezcla por corrientes de marea en la región de las grandes islas y las surgencias costeras de invierno por transporte de Ekman en la costa continental del Golfo. Las surgencias de invierno pueden ser consideradas como el proceso controlador de la producción biológica en el Golfo central.

2. Se estimó un índice de surgencias para el Golfo central a partir de registros de viento local, y se analizó su variabilidad a diferentes escalas de tiempo. Los resultados mostraron coherencia entre el índice de surgencias y el comportamiento anual de concentración pigmentaria y la temperatura superficial promedio para la región central. Interanualmente (señal ENSO), la relación del índice con la concentración pigmentaria es de la misma forma (exponencial), pero los valores de pigmentos son menores. Esto sugiere que los efectos más importantes del ENSO en el Golfo de California resultan de la influencia oceánica (onda Kelvin), más que de alteraciones atmosféricas (teleconecciones).

3. La comparación de las series de captura de sardina del Golfo de California con aquellas de otros sistemas alrededor del mundo, y la serie indicadora del régimen (RIS), sugiere que la sardina del Golfo se encuentra en sincronía con la señal del régimen. Más aún, se concluye que a pesar de que frecuentemente se considera al sistema de sardina del Golfo como independiente del resto del Pacífico nororiental, deben ser considerados juntos cuando se analiza esta escala de variación. A escala interanual, se considera que las altas temperaturas y bajos niveles de enriquecimiento asociados al ENSO son las fuentes de variación de biomasa y distribución más importantes y los efectos son aparentemente más dramáticos que en otros sistemas de pelágicos menores, debido tanto a que el Golfo de

California representa el límite cálido de distribución de la sardina del Pacífico nororiental, como a que por la forma de la cuenca no es posible realizar movimientos latitudinales compensatorios.

4. Se concluye que la pesquería de sardina del Golfo de California representa un excelente caso de estudio para la búsqueda de mecanismos de interacción ambiente-recurso y el desarrollo de sistemas de información ambiental para la pesquería, gracias a la combinación de una serie de características como la factibilidad de desarrollar modelos de circulación, el uso de sensoría remota, la cantidad de información ambiental y biológica disponible y la historia de fuertes fluctuaciones en la pesquería.

5. Se considera a la temperatura del mar y los procesos de la triada (enriquecimiento, concentración y retención) como las variables de mayor importancia controlando el éxito reproductivo de la sardina en la región central del Golfo de California.

6. La relación con temperatura fue investigada contrastando resultados publicados por otros autores, donde se expresa la proporción de estaciones positivas para huevos y larvas como función de la temperatura (mediciones asociadas), con resultados de este trabajo basados en bases públicas de datos de baja resolución espacial. Se encontró una relación en forma de campana irregular entre la probabilidad de éxito reproductivo y la temperatura.

7. Sobre la base de descripciones generales del patrón de circulación oceánica superficial y la dinámica reproductiva de la sardina en el Golfo, se propone un modelo teórico para el funcionamiento de la triada fundamental *sensu* Bakun (1996). En este modelo, la región central se presenta como la zona más favorable para la reproducción de la sardina gracias a la coincidencia de disponibilidad de alimento, y estructuras oceanográficas que favorecen la concentración de partículas y retención de huevos y larvas.

8. Para evitar asumir formas de la relación entre los procesos biológicos y las variables físicas, se realizó un análisis exploratorio basado en transformaciones empíricas no lineales de un indicador de reclutamiento (a

predecir), abundancia de adultos y el índice de surgencias (predictores). Los resultados son coherentes con reportes para otras regiones del planeta, tanto en la forma de la relación (campana) como en los valores de viento asociados a los valores máximos de reclutamiento (5 a 6 m^2s^1).

9. Para reproducir la forma no-lineal de la relación (campana), sin forzar simetría, y con la intención de ganar capacidad de modelación y pronóstico, se diseñó una función doble-logística y se ajustó a los valores observados para expresar la probabilidad de éxito reproductivo (estaciones positivas) como función de las variables físicas (temperatura e índice de surgencias). A partir de estos modelos se reconstruyeron series de probabilidad de éxito reproductivo en función de las variables ambientales y se compararon empíricamente con la serie de capturas. Los resultados muestran capacidad predictiva especialmente durante eventos extremos (colapso y recuperación). Estos resultados son especialmente significativos dado que los datos utilizados para los ajustes son independientes de la pesquería. Más aún, los cruceros considerados en el análisis cubren el periodo 1971 a 1989, por lo que entre 1989 y 1997 (el periodo con las fluctuaciones más importantes), el índice es completamente predictivo.

10. Se propone la estructura de un sistema de información ambiental para la pesquería de sardina del Golfo de California sobre la base de los resultados antes descritos, y estructurado en tres niveles de información: la entrada de datos en tiempo casi-real (temperatura, viento, información derivada de satélites, etc.), la distribución en tiempo y espacio de los indicadores ambientales de temperatura y los procesos de la triada, y la integración mediante un Sistema de Información Geográfica.

11. Se concluye que los indicadores de temperatura y enriquecimiento pueden ser resueltos mediante la incorporación de información satelital, y se aplica especial énfasis a la estimación de concentración y retención. Con este fin, se combinan las capacidades de un modelo de circulación oceánica implementado para el Golfo de California y forzado con campos de variables casi-reales, con la aplicación de modelos Lagrangianos y estadísticas de transporte (concentración) y velocidad de escape (retención).

12. Se presentan resultados parciales de estimación de indicadores de procesos ambientales bajo condiciones de forzamiento ambiental a lo largo del año promedio. Estos resultados muestran que únicamente durante la época de reproducción el enriquecimiento (concentración pigmentaria promedio), la concentración y retención (modelados) se combinan en la región central, donde se presentan más intensamente los desoves. También se explora la posibilidad de utilizar estas bases para modelar escenarios ambientales a otras escalas de variación (interanual e interdecadal).

13. Se proporciona una descripción de posibles acciones futuras para desarrollar el sistema de información, como la incorporación del Environmental Analysis System (EASy) como una herramienta de Sistemas de Información Geográfica para integrar los resultados y proporcionar estimaciones de probabilidad de éxito reproductivo. También se reconoce la importancia de incluir en el futuro información sobre otros aspectos de la dinámica poblacional de la sardina del Golfo, información sobre la pesquería, aspectos bio-económicos, etc.

5. Referencias

Alvarez-Borrego, S. and J.R. Lara-Lara. J.R. 1991. Physical environment and primary productivity of the Gulf of California. *In*: Dauphin, J.P. and Simoneit, B.R.T. (Eds), The Gulf and Peninsular Province of the Californias. AAPG Mem 47. p 555-567.

Anónimo. 1990. Anuario estadístico de pesca 1988. *SePesca, Dir. Gral. de Porgramación e Informática*. México, D.F. 350p

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

Badán-Dangon A., C.E. Dorman, M.A. Merrifield and C.D. Winant. 1991. The lower atmosphere over the Gulf of California. *J. Geophys. Res.* 96: 16877-16896.

Bakun A. 1972, Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946-1971. *NOAATech. Rep.* NMFS SSFR-671. 103 pp.

Bakun, A. 1996. Patterns in the Ocean: Ocean Processes and Marine Population Dynamics. *University of California Sea Grant, San Diego, California, USA in cooperation with Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste*, La Paz, Baja California Sur, México. 323 pp.

Bakun, A. 1997. Radical interdecadal stock variability: recent bane but potential boon to scientific fisheries management. *In*: Pitcher, T.J., P.J. Haret and D. Pauly (eds). Reinventing fisheries management. *Chapman and Hall.*

Bakun, A. 1998. The CEOS comparative analysis framework: motivations and perceived opportunities. *In*: Durand, M., P. Cury, R. Mendelssohn, C. Roy, A. Bakun and D. Pauly (Eds). Global versus local changes in upwelling systems. *ORSTOM editions*. Paris, p 6-23.

Bakun, A., P. Cury, M.H. Durand, R. Mendelssohn, D. Pauly and C. Roy. 1998. The

Climate and Eastern Ocean Systems Project (CEOS). *In*: Durand, M., P. Cury, R. Mendelssohn, C. Roy, A. Bakun and D. Pauly (Eds). Global versus local changes in upwelling systems. *ORSTOM editions*. Paris, p 1-5.

Baumgartner, T., A. Soutar and V. Ferreira-Bartrina. 1992. Reconstruction of the history of pacific sardine and northern anchovy populations over the past two millennia from sediments of the Santa Barbara Basin, California. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 33:24-40.

Bautista-Romero, J.J. 1997. Distribución del desove de *Scomber japonicus* y *Trachurus symmetricus* en la Corriente de California; patrones generales y su relación con temperatura y surgencia. *Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California Sur.* 55pp.

Beier, E. 1997. A numerical investigation of the annual variability in the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*. 27: 615-632

Beverton, R.J.H. 1983. Science and decision-making in fisheries regulation. *In*: Sharp, G.D. and J. Csirke (eds). Proceedings of the Expert Consultation to Examine Changes in Abundance and Species Composition of Neritic Fish Resources, San José, Costa Rica. *FAO Fish. Rep.* 293(3): 919-938.

Blumberg, A. F., and G.L. Mellor. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *In*: Three-Dimensional Coastal Ocean Model Vol 4. N. Heaps (ed.) *Washington D.C. American Geophysical Union* 208pp.

Bray, N.A. 1988. Water mass formation in the Gulf of California. J. of Geophys. Res. 93(C8): 9223-9240.

Breiman, L. and J.H. Freidman. 1985. Estimating optimal transformations for multiple regression and correlation. *Journal of the Amer. Statis. Assoc.* 80(391): 580-598.

Cisneros-Mata, M.A., J.P. Santos-Molina, J.A. de Anda M., A. Sanchez y J. Estrada G., 1987. Pesquería de sardina en el noroeste de México (1985/86). SePesca, Instituto Nacional de la Pesca. 79 pp.

Cisneros-Mata, M.A., M.O. Nevárez-Martínez, G. Montemayor, J.P. Santos-Molina y R. Morales. 1991. Pesquería de sardina en el Golfo de California 1988/89-1989-90. SePesca, Instituto Nacional de la Pesca. 79 pp.

Cisneros-Mata, M.A., M.O. Nevárez-Martínez and M. G. Hammann. 1995. The rise and fall of the pacific sardine, *Sardinops sagax caeruleus* Girard, in the Gulf of California, Mexico. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 36:136-142

Cole, J. and J. McGlade. 1998. Cupleoid population variability, the environment and satellite imagery in coastal upwelling systems. *Reviews in Fish Biology and Fisheries.* 8:445-471.

Cury, P. and C. Roy. 1989. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46: 670-680

Cushing, D.H. 1975. Marine ecology and fisheries. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press. 278pp

De Anda-Montañez, J.A. and J.C. Seijo. 1999. Bioeconomics of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) fishery in the Gulf of California, Mexico. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 40: 170-178

De Anda-Montañez, J.A., F. Arreguín-Sánchez and S. Martínez-Aguilar. 1999. Length-based growth estimates for Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California, Mexico. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 40: 179-183

Everett, J., Okemwa, E., Regier, H.A., Troadec, J.P., Krovnin, A. and Lluch-Belda, D. 1996. Fisheries. *In*: Watson, R.J., Zinyowera, M.C., Moss, R.H. and Dokken, D.J. (Eds). Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigations of Climate Change: Scientific-technical Analyses. Contribution of Working Group II to the second Assessment Report of the Intergovermental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. p 511-537

Faure, V. y P. Cury. 1998. Pelagic fisheries and environmental constraints in upwelling areas: how much is possible. *In*: Durand, M.H., P. Cury, R. Mendelssohn, C. Roy, A. Bakun and D. Pauly (eds.). Global versus local changes in upwelling

systems. ORSTOM Éditions. p. 391-407.

Hammann, G.M., M.O. Nevárez-Martínez and Y. Green-Ruíz. 1998. Spawning habitat of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California: egg and larval distribution 1956-1957 and 1971-1991. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 39:169-179

Hedgcock, D., Hutchinson, E.S., Li, G., Sly, F.L. and Nelson, K. 1989. Genetic and morphometric variation in the Pacific sardine *Sardinops sagax caerulea*; comparison and contrast with historical data with variability in the northern anchovy, *Engraulis mordax*. *Fish. Bull.* 87:652-671.

Hilborn, R. and M. Mangel. 1997. The ecological detective: Confronting models with data. Princeton Univ. Press. Princeton, new Jersey. 315pp.

Hjort, J. 1914. Fluctuations in the great fisheries of northern Europe. Rspp. P.-v. Réun. Cons. Perm. Int. Explor. Mer., 20:1-228.

Holmgren-Urba, D. and T.R. Baumgartner. 1993. A 250-year history of pelagic fish abundances from the anaerobic sediments of the Central Gulf of California. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep. 34*:60-68

Huato-Soberanis, L. and D. Lluch-Belda. 1987. Mesoscale cycles in the series of environmental indices related to the sardine fishery in the Gulf of California. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 28:128-134

Kawasaki, T. 1983. Why do some pelagic fishes have wide fluctuations in their numbers? Biological basis of fluctuation from the viewpoint of evolutionary ecology. *FAO Fisheries Rep.* 291. 1065-1080.

Kawasaki, T. 1991. Long term variability in the pelagic fish populations. *In*: Kawasaki, T., Tanaka, S., Toba, Y. and Tanaguchi, A. (Eds), Long-term variability of pelagic fish populations and their environment. Pergamon Press, Oxford. p 47-60.

Kininmonth, W.R. *In press*. The 1997-98 El Niño event: a scientific and technical retrospective. IACCA/WMO/IOC/UNEP/ICS.

Lasker, R. 1975. Field criteria for survival of anchovy larvae: the relation between inshore chlorophyll maximum layers and successful first feeding. Fish. Bull., 73:453-462.

Lasker, R. 1981. Factors contributing to variable recruitment of the north anchovy (*Engraulis mordax*) in the California Current: contrasting years, 1975-1978. Rapp. P.-v. Réun. Cons. Int. Explor. Mer., 178:375-378.

Lasker, R. 1985. What limits clupeoid production? Can J. Fish. Aquat. Sci., 41(Suppl. 1):31-38.

Lasker, R. and A. MacCall. 1983. New ideas on the fluctuations of the cupleoid stocks off California. *In*: Proceedings of the Joint Oceanographic Assembly 1982 General symposia. pp. 110-120

Lavín, M.F., E. Beier and A. Badán. 1997. Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. *In*: Contribuciones a la Oceanografía Física de México. M.F. Lavín (ed.) México: *Monografía UGM* 3:139-169.

Lluch-Belda, D. 1994. On the sources of recruitment variability in small pelagic fishes. North Pacific Marine Science Organization (PICES). Third Annual Meeting. Nemuro, Japón, !5- 24 de octubre de 1994 (Conference).

Lluch-Belda, D., F.J. Magallón and R.A. Schwartzlose. 1986. Large fluctuations in the sardine fishery in the Gulf of California: Possible causes. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 27:136-140

Lluch-Belda, D. R.M.J. Crawford, T. Kawasaki, A.D. MacCall, R.H. Parrish, R.A. Schwartzlose, and P.E. Smith. 1989. World-wide fluctuations of sardine and anchovy stocks: The regime problem. *S. Afr. J. Mar. Sci.*, 8:195-205.

Lluch-Belda, D. S. Hernández-Vázquez and R.A. Schwartzlose. 1991. A Hypothetical model for the fluctuations of the California sardine population (*Sardinops sagax caerulea*). *In*: Kawasaky, T. S. Tanaka, Y. Toba and A. Taniguchi (eds). Long term variability of pelagic fish populations and their environment. *Pergamon Press*. 293-300.

Lluch-Belda, D., S. Hernández-Vázquez, D.B. Lluch-Cota, C.A. Salinas-Zavala y R.A. Schwartzlose. 1992a. The recovery of the California sardine as related to global change. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.*, 33:50-59.

Lluch-Belda, D., D.B. Lluch-Cota, S. Hernández-Vázquez y C.A. Salinas-Zavala. 1992b. Sardine population expansion in eastern boundary systems of the Pacific ocean as related to sea surface temperature. *In*: Payne, A.J.L., K.H. Brink, K.H. Mann y R. Hilborn (Eds.) Benguela trophic functioning. *S. Afr. J. Mar. Sci.*, 12:147-155.

Lluch-Belda D., Schwartzlose, R.A., Serra, R., Parrish, R.H., Kawasaky, T., Hedgecock, D. and Crawford, R.M.J. 1992c. Sardine and anchovy regime fluctuations of abundance in four regions of the world oceans: a workshop report. *Fish. Ocean.*, 1(4):339-347.

Lluch-Belda D., J. Arvizu, T. Baumgartner, A. Cota, C.E. Cotero, W. García, Y.A. Green, G. Hammann, S.Hernández, S. Lizarraga, D.B. Lluch, M.A. Martínez, R. Morales, M.O. Nevárez, R.I. Ochoa, F. Páez, O. Pedrín, R. Rodríguez, CA. Salinas, P. Santos y J.R. Torres. 1995. Situación actual de la pesquería de sardina y anchoveta. Libro conmemorativo de XXV aniversario del Instituto Nacional de la Pesca, SePesca; CD-ROM publicado por INP/SePesca; México, D.F.

Lluch-Cota, S.E., J.J. Bautista Romero, C. Pacheco-Ayub y D.B. Lluch-Cota. 2000. Proyecto CONACyT R-29374B: Sistemas de análisis ambiental para regiones productivas del Pacífico mexicano. *Resumen enviado al Primer Congreso de Responsables de Proyectos del Comité de Ciencias Aplicadas en el área biológica del CONACyT. Acapulco, Gro. México. Marzo 12-17 2000.*

May, R.C. 1974. Larval Mortality in marine fishes and the critical period concept. *In*: Blaxter, H.S. (Ed.). The Early life history of fish. *Springer-Verlag. Berlin*: 3-19.

MacCall, A. 1990. Dynamic geography of marine fish populations. University of Washington Press. Washington, USA. 153pp.

MacCall, A.D. 1996. Patterns of low-frequency variability in fish populations of the California Current. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 37:100-110.

Mann, M.E., R.S. Bradley and M.K. Hughes. *In press.* Long-term variability in the El Nino Southern Oscillation and Associated Teleconnections. *In*: Diaz, H.F. and Markgraf, V. (eds) El Niño and the Southern Oscillation: Multiscale Variability and its Impacts on Natural Ecosystems and Society.

Nevárez-Martínez, M.O. 1990. Producción de huevos de la sardina monterrey (*Sardinops sagax caeruleus)* en el Golfo de California: una evaluación y crítica. *MS CICESE.* Ensenada, B.C., México. 144pp.

Nevárez-Martínez, M.O., E.A. Chávez, M.A. Cisneros-Mata and D. Lluch-Belda. 1999. Modeling of the Pacific sardine *Sardinops caeruleus* fishery of the Gulf of California, Mexico. *Fisheries Research*, 41: 273-283.

Odum, E.P. 1972. Ecología. Nueva Editorial Interamericana. México.639pp.

Paden, C.A. 1990. Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California. *Dissertation, Univ. Calif., San Diego.* 87 pp.

Paden C., M.R. Abbott and C.D. Winant. 1991. Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California 1. Sea surface temperature variability. *J. Geophys. Res., 96*: 18337-18359.

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. *In*: Sharp, G.D. and J. Csirke (eds). Proceedings of the Expert Consultation to Examine Changes in Abundance and Species Composition of Neritic Fish Resources, San José, Costa Rica. *FAO Fish. Rep.* 293(3): 731-777.

Peterman, R.M. y M.J. Bradford. 1987. Wind speed and mortality rate of a marine fish, the northern anchovy (*Engraulis mordax*). *Science*, 235:354-356.

Reynolds, R. W. and T. M. Smith. 1994. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *J. Climate*, 7:929-948

Ripa, P. 1997. Toward a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California. *J. Phys. Ocean.* 27: 597-614

Roden, G.I. 1964. Oceanographic aspects of the Gulf of California. *In*: Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium. *Memories American Association of Petrology Geological.* 3:30-58

Roy, C. and R. Mendelssohn. 1994. COADS on CD-ROM Vol5. Eastern Pacific. Surface Marine Observations database. *NOAA/CEOS/ORSTOM.* CD-ROM.

Roy, C., P. Cury and S. Kifani. 1992. Pelagic fish reproductive success and reproductive strategy in upwelling areas: environmental compromises. In: A.I.L. Payne, K.H. Brink, K.H.

Serra, R., P. Cury and C. Roy. 1998. The recruitment of the Chilean sardine (*Sardinops sagax*) and the "Optimal Environmental Window". *In*: Durand, M., P. Cury, R. Mendelssohn, C. Roy, A. Bakun and D. Pauly (Eds). Global versus local changes in upwelling systems. *ORSTOM editions.* Paris, p 267-273.

Soutar, A. and J.D. Issacs. 1974. Abundance of pelagic fish during the 19th and 20th centuries as recorded in anaerobic sediment off the Californias. *Fish Bull.* 72: 257-273.

Ware, D. *In press.* Aquatic Ecosystems: Properties and Models. In: Fisheries Oceanography: A Science for the new Millenium.

Watanabe, Y., H. Zenitani y R. Kimura. 1996. Offshore expansion of spawning of the japanese sardine, *Sardinops melanostictus*, and its implications for egg and larval survival. *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, 53:55-61.

Watanabe, Y., H. Zenitani y R. Kimura. 1997. Variations in spawning ground area and egg density of the japanese sardine in Pacific coastal and oceanic waters. *Fish. Oceanogr.*, 6:35-40.

Zeitzchel, B. 1969. Primary productivity in the Gulf of California. *Mar. Biol.* 3:201-207.