

Universidad de Concepción

Escuela de Graduados

Doctorado en Oceanografía



Preservación del registro de escamas de peces en sedimentos del margen continental Chile-
Perú y su utilidad en reconstrucciones paleo-ecológicas

Javier A. Díaz Ochoa

Concepción, Chile, abril de 2008

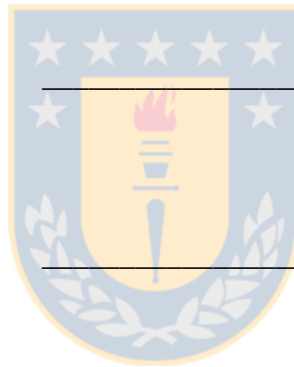
Universidad de Concepción

Escuela de Graduados

La Tesis Doctoral en Oceanografía “Preservación del registro de escamas de peces en sedimentos del margen continental Chile-Perú y su utilidad en reconstrucciones paleo-ecológicas”, realizada en el Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, ha sido aprobada por la siguiente Comisión de Evaluación:

Dra. Carina B Lange
Supervisora de Tesis
Universidad de Concepción

Dr. Silvio Pantoja G.
Miembro del Comité de Tesis
Universidad de Concepción



Dr. Renato Quiñones B.
Miembro del Comité de Tesis
Universidad de Concepción

Dr. Eleuterio Yáñez
Evaluador Externo
Universidad Católica de Valparaíso

Dr. Wolfgang Schneider
Director de Programa
Universidad de Concepción

Concepción, abril de 2008

A Gloria, Sonnia, Raúl y Raúl F., los faros en mi ruta



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Agradecimientos	i
Curriculum Vitae	iii
Resumen	vii
Abstract.....	ix
Capítulo 1.- Introducción.....	11
1.1. Sistemas de límite oriental, cambio climático y recursos pesqueros.....	12
1.2. Hidrografía del sistema de la Corriente Perú-Chile.....	19
1.3. Restos de peces en el registro sedimentario	21
1.4. Objetivo General.....	25
1.5. Hipótesis	26
1.6. Objetivos específicos	27
Capítulo 2.- Materiales y Métodos Generales	29
2.1. Obtención y procesamiento de muestras	29
2.1.2. Muestras tomadas frente a Perú central (Callao).....	29
2.1.2. Muestras tomadas frente a Chile.....	30
2.2. Cronología	30
2.3. Indicadores biogénicos	34
2.3.1. Fósforo de restos de peces (P_{fish}).....	34
2.3.2. Ópalo biogénico	35
2.3.3. Carbono total, carbono orgánico y nitrógeno total	35
2.3.4. Escamas de peces	35
2.4. Elementos traza.....	36
2.5. Análisis estadístico	37
2.5.1. Comparaciones múltiples	37
2.5.2. Normalización por el contenido de aluminio	38
Capítulo 3.- Artículo científico N° 1	40
Capítulo 4.- Artículo científico N° 2	92
Capítulo 5.- Discusión General	139
5.1. Preservación de escamas en función de la oxigenación	141
5.1.1 Escamas	141
5.1.2 Fósforo total y fósforo asociado con restos de peces.....	143
5.2 ¿Una historia de los peces pelágicos en el margen Perú-Chile?.....	145

5.3	Indicadores de abundancia de peces y productividad en el sistema Perú-Chile.	153
Capítulo 6.- Conclusiones y proyecciones futuras		158
Referencias		160



Agradecimientos

En este espacio quiero expresar el más profundo sentimiento de gratitud hacia mis padres, Raúl[†] y Sonia, quienes siempre han dado un valor inestimable a la búsqueda del conocimiento. Ellos me enseñaron también que ese conocimiento es vano cuando no está acompañado por el amor: Un amor tan grande como el de mi adorada esposa Gloria, cuya visión de la vida me llena de emoción. También en este momento tengo presente, con mucho cariño, a mi hermano Raúl F. con quien hemos compartido tantos sueños. En Chile sería muy largo mencionar todas las personas con quienes tengo sentimientos de gratitud, pero merecen especial mención Lina Villota y Gabriel Coloma y, por supuesto, la numerosa colonia Colombiana de estudiantes en Concepción con quienes compartimos varias navidades lejos de casa. Además, no puedo dejar de mencionar a mis compañeros y amigos de los laboratorios de Paleooceanografía (Lorena Rebolledo y los “foraminiferólogos” Raúl Tapia y Samuél Núñez) y de Geoquímica Orgánica Marina (Alejandro Ávila, Rodrigo Castro, Lilian Núñez, Carolina Cisternas y Jaime soto), así como a mis compañeros de cohorte en el postgrado (Bibiana Jara, Lorena Rebolledo, Rosalino Fuenzalida, Andrés Milessi, Juan Placencia y Julio Sepúlveda).

En lo académico, quiero agradecer a mi profesora guía de tesis, la Dra. Carina B. Lange, por sus orientaciones y valiosas enseñanzas. Asimismo, agradezco la contribución de los miembros de mi comisión de tesis, los doctores Silvio Pantoja, Renato Quiñones, el evaluador externo Dr. Eleuterio Yáñez y el director del Programa de Postgrado de Oceanografía Dr. Wolfgang Schneider.

También quisiera expresar mi reconocimiento a Gabriel Vargas (Universidad de Chile) por su ayuda en la construcción del modelo de edad del testigo C0329 y a Diego Holmgren

por su asesoría metodológica para el trabajo con escamas de peces. A Eleuterio Yáñez (Universidad Católica de Valparaíso) quien gentilmente proporcionó series de tiempo de estadísticas de desembarque para Perú-Chile y a Gloria Sánchez (Universidad de Concepción), por su efectiva contribución con los análisis de ópalo biogénico. Igualmente, agradezco a los revisores de los manuscritos incorporados en esta tesis por sus valiosas críticas y sugerencias. El proyecto IMARPE-IRD Paleopeces suministró muestras y alguna información no publicada y el laboratorio NOSAMS del Woods Hole Oceanographic Institution hizo una importante contribución con los análisis de ^{14}C .

El apoyo de la POGO-Nippon Foundation y el Acuerdo Fundación Andes/UdeC/WHOI fue crucial para la realización de dos estadias de investigación en el Laboratorio de Geoquímica Marina de la Universidad de Utrecht, con la supervisión del Dr. Gert J De Lange. Igualmente, agradezco la hospitalidad del personal de laboratorios y amigos en Utrecht (Gert De Lange, David Rodríguez Aguilera, Tom Jilbert, Shawna Ní Fhlaithearta, Vincent Mastalerz, Peter Kraal, Socaratis Loucaides, Rinske Knoop, Helen de Waard y G.C. van de Meent – Olieran (Dineke)). El proyecto EPCOR de IAI y la Escuela de Graduados de la Universidad de Concepción proporcionaron Becas de Estudios al autor para adelantar estudios de postgrado entre 2001 y 2005. Esta tesis fue financiada por el proyecto #15010007 FONDAP-COPAS.

Curriculum Vitae

Javier Augusto Díaz Ochoa

Medellín (Colombia), 11 de febrero de 1969

Biólogo Marino Universidad Jorge Tadeo Lozano (Colombia): 1993

Magíster en Ciencias, Mención Pesquerías, Universidad de Concepción (Chile): 2003

AREAS DE INTERÉS

Disciplina principal: Oceanografía

Paleoceanografía, estudio de restos de peces en sedimentos marinos, preservación y utilización para reconstrucciones paleoecológicas. Análisis de fases sólidas del fósforo en sedimentos, incluido el fósforo asociado con apatita biogénica.

Oceanografía Pesquera, estudio interacción entre recursos pesqueros y el ambiente.

PUBLICACIONES

Díaz-Ochoa, J.A., Lange C.B., Pantoja, S., De Lange G.J., Gutiérrez, D., Muñoz, P. & Salamanca, M. 2007. Fish scales in sediments from off Callao, central Peru. Aceptado: *Deep-Sea Research II. Especial Volume: The oceanography of the eastern South Pacific II: the oxygen minimum zone*.

Díaz-Ochoa, J.A., Lange, C.B. & De Lange, G. J. Fish scale preservation and abundance in sediments from the continental margin off Chile (21° – 36° S). En revision: *Revista Chilena de Historia Natural*.

Díaz-Ochoa, J.A. & Quiñones, R.A. 2008. Relationship of precipitation, freshwater input, and sea level height with the abundance of the white shrimp (*Litopenaeus occidentalis*; Street, 1871) off Buenaventura, eastern tropical Pacific. En prensa: *Fisheries Research*.

Díaz-Ochoa, J.A., Lange, C.B., De Lange, G., Pantoja S., Muñoz, P. & Gutiérrez, D. 2006. Preservation of fish scales in sediments off Callao (Peru) and its relationship to the strength of the oxygen minimum zone. *Gayana* (supplement) 70, p. 104.

Pedraza, M. & **Díaz-Ochoa, J. A.** 2006. Sea level height, sea surface temperature, and tuna yields in the Panama bight during El Niño. *Advances in Geosciences*, 6, 155–159 (<http://www.adv-geosci.net/6/155/2006/adgeo-6-155-2006.html>).

Díaz-Ochoa, J. A., Rodríguez-Rubio, E. & Álvarez-León, R. 2004. Oscilaciones quasi-bienales de la captura por unidad de esfuerzo del camarón *Litopenaeus occidentalis* con

relación a la variabilidad climática del Pacífico Oriental Tropical. En: M.E. Hendrickx (Ed.). *Contribuciones al estudio de los crustáceos del Pacífico este*, Vol. 3: pp. 17-29. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Académica Mazatlán UNAM. México.

Díaz-Ochoa, J. A. 1997. Algunos aspectos biológico-pesqueros de dos especies de *Cynoscion* con anotaciones sobre la ictiofauna acompañante del camarón de aguas someras en la ensenada de Tumaco, Pacífico colombiano. *DAHLIA- Revista Asociación Colombiana de Ictiología*, 2: 79-83.

CURSOS

2006 Estadía de investigación Laboratorio de Geoquímica Marina, Facultad de Geociencias, Universidad de Utrecht, Holanda. 15 de agosto-13 de noviembre. Participación en el crucero USO6, en el Mar Mediterráneo (Italia-Grecia). Entrenamiento en análisis de fosfato procedente de restos de peces en sedimentos del margen continental Perú-Chile. Supervisor: Dr. Gert J. de Lange.

2005 Estadía de investigación Laboratorio de Geoquímica Marina, Facultad de Geociencias, Universidad de Utrecht, Holanda. 3 de mayo-29 de julio. Entrenamiento en análisis de fosfato procedente de restos de peces en sedimentos del margen continental Perú-Chile. Supervisor: Dr. Gert J. de Lange.

2004 Curso PROPER (Proxies in Paleoclimatology: education and research) No. 1: Proxies used in paleoceanography: Basics and new developments. Vrije University Amsterdam, Utrecht University, Bremen University, and Royal NIOZ. Amsterdam, Bremen, Texel, 3-12 de junio.

2004 Fisheries Oceanography: concepts and applications for sustainable management of marine resources. Universidad de Concepción, Departamento de Oceanografía, enero de 2004. Dictado por Dr. Ian Perry (Department of Fisheries and Oceans, Canadá).

2003 “Enfoque Ecosistémico Aplicado a la Ecología Pesquera”. Universidad de Concepción (Chile), 1-4 de diciembre de 2003. Dictado por Dr. Arnaud Bertrand (IRD, Francia).

2003 Segundo Taller Sobre la Circulación Oceánica y Atmosférica en la Región del Pacífico Sur Oriental. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Concepción, Chile. 4 y 5 de diciembre.

2002 Taller: Incorporando Interacciones Tróficas al Pronóstico de la Dinámica Poblacional, taller de postgrado en Pesquerías, Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción. 11 –13 de septiembre de 2002. Prof. Jesús Jurado-Molina (University of Washington, Seattle, USA).

2001 Fisheries Oceanography and Ecosystems Modelling. Curso Internacional Universidad de Concepción, Departamento de Oceanografía. Concepción Diciembre de 2001. Dictado por Dr. Philippe Cury (IRD, Francia).

PRESENTACIONES EN CONGRESOS

2007 XII Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar (Colacmar). Asociación Latinoamericana de Ciencias del Mar y Asociación Brasileña de Oceanografía, Florianópolis SC, Brasil. Presentación del trabajo: “Escamas de peces en sedimentos de la Bahía de Mejillones (norte de Chile) en relación con proxies de productividad biológica y de temperatura del mar”. Florianópolis (Brasil): 15-19 de abril.

2006 Taller “Oxygen minimum systems in the ocean: distribution, diversity and dynamics”. Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Departamento de Oceanografía y Centro para la Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur Oriental (FONDAP-COPAS), Universidad de Concepción. Presentación del trabajo: “Preservation of fish scales in sediments off Callao (Peru) and its relationship to the strength of the oxygen minimum zone”. Concepción (Chile) 24-26 de octubre.

2006 XVI Congreso de Ciencias del Mar (Chile). Universidad Arturo Prat, Sociedad Chilena de Ciencias del Mar. Presentación del trabajo: “Preservación de escamas e intensidad del área de mínimo oxígeno en dos localidades de Perú central y Chile centro-sur”. Iquique (Chile) 22 y 26 de mayo.

2005 XI Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar (Colacmar) y XV Congreso de Ciencias del Mar (Chile). Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Sociedad Chilena de Ciencias del mar y Asociación Latinoamericana de Ciencias del Mar. Presentación del trabajo: “Historia de los peces pelágicos del norte de Chile y centro del Perú durante los últimos cientos de años”. Viña del Mar (Chile) 16-20 de mayo.

2005 First Alexander von Humboldt International Conference on El Niño and its Global Impact. Centro Internacional para la investigación del fenómeno de El Niño (CIIFEN)-European Geophysical Union (EGU). Presentación del trabajo: “Effects of sea surface temperature and upwelling in the gulf of panama on tuna availability during El Niño events in the Colombian Pacific”. Guayaquil (Ecuador) 16-20 de mayo.

2004 XXIV Congreso de Ciencias del Mar. Universidad Católica del Norte-Sociedad Chilena de Ciencias del Mar. Presentación del trabajo: “Abundancia de peces pelágicos durante los últimos 300 años en el norte de Chile”. Trabajo ganador del Primer Lugar en el concurso de paneles. Coquimbo (Chile) 17-20 de mayo.

2003 X-Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar (X-Colacmar), Sociedad Latinoamericana de Ciencias del Mar-Universidad Nacional de Costa Rica. Presentación del trabajo “Asociación entre la precipitación y el caudal del río San Juan y la abundancia del camarón blanco en el Pacífico colombiano durante eventos El Niño/La Niña”. San José (Costa Rica) 22-26 de Septiembre.

2002 XXII Congreso de Ciencias del Mar, Universidad Austral de Chile-Sociedad Chilena de Ciencias del Mar. Presentación del trabajo: “Precipitación y caudal de ríos modulan la abundancia del camarón *Litopenaeus Occidentalis* en Buenaventura, Pacífico Colombiano”. Valdivia (Chile) 28-31 Mayo.

BECAS Y DISTINCIONES

2006 Beca Fundación Andes/Universidad de Concepción para financiar una Estadía de Investigación en el Laboratorio de Geoquímica Marina, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad de Utrecht, Holanda.

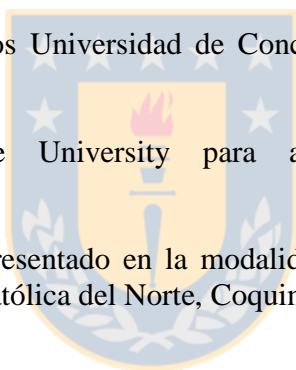
2005 Beca POGO/Fundación Andes/Universidad de Concepción para financiar una Estadía de Investigación en el Laboratorio de Geoquímica Marina, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad de Utrecht, Holanda.

2001-2004 Beca EPCOR/IAI/UDEC para adelantar estudios de Doctorado en Oceanografía, Universidad de Concepción.

2005 Beca Escuela de Graduados Universidad de Concepción, continuación estudios de Doctorado en Oceanografía

2004 Beca PAGES / Vrije University para asistir al curso PROPER 1, Ámsterdam/Bremen/Texel.

2004 Premio al mejor trabajo presentado en la modalidad de panel, XXIV Congreso de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte, Coquimbo-La Serena (Chile).



EXPERIENCIA EN DOCENCIA

2002-2005. Asistente docente, curso Fundamentos de la Investigación Científica, pregrado, Universidad de Concepción (supervisor: Dr. Tarcisio Antezana).

1996. Instructor por horas cátedra, asignatura “Nutrición de organismos en acuicultura”, pregrado, Universidad de Nariño, Sede Pacífico, Tumaco (Colombia).

CRUCEROS

2006. US06, R/V Universitatis (CONISMA/UTRECHT UIVERSITY), Mar Mediterráneo, frente a Italia y Grecia.

2003-2004 Bahía de Concepción y plataforma continental adyacente, Chile. FONDAP-COPAS, Serie de Tiempo, L/C Kay Kay.

Resumen

Preservación del registro de escamas de peces en sedimentos del margen continental Chile-Perú y su utilidad en reconstrucciones paleo-ecológicas

Javier Augusto Díaz Ochoa
Programa de Doctorado en Oceanografía
Universidad de Concepción, 2008

Dra. Carina B. Lange, Profesor Guía

Los restos de peces son abundantes a lo largo de la plataforma y el talud continental frente al margen continental Perú-Chile. En esta tesis se analiza el potencial del recuento de escamas y del contenido de fósforo procedente de restos de peces (P_{fish}) en el sedimento para reconstruir las variaciones de abundancia de las poblaciones de peces durante los siglos recientes. Los sedimentos utilizados incluyen 9 testigos recolectados principalmente sobre la plataforma continental de Chile y Perú. Los recuentos de escamas se encuentran dominados por escamas de anchoveta (*Engraulis ringens*) frente a Callao (centro del Perú), Bahía de Mejillones e Iquique (norte de Chile), mientras que las escamas de jurel (*Trachurus murphyi*) predominan frente a Concepción (Chile centro-sur). Se investiga también, la variabilidad de los conteos de escamas en función de otros indicadores de productividad biológica, a saber, ópalo biogénico, contenido de carbonato de calcio y mediciones de carbono orgánico y nitrógeno total. Asimismo, se analiza la variación temporal de elementos redox-sensibles normalizados por aporte terrígeno (Cu/Al, Mo/Al, V/Al, Zn/Al) para estudiar la influencia de las fluctuaciones en la intensidad de la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) sobre la preservación de estos restos de peces en los sedimentos durante los últimos dos siglos.

Frente a Callao, desde comienzos del siglo XIX, el ecosistema marino experimentó un cambio importante hacia una menor oxigenación, reflejado en relaciones Mo/Al más altas, el cual posiblemente estuvo asociado con el debilitamiento en escala centenaria de la Corriente Subsuperficial Perú-Chile y que quedó reflejado en razones Ti/Al más bajas en el sedimento. En consecuencia, una menor oxigenación en el sistema concuerda con mayor preservación de escamas y altas razones $P_{\text{fish}}/P_{\text{total}}$. Un análisis latitudinal de la razón Mo/Al en los sedimentos frente a Iquique, Bahía Mejillones y Concepción revela un patrón de enriquecimiento hacia la superficie que parece consistente con el cambio de oxigenación del siglo XIX frente a Perú. Además, una relación logarítmica entre las escamas de anchoveta y la razón Mo/Al revela menor preservación de escamas de peces frente a Concepción que frente a Iquique, mientras que en la Bahía de Mejillones prácticamente no existen sesgos asociados con preservación. Por consiguiente, en las localidades dentro del núcleo de la ZMO, en el norte de Chile y el centro de Perú, la utilidad de las escamas como indicadores para reconstruir la abundancia de poblaciones de peces será una función del grado de preservación de las mismas el cual, a su vez, está asociado con las fluctuaciones experimentadas por ZMO durante los últimos siglos.

Palabras clave: Escamas de peces, sedimentos, preservación, zona de mínimo oxígeno, elementos traza redox-sensibles, margen Chile-Perú.

Abstract

Preservation of the fish scales record in sediments of the continental margin off Chile-Peru and its utilization in paleo-ecological reconstructions

Javier Augusto Díaz Ochoa
Programa de Doctorado en Oceanografía
Universidad de Concepción, 2008

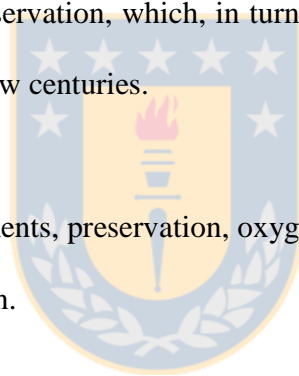
Dr. Carina B. Lange, Adviser

Fish debris is abundant at several sites along the continental shelf and slope off the Chile-Peru margin. This thesis addresses the use of fish scale counts and phosphorus from fish remains (P_{fish}) found in the sediments as proxies for reconstructing variations in the abundance of commercially important fish populations over the last few centuries. The sediments used for the analysis include nine cores collected mainly on the continental shelf off Chile and Peru. Fish scales counts are dominated by anchovy (*Engraulis ringens*) scales off Callao (central Peru), in Bahía Mejillones and off Iquique (northern Chile); jack mackerel (*Trachurus murphyi*) scales are the most abundant off Concepción (central-southern Chile). I also report on variability in fish scale counts, considering other proxies related to biological productivity, namely biogenic opal, calcium carbonate, and measurements of organic carbon and total nitrogen contents. In addition, the variability over time of redox-sensitive trace elements normalized by terrigenous input (Cu/Al, Mo/Al, V/Al, Zn/Al) is used to study the influence of changes in preservation of fish scales in the sediments as a function of the oxygen minimum zone (OMZ) strength over the last two centuries.

Higher Mo/Al ratios off Callao since the early 19th century indicate a major change in the marine ecosystem towards a less oxygenated state; the increased Mo/Al ratios probably were associated with a weakening (on the centennial scale) of the Peru-Chile Undercurrent,

as implied by a systematic decrease of the sedimentary Ti/Al ratios. Consequentially, less oxygenation agrees with enhanced fish scale preservation and greater $P_{\text{fish}}/P_{\text{total}}$ ratios. A latitudinal analysis of Mo/Al in sediments off Iquique, in Bahía Mejillones, and off Concepción reveals an enrichment pattern toward the surface sediments that seems to be consistent with the 19th century shift to less oxygenation off central Peru. In addition, a logarithmic relation between anchovy fish scales and the Mo/Al ratio reveals less preservation of fish scales off Concepción than off Iquique; this affect is practically absent in Bahía Mejillones. Therefore, in locations within the core of the OMZ off northern Chile and central Peru, the usefulness of fish scale counts as a proxy for fish population abundance depends on scale preservation, which, in turn, is a function of the variability of the OMZ strength over the last few centuries.

Keywords: Fish scales, sediments, preservation, oxygen minimum zone, redox-sensitive trace elements, Chile-Peru margin.



Capítulo 1.- Introducción

La sociedad observa con creciente preocupación los cambios en el sistema climático y sus consecuencias en ámbitos tan diversos como la economía, la cultura, la frecuencia de los desastres naturales o la seguridad en la provisión de alimentos (IPCC, 2007). En este contexto, es urgente desarrollar investigación científica que ayude a predecir las respuestas más probables de los ecosistemas frente a procesos como el calentamiento global. Chile y Perú son dos países que limitan con el Pacífico Sur Oriental, una parte del océano global caracterizada por su alta productividad biológica e importante producción pesquera. Las características oceanográficas de este sistema de límite oriental, conocido como Sistema de la Corriente Perú-Chile o Sistema de la Corriente de Humboldt, lo hacen susceptible a responder e interactuar con cambios climáticos de gran escala (e.g. Shaffer et al., 1997; Strub et al., 1998; Halpin et al., 2004) y en este contexto, tales cambios no son ajenos a la variabilidad observada durante el siglo XX en recursos pesqueros como anchoveta, sardina o jurel.

Los mejores registros históricos con que se cuenta respecto a la abundancia de las poblaciones de peces en el sistema de la Corriente Perú-Chile tienen a lo sumo una extensión de 50 años. Evidentemente, la corta extensión de las series de tiempo limita nuestra capacidad de comprensión de los cambios de largo plazo (e.g. Emery & Thompson, 2004) de estos ecosistemas y a ello se debe sumar las interacciones entre el ambiente y las pesquerías. Por lo tanto, resulta obvio que es posible avanzar en forma significativa en el conocimiento de la variabilidad natural a través de la consecución de

series de tiempo más largas como las que pueden ser construidas a partir del registro sedimentario.

1.1. Sistemas de límite oriental, cambio climático y recursos pesqueros

Los sistemas de límite oriental ubicados en áreas de afloramiento costero sobre la plataforma continental poseen una alta productividad biológica e históricamente han permitido el desarrollo de importantes pesquerías (FAO, 1997). Por ejemplo, a comienzos del siglo XX en el área de la Corriente de California prosperó la explotación pesquera de la sardina del Pacífico (*Sardinops sagax*) cuyos desembarques máximos (> 600 mil toneladas) se alcanzaron entre ~ 1930 y ~ 1945. Sin embargo, esta pesquería colapsó más tarde y las capturas se mantuvieron en bajos niveles (< 50 mil toneladas) por más de 40 años, mientras que el desembarque de la anchoveta del norte (*Engraulis mordax*) creció sostenidamente hasta alcanzar desembarques máximos (> 200 mil toneladas) entre 1975 y 1985. A partir de los años 1990, las poblaciones de peces pelágicos en la Corriente de California volvieron a sufrir cambios importantes, observándose la declinación de la anchoveta y la recuperación de la sardina (Schwartzlose et al., 1999). Diferentes investigaciones revelaron que los cambios de abundancia de la sardina en California estuvieron asociados con la expansión y colonización de nuevos hábitat (Schwartzlose et al., 1999 y referencias citadas allí; Fig. 1). Con el paso del tiempo, patrones semejantes han podido establecerse también para otras poblaciones de sardina en el Pacífico noroccidental, en el extremo opuesto de la cuenca, frente a Japón. Dichas poblaciones han experimentado complejos cambios

fisiológicos a nivel individual durante su época reproductiva repercutiendo en la producción de una descendencia mucho más numerosa durante períodos en que la sardina del lejano oriente experimentó una expansión geográfica sin precedentes durante los 1960s y 1970s, en coincidencia además, con importantes cambios en la dinámica de la corriente de Oya Shio (e.g. Kawasaki & Omori, 1995; Schwartzlose et al., 1999).

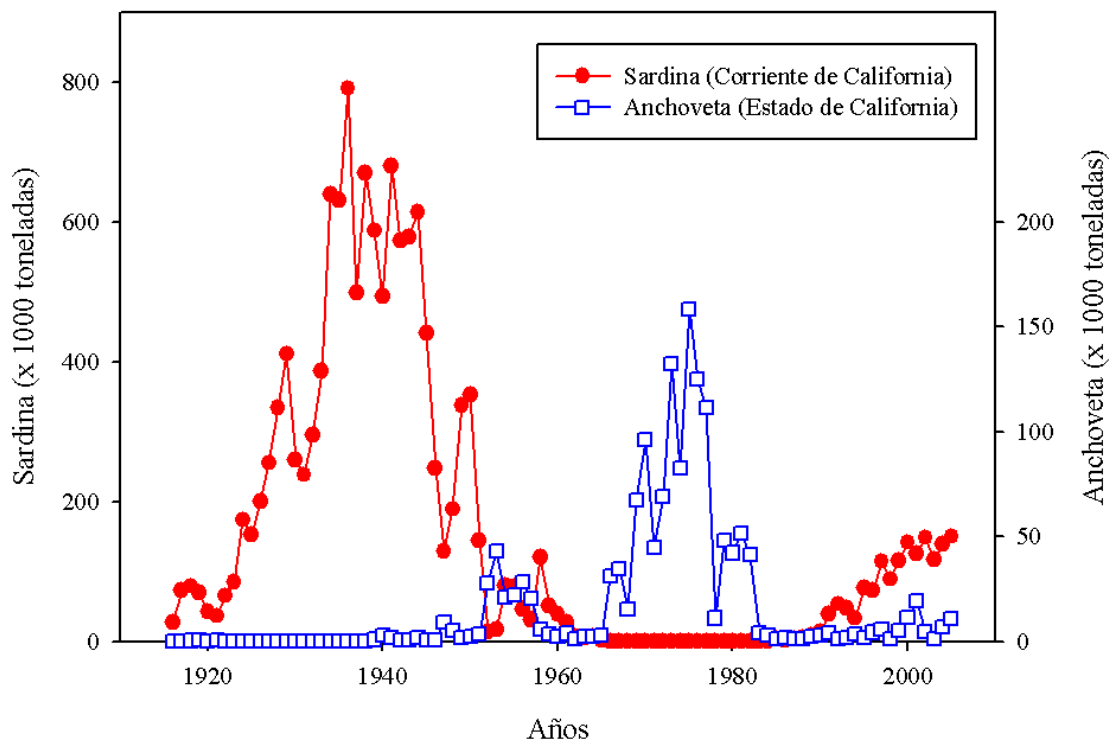


Figura 1. Desembarques de sardina y anchoveta en el sistema de la Corriente de California (Fuentes: California Cooperative Investigations Reports 1961, 1965, 1967, 1980, 1985, 1998; Schwartzlose et al., 1999; Hill et al., 2006).

En general, el estudio comparativo de las poblaciones de peces pelágicos en los tres sistemas de límite oriental más importantes del océano mundial (i.e. la Corriente de California, Namibia-Sudáfrica y la Corriente Perú-Chile) sugiere la existencia de una sincronía en las fluctuaciones de abundancia y dominancia de especies como la sardina y

la anchoveta que apunta a la existencia de un mecanismo común como serían las variaciones climáticas de gran escala (e.g. Lluch-Belda et al., 1989; Schwartzlose et al., 1999; Klyashtorin, 2001; Chavez et al., 2003; Alheit & Ñiquen, 2004). Sin embargo, aun persiste alta incertidumbre debido a la utilización de series de tiempo relativamente cortas (e.g. Freón et al., 2003) y su interacción con el impacto antropogénico debido a las pesquerías (e.g. Caviedes & Fik, 1992).

En el sistema de la Corriente Perú-Chile la alternancia en el predominio de los peces pelágicos ha sido incorporada como evidencia dentro de la teoría de los denominados “ciclos de sardina y anchoveta”, habiéndose observado altos niveles de abundancia de anchoveta (*Engraulis ringens*) en los años 1960-1970 y a contar de 1990, mientras que la sardina (*S. sagax*) tuvo una época de máxima abundancia durante los años 1980 (e.g. Serra 1983; Schwartzlose et al., 1999; Yáñez et al., 2001; Chavez et al., 2003; Alheit & Ñiquen, 2004). Desde el punto de vista ecológico, se piensa que la trama trófica del sistema Perú-Chile funciona con un control tipo “cintura de avispa” (*wasp waist*; Cury et al., 2000) en el cual una diversidad muy baja de especies como la anchoveta, la sardina (Perú-norte de Chile) o el jurel *Trachurus murphyi* (Chile centro-sur) canalizan la mayor parte del flujo energético desde los niveles inferiores de la trama trófica. Bajo esta lógica, se espera que especies de vida relativamente corta (promedio 5-10 años; Serra, 1983) y consumidoras de plancton como la sardina o la anchoveta, reaccionen rápidamente a los cambios físicos que modifican la productividad primaria. Además, este modelo conceptual prevé que especies como la anchoveta cuando responden a los cambios ambientales impactan también a otros componentes del ecosistema de surgencia costera a través de las interacciones tróficas. Un ejemplo en este sentido se ha

documentado en el Perú, en relación con los cambios abruptos de abundancia de aves marinas como cormoranes y pelícanos, asociados con la disponibilidad de su principal fuente de alimento la anchoveta (e.g. Chavez et al., 2003; Jahncke et al., 2004).

Otras hipótesis potencialmente aplicables para explicar la dinámica del ecosistema de la Corriente Perú-Chile son: el mecanismo de “atrapamiento en cardúmenes” (*school trap mechanism*; Bakun & Cury, 1999) y la hipótesis del “espacio vacante” (*loop hole hypothesis*; Bakun & Broad, 2003), que implican la interacción entre la sardina y la anchoveta y que están dirigidas a desvelar las aparentemente paradójicas respuestas diferenciales de estas especies durante los regímenes cálidos y fríos de acuerdo con los registros históricos disponibles durante el siglo XX (e.g. Chavez et al., 2003). Un enfoque que parecería capturar mejor la complejidad de las respuestas del ecosistema de surgencia costera a los cambios en el ambiente físico ha sido compendiado en la hipótesis de la “ventana óptima ambiental” (*optimal environmental window*; Cury & Roy, 1989). Según esta hipótesis, existe una relación no lineal entre la velocidad del viento y el reclutamiento de los peces pelágicos. Se trata de una curva con forma de cúpula correspondiente a una velocidad del viento de 5-6 m s⁻¹ (Fig. 2). A la izquierda de dicho umbral, una relación positiva está asociada con la entrada de nutrientes y la tasa de encuentro del alimento por el flujo vertical de la surgencia costera, mientras que a la derecha, una relación negativa está determinada principalmente por la turbulencia y advección de los estados tempranos (i.e. huevos y larvas) fuera de las áreas de crianza y alimentación (e.g. Serra et al., 1998, para el reclutamiento de la sardina *S. sagax* frente al sur de Perú y el norte de Chile; Fig. 2).

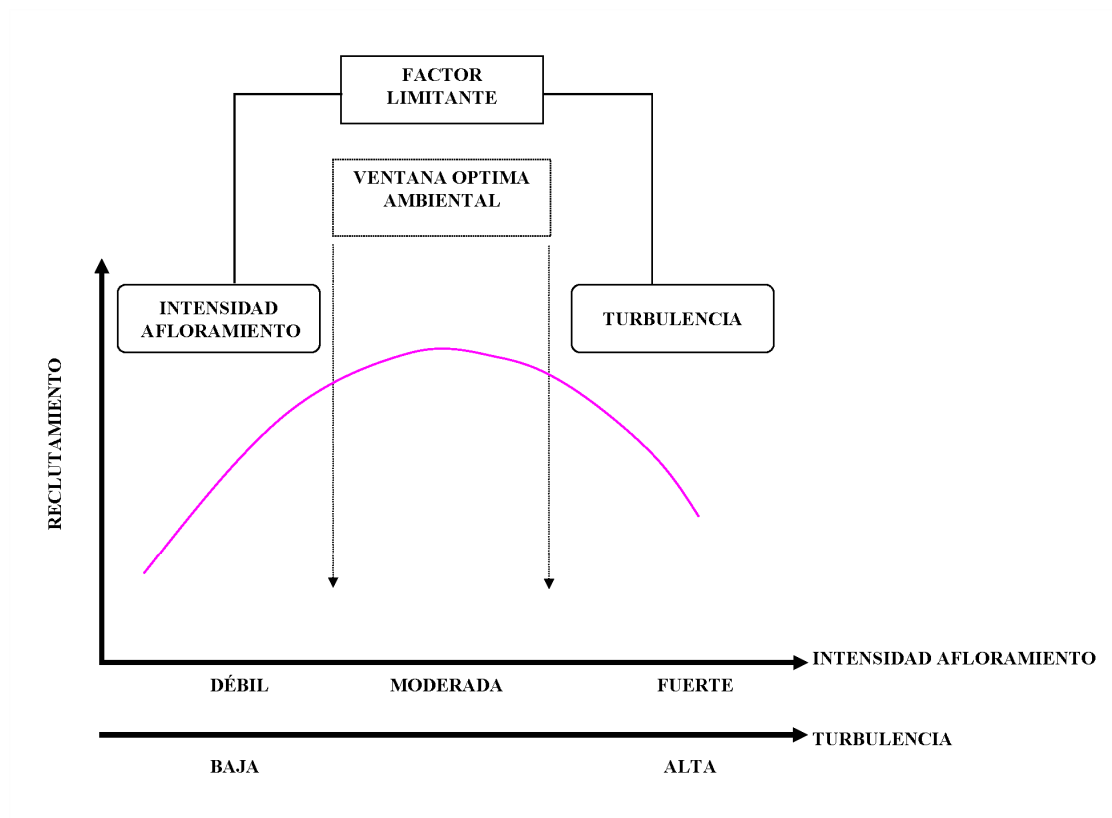
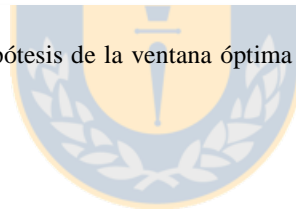


Figura 2. Modelo conceptual de la hipótesis de la ventana óptima ambiental (modificado de Cury & Roy, 1989).



La parte del sistema de la Corriente Perú-Chile frente a Chile centro-sur, evidentemente presenta características que contrastan con las localidades ubicadas más al norte de Chile o frente a Perú. Durante la mayor parte del siglo XX, la principal pesquería comercial en Chile centro-sur estuvo constituida por la anchoveta y la especie endémica sardina común (*Strangomera bentincki*), las cuales llegaron a producir desembarques conjuntos > 200 mil toneladas a mediados de los años 1970, pero colapsaron después de 1976 (Serra, 1983). Aquí, de nuevo, el ambiente parece desempeñar una influencia importante y se ha propuesto que la sardina es más abundante durante períodos cálidos (Cubillos & Arcos, 2002). En esta zona en particular, otros

parámetros físicos pueden resultar influyentes también sobre las poblaciones de peces, entre ellos cabe citar el transporte fuera de la costa durante el invierno asociado con las plumas de los ríos (advección) y con la intrusión de aguas más cálidas desde mar abierto, tal como se ha demostrado en el caso del reclutamiento de la sardina común (Castro & Hernández, 2000). Aunque al final de los años 1980 y el comienzo de los años 1990, las pesquerías de anchoveta y sardina común presentaron nuevamente volúmenes importantes de captura en Chile centro-sur, a diferencia de las localidades más al norte, en esta área se dio además el crecimiento pronunciado de los desembarques del jurel, los cuales llegaron a máximos históricos de ~ 4 millones de toneladas en 1995 (Servicio Nacional de Pesca de Chile, <http://www.sernapesca.cl/>).

El jurel *T. murphyi* es una especie altamente migratoria a lo largo del Pacífico Sur-Oriental, donde es encontrada desde las costas frente a Ecuador hasta el sur de Chile (~ 40°S). Longitudinalmente, sus poblaciones se extienden hasta mar abierto, habiéndose informado su presencia incluso en Nueva Zelanda (Grechina 1998; Arcos et al., 2001; FishBase, 2004). Buscando una explicación al desplome de los desembarques del jurel a finales del siglo XX, se ha propuesto una importante alteración de las rutas migratorias de los estados juveniles hacia las áreas de crianza ubicadas cerca de la costa alrededor de los 30°S, la cual sería función de los desplazamientos hacia el sur de la isoterma de 15°C, tal como se observó durante El Niño 1997-1998 (Arcos et al., 2001). Por otra parte, la fuerte caída de los desembarques del jurel en Chile podría tener un importante componente antropogénico el cual podría estar asociado con el sobre dimensionamiento del esfuerzo de pesca (e.g. Sepúlveda et al. 2001).

A manera de resumen general podríamos afirmar que la variabilidad ambiental física asociada con los cambios climáticos y oceanográficos determinará qué tan favorable es un ambiente para el desarrollo del ciclo vital de los peces y probablemente la abundancia de las poblaciones adultas. En este sentido Bakun (1996) identificó el impacto de la variabilidad ambiental física con procesos de (i) enriquecimiento y (ii) concentración de nutrientes, y (iii) procesos relacionados con retención de los primeros estados de desarrollo en un hábitat propicio. Entre los factores físicos más influyentes se pueden enumerar los siguientes: surgencia, mezcla, presencia de giros convergentes y divergentes, filamentos, remolinos de mesoescala y la estabilidad de los patrones de circulación a los que están adaptados los organismos.

En esta tesis la interpretación de los indicadores de productividad primaria del ecosistema está sustentada en conceptos de la trama trófica clásica bajo el supuesto que la principal fuente de alimento del ecosistema de afloramiento es el fitoplancton grande formador de cadenas (e.g. diatomeas). No obstante, es necesario reconocer que estudios recientes en el sistema de la corriente Perú-Chile sugieren que la productividad primaria no solo está disponible para los herbívoros a través del fitoplancton grande, sino también a través del plancton heterótrofico como parte de la secuencia bacterias → flagelados → protozooplancton → mesozooplancton (e.g. González et al. 2000, González et al. 2004, Cuevas & Morales, 2006, Vargas et al. 2007a). Este desvío microbiano podría dar cuenta de niveles de productividad primaria más altos que los esperados basados en las tramas tróficas clásicas. En particular, la trama trófica microbiana parece estar muy activa en períodos cuando se reduce el afloramiento costero, como ocurre en escala estacional en Chile centro-sur y probablemente en otras escalas como la correspondiente a el ciclo El

Niño Oscilación del sur (e.g. Vargas et al., 2007a). Esta perspectiva, si bien resulta interesante, aún requiere mayor evidencia con respecto a su importancia cuantitativa en la evolución de largo plazo (e.g. escala decenal, centenal, etc.) en el sistema de la corriente Perú-Chile. Además, la consideración del modelo conceptual de trama microbiana probablemente requerirá de la implementación de nuevos indicadores de productividad primaria en la investigación paleoceanográfica.

1.2. Hidrografía del sistema de la Corriente Perú-Chile

El clima a lo largo del oeste de Sudamérica es afectado por los sistemas atmosféricos, tanto en escala local como regional. El sistema que más afecta en el área es el Anticiclón del Pacífico Sur que gobierna los vientos hacia el ecuador, existiendo además varias áreas semi permanentes de baja presión atmosférica asociadas con la surgencia costera (Fonseca & Farías, 1987; Strub et al., 1998; Blanco et al., 2001). Por otra parte, en cuanto a la interacción de las corrientes, existe una conexión entre la surgencia ecuatorial y la surgencia costera debido a la influencia de las corrientes dirigidas al polo y la propia Corriente Perú-Chile. Igualmente, en el área son importantes las ondas costeras atrapadas en la costa, los filamentos de agua fría y la formación de la zona de mínimo oxígeno (Strub et al., 1998).

La variabilidad del ambiente abiótico se traslada a la productividad primaria en escala sinóptica, de esta manera las máximas concentraciones de clorofila se encuentran en las latitudes bajas (5-15°S), muy cercanas a la costa, teniéndose los valores más altos durante el verano y el comienzo del otoño. Entre los 18° y 30°S las concentraciones de clorofila son más bajas y se presenta cierta estacionalidad. A los 30° S los ciclos anuales de la

clorofila ya son de naturaleza estacional, con los valores máximos presentes durante el verano austral. Entre 37° y 43°S se observan, en cambio, concentraciones altas y persistentes de clorofila *a* (Thomas et al. 2001).

Con respecto a la variabilidad de baja frecuencia, en escala decenal e interdecenal, se ha sugerido la existencia de cambios en la profundidad de la termoclina en el área costera, la cual abarcaría escalas espaciales tan grandes como la comprendida entre el sur de California y Puerto Chicama (7°45'S, Perú), las que se considera que están regidas en forma remota por la variabilidad asociada con el fortalecimiento o el debilitamiento de los Alisios en la zona ecuatorial (e.g. Clark & Lebedev, 1999). Las implicaciones teóricas de estos autores fueron estudiadas en un análisis con nueve series de tiempo de temperatura superficial del mar en el Pacífico oriental entre 5° y 40°S para el período 1957 a 1993, sugiriéndose la existencia de oscilaciones de 20 a 25 años a lo largo de la costa frente Perú y Chile (Montecinos et al., 2003). Durante los años 1970 se verificó un cambio hacia valores positivos de la primera función empírica ortogonal de las series de tiempo que alcanzaron el máximo en 1983, mientras que entre 1987 y 1988 se dieron cambios negativos, pero para el inicio de los años 1990 ocurrió una nueva fase positiva (Montecinos et al., 2003). Además estos autores encontraron que la señal interdecenal es más débil al norte de los 9°S y que disminuye ligeramente al sur de los 23°S. En las latitudes tropicales la señal interdecenal corresponde tan solo a $\frac{1}{3}$ de la variabilidad interanual en contraste con lo observado a los 36°S en donde la señal interanual y la señal interdecenal son prácticamente de la misma magnitud. Es de notar también la existencia de una correlación entre los modos de baja frecuencia en la zona costera y la temperatura superficial del mar promedio del océano Pacífico y del océano Atlántico, lo cual sugiere

que en la zona costera la temperatura superficial del mar abarca dos procesos, el ciclo El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y una oscilación de gran escala de tipo interdecenal.

1.3. Restos de peces en el registro sedimentario

El estudio de escamas de peces preservadas en sedimentos marinos y su utilización como indicadores de abundancia en sistemas de límite oriental comenzó con los trabajos de Soutar (1966) y Soutar & Isaacs (1969, 1974) en el sistema de la Corriente de California. Estos autores encontraron cantidades apreciables de escamas, principalmente de la anchoveta californiana (*E. mordax*), de la sardina del Pacífico (*S. sagax*) y de la merluza (*Merluccius* spp.) en sedimentos laminados recolectados en las cuencas anóxicas de Santa Bárbara (California, Estados Unidos) y de Soledad (México) (Soutar & Isaacs, 1974). En general, la alta preservación de escamas y otros restos óseos en las cuencas anóxicas está asociado a valores relativamente altos de pH (~ 8) que son típicos de los sedimentos anóxicos (Soutar, 1966), así como también a la resistencia a la degradación de la matriz proteínica que envuelve al mineral de hidroxiapatita constituyente de las escamas (Kaplan & Rittenberg, 1963 *vide* Soutar & Isaacs, 1974; Schenau & De Lange, 2000). La hidroxiapatita es un mineral de fosfato de calcio que es precipitado durante la formación de huesos y escamas en los peces, pero que además se encuentra en las partes duras de otros animales marinos como céstodos, braquiópodos inarticulados, bivalvos y gasterópodos (Schenau & De Lange, 2000 y referencias citadas allí). En la cuenca de Santa Bárbara y a pesar del aumento notable del fosfato disuelto en el agua intersticial con la profundidad de la columna de sedimentos, la existencia de una envoltura de

colágeno y la presencia de altas frecuencias de escamas en niveles subsuperficiales ha llevado a suponer buenas condiciones de preservación de las mismas (Soutar, 1966). Aprovechando las extraordinarias condiciones de preservación de escamas en estos sedimentos laminados se han realizado reconstrucciones de la estructura por tamaños de las poblaciones de anchoveta y sardina durante los siglos XIX y XX mediante la calibración con registros históricos de abundancia de las especies (Soutar & Isaacs, 1974). A la información recopilada por Soutar & Isaacs (1966, 1969, 1974) se sumaron nuevos testigos de sedimento y se elaboró un registro compuesto que amplió considerablemente el rango temporal de las reconstrucciones de abundancia hasta mil setecientos años antes del presente (Baumgartner et al., 1992). Se estableció la existencia de ciclos de aumento explosivo y caídas abruptas en la biomasa de anchoveta y sardina de 60 años de duración, además de un ciclo de 100 años exclusivo para la anchoveta, los cuales ocurrieron mucho tiempo antes de la existencia de las pesquerías. Una visión en conjunto del registro sedimentario (Fig. 3) demuestra además, que las escamas de anchoveta son más frecuentes que las de sardina tanto en Santa Bárbara como más al sur en la cuenca de Soledad (Soutar & Isaacs, 1969; Baumgartner et al., 1992; Schwartzlose et al., 1999).

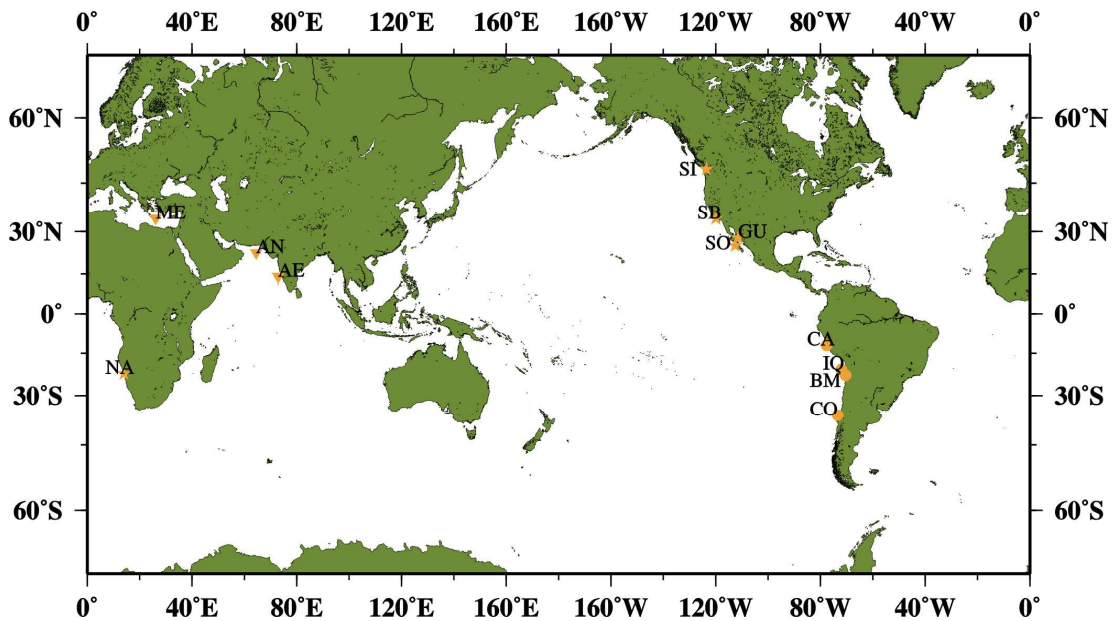


Figura 3. Algunas áreas del mundo en donde se han estudiado restos de peces preservados en sedimentos (círculos: sitios muestreados durante esta investigación, estrellas: áreas analizadas en otros estudios) y/o la acumulación de fósforo derivado de restos de peces (triángulos invertidos). CO: Concepción, BM: Bahía de Mejillones, IQ: Iquique, SO: Cuenca de Soledad, GU: Guaymas, Golfo de California, SB: Cuenca de Santa Bárbara, SI: Saanich Inlet, AE: Mar Árabe Oriental, AN: Mar Árabe Norte, ME: Mar Mediterráneo, NA: Namibia. Mapa dibujado con el programa GMT (<http://gmt.soest.hawaii.edu/>).

Otras localidades dentro de la Corriente de California en donde se han encontrado escamas preservadas son la cuenca de Soledad y el área frente a Guaymas en el Golfo de California (México). Con la información obtenida en estas localidades se han podido identificar patrones comunes en escala regional que sugieren una relación entre los cambios de abundancia de las poblaciones de peces y la variabilidad climática en escalas decenal y centenaria (Soutar & Isaacs, 1974; Holmgren-Urba & Baumgartner, 1993). Asimismo, en la parte norte del sistema de la Corriente de California, en Saanich Inlet y Effingham Inlet (Vancouver, Canadá) se han realizado recientemente estudios que destacan un alto potencial para la reconstrucción de la historia no sólo de poblaciones de

peces como sardina o anchoveta, sino también del arenque o el salmón (O'Connell & Tunnicliffe, 2001; Patterson et al., 2002; Finney et al., 2002; Patterson et al., 2004, 2005).

Con respecto al sistema de la Corriente Perú-Chile, se ha informado frecuentemente la presencia de restos de peces, usualmente asociados con fosforitas, a lo largo de la plataforma y talud continental (e.g. Milessi et al., 2005 y referencias citadas allí). Sin embargo, son pocos los trabajos publicados para el área. Frente a Callao, DeVries & Percy (1982) analizaron 12 testigos abarcando ~ 11 mil años de historia, estableciendo que durante todo ese período la anchoveta (*Engraulis ringens*) fue la especie dominante en el área. Los autores de este estudio informaron la ocurrencia más bien frecuente de discontinuidades en los testigos, las cuales probablemente estarían asociadas con los movimientos sísmicos que durante los siglos pasados han afectado el margen Perú-Chile (e.g. Kim & Burnett, 1988; Skilbeck & Fink, 2006). Además estos autores analizan aspectos relacionados con la preservación preferencial de las vértebras con respecto a las escamas y sus datos parecen sugerir que la preservación es más alta en las localidades ubicadas en profundidad de agua ~ 200 m a la altura de los 11°15' S (DeVries & Percy, 1982). Más recientemente, frente a Callao, se han realizado nuevos estudios basados en el registro sedimentario de escamas, estableciéndose que si bien estos sedimentos son parcialmente laminados, es posible efectuar reconstrucciones de abundancia debido a que los niveles de bioperturbación son bajos y permiten la datación con isótopos radiactivos como el ^{210}Pb (Schwartzlose et al., 1999). Estas características ya han permitido sentar las bases para la reconstrucción de la abundancia de peces pelágicos frente a Callao y Pisco (Perú central) utilizando el recuento de escamas en varios testigos, trabajo que es realizado por el proyecto PALEOPECES del Instituto del Mar del Perú, el cual abarca

con mayor certidumbre al menos los dos últimos siglos de historia (e.g. Schwartzlose et al., 1999; Gutiérrez et al., 2006).

Aún más escasos son los estudios sobre escamas de peces frente a Chile, solamente destacándose algunos no dirigidos específicamente a este tema, pero que presentan datos de concentración (e.g. escamas g^{-1}) frente a la Bahía de Mejillones, en el norte de Chile (Ortlieb et al., 1994, 2000; Vargas et al., 2004).

1.4. Objetivo General

Esta tesis tiene por objetivo general analizar el potencial de reconstruir series de tiempo de variables indicadoras de la abundancia de peces en el sistema de la Corriente Perú-Chile, a partir del registro de escamas de peces depositadas en sedimentos de la plataforma y talud continental superior frente al centro-sur y el norte de Chile, así como también en un área sobre la plataforma continental frente al centro del Perú. Estos análisis son enmarcados en el contexto de la preservación del registro de escamas en función de la variabilidad en el estado redox del sistema, condición necesaria para la interpretación de las mismas como un indicador de abundancia durante los últimos 200 a ~ 700 años. Para analizar las variaciones en las condiciones redox se utilizan las concentraciones de elementos traza sensitivos a los cambios de oxigenación como el Cu, Ni, Mo, V y Zn, con preferencia por el Mo, el cual es ampliamente utilizado como indicador de la ocurrencia de sulfato reducción (e.g. Calvert et al., 1996; Nameroff et al., 2004; Dean et al., 2006). Además, se analiza el contenido de fósforo derivado de restos de peces (P_{fish}) en relación con los registros de escamas y su importancia para la

preservación, así como también con respecto a las condiciones de oxigenación en el sedimento. Finalmente, se interpretan en conjunto los registros de escamas y condiciones redox con la ayuda de indicadores de paleoproductividad como carbono orgánico, ópalo biogénico y carbonato de calcio.

1.5. Hipótesis

Se plantean las siguientes hipótesis:

Hipótesis 1: *La magnitud con la cual la señal de abundancia de peces en la columna de agua es preservada en los sedimentos está dada por una relación positiva entre los recuentos de escamas y la razón Mo/Al (i.e. condiciones reductoras) en el sedimento.*

Hipótesis 2: *La preservación de escamas de peces en el sedimento implica mayor acumulación de apatita biogénica y por lo tanto, las razones P_{fish}/P_{total} y Mo/Al (i.e. condiciones reductoras) estarán correlacionadas positivamente.*

Hipótesis 3: *Las variaciones de productividad modulan las condiciones redox a través de una relación positiva entre los indicadores de productividad y la razón Mo/Al (i.e. condiciones reductoras).*

Hipótesis 4: *Los cambios en las condiciones redox en el sedimento asociados con la preservación de escamas frente a Callao están relacionados con cambios en la corriente subsuperficial Perú Chile en el sistema de la Corriente Perú-Chile.*

1.6. Objetivos específicos

- Determinar el contenido de escamas preservadas en sedimentos del margen Perú-Chile.
- Medir el contenido de fósforo asociado con restos de peces (P_{fish}) con el fin de analizar su utilidad como variable indicadora de abundancia pasada de peces en la columna de agua.
- Examinar la relación $P_{\text{fish}}/P_{\text{total}}$ como indicadora del grado de preservación de restos de peces frente al margen Perú-Chile.
- Inferir cambios en las condiciones redox en los sedimentos en las localidades muestreadas a lo largo del margen Perú-Chile, dentro del área de mínimo oxígeno, a partir del contenido de elementos traza redox-sensibles en el sedimento.
- Estudiar la relación entre la abundancia de escamas preservadas en el sedimento y los cambios en las condiciones reductoras inferidas del contenido normalizado por aporte terrígeno del elemento redox-sensible Mo (razón Mo/Al).
- Analizar mediante un enfoque de multi-indicadores (multivariado) las interacciones entre los cambios del contenido de escamas en los sedimentos y las variaciones en indicadores de productividad (e.g. ópalo biogénico, carbono orgánico, nitrógeno total, carbonato de calcio).

- Interpretar las variaciones en el contenido de elementos traza “terrígenos” (i.e. Al, Ti, Fe, Ba) como indicadores de aporte terrígeno o de circulación oceánica, para poner en contexto los cambios de abundancia y/o preservación inferidos del registro de escamas en los sedimentos frente al margen Perú-Chile.



Capítulo 2.- Materiales y Métodos Generales

2.1. Obtención y procesamiento de muestras

2.1.2. Muestras tomadas frente a Perú central (Callao)

Se utilizó un testigo de sedimento recolectado con un saca testigos de gravedad del tipo Phleger, el cual fue proporcionado por Instituto del Mar del Perú (Testigo C0329, Proyecto PALEOPECES). La longitud de este testigo fue de 52 cm y se tomó a bordo del BI Olaya frente a Callao (12° 01'S, 77°42'W, profundidad de agua = 179 m) en mayo de 2003 (Tabla 1). Se cortaron secciones de sedimento en intervalos regulares de 1 cm. Las muestras fueron pesadas y guardadas en bolsas plásticas, manteniéndose en un refrigerador a 4°C para su posterior análisis en el laboratorio. Para cada muestra por separado, se reservó ¼ de sedimento el cual fue liofilizado y destinado a los análisis químicos y de datación. Los restantes ¾ de muestra fueron utilizados para los conteos de escamas (Manuscrito 1, Capítulo 3).

Para el cálculo de la densidad seca aparente (DSA = *dry bulk density*) se utilizó la siguiente fórmula:

$$DSA = \frac{\text{sedimento seco [g]}}{\text{contenido de agua [g]} \frac{1}{\rho_{H_2O}} \left[\frac{cm^3}{g} \right] + \text{peso seco} \frac{1}{\rho_{DW_{sed}}} \left[\frac{cm^3}{g} \right]} \quad (\text{ecuación 1})$$

donde ρ_{H_2O} es la densidad del agua de mar intersticial (1.025 g cm⁻³) y $\rho_{DW_{sed}}$ es la densidad del sedimento seco (2.65 g cm⁻³).

2.1.2. Muestras tomadas frente a Chile

Se recolectaron en total ocho testigos de sedimento en tres localidades al norte y centro-sur de Chile (Tabla 1). Todos los testigos fueron tomados en diferentes cruceros oceanográficos organizados en su mayoría por el Centro FONDAP-COPAS de la Universidad de Concepción entre 2002 y 2005 (Tabla 1).

Para comparar entre sitios de muestreo en el rango latitudinal y contar con un mayor número de observaciones los recuentos de escamas por especie se integraron en intervalos de profundidad de columna de sedimento de 6 cm. Con el fin de obtener una visión general de la importancia relativa de la abundancia de escamas por especie en función del sitio de muestreo, los recuentos también fueron integrados para los primeros 24 cm de cada testigo de sedimento (esta profundidad corresponde a la longitud del testigo más corto incluido en el análisis). Los recuentos integrados se expresan en número de escamas por unidad de área del tubo colector de sedimento y por longitud del intervalo de profundidad (6 ó 24 cm), es decir, por unidad de volumen. Finalmente, estos recuentos (“abundancias integradas”) son expresados en número de escamas por 1000 cm³ de sedimento húmedo (Manuscrito 2, Capítulo 4).

2.2. Cronología

Se cuantificaron las actividades totales del isótopo radiactivo ²¹⁰Pb mediante espectrometría alfa del isótopo hijo ²¹⁰Po de acuerdo con la metodología de Flynn (1968), para ello se utilizó un equipo Canberra Quad Alpha 7404 en el laboratorio de radioisótopos de la Universidad de Concepción, requiriéndose de 24 a 48 h para alcanzar las estadísticas de recuento adecuadas (4-10%, 1 desviación estándar).

Tabla 1. Información general de los testigos de sedimento utilizados.

Localidad	Fecha de recolección	Posición	Z (m)	Tipo colector	Longitud testigo (cm)	Área colector (cm ²)	TS (cm año ⁻¹)	Tipo de análisis
Callao	05/2003	12°01'S, 77°42'W	179	GC	52	34.2	0.10*	Escamas, ET, IB
Iquique	07/2004	20°15'S, 70°16'W	291	RhC	41	43.0	-	Escamas, ET
	03/2003	20°14'S, 70°12'W	100	BC	35	45.8	0.10 ⁽¹⁾	Escamas
Mejillones	09/2005	23°03'S, 70°27'W	93	MUC	31	35.3	0.16 ⁽²⁾	Escamas
	”	”	”	”	25	70.9	”	ET, ópalo biogénico
Concepción (Estación 26)	04/2003	36°26'S, 73°23'W	120	MUC	32	70.9	0.12-0.24 ⁽¹⁾⁽³⁾	Escamas
	08/2003	”	”	BC	31	95.0	”	Escamas, ET
	01/2003	”	”	MUC	25	70.9	”	Escamas
	03/2002	”	”	BC	36	95.0	”	ET

* Estimada para los 24 cm con un modelo de edad basado en el exceso de ¹²⁰Pb, por encima de la discontinuidad entre 24 y 26 cm de profundidad de testigo. GC: saca testigos de gravedad “gravity corer”, RhC: sacatestigo tipo Rhumor, BC: saca testigos de caja “box corer”, MUC: saca testigos múltiple “multicorer”, TS: tasa de sedimentación lineal, ET: elementos traza, IB: indicadores biogénicos. ⁽¹⁾ Muñoz et al. (2004), ⁽²⁾ Vargas et al. (2004) y ⁽³⁾ Muñoz, comunicación personal.

Dado que las mediciones de actividad soportada del ^{210}Pb no estuvieron disponibles para el testigo recolectado frente al centro de Perú, se utilizó información de actividades del ^{226}Ra de las actividades de la parte inferior de un testigo colectado en 2004 en una ubicación cercana, la cual fue medida con espectrometría gama (D. Gutiérrez, información sin publicar). Para el sedimento depositado durante los últimos 130 años, se utilizó el modelo de flujo constante-suministro constante (CF-CS) derivado del exceso de ^{210}Pb (Appleby & Oldfield, 1978) para estimar la tasa promedio de acumulación del sedimento.

Además se midieron dos edades de radiocarbono en los intervalos 12-13 y 37-38 cm de profundidad de testigo, con el fin de validar el modelo de edad basado en el ^{210}Pb . Las determinaciones de ^{14}C se hicieron a partir de muestras de materia orgánica sedimentaria, correspondientes a 0.3 g de material liofilizado. Estas muestras se almacenaron en recipientes de vidrio y fueron remitidas al laboratorio *National Ocean Sciences Mass Spectrometry Facility* (NOSAMS) en el Instituto Oceanográfico Woods Hole (WHOI). En este laboratorio las muestras fueron sometidas a un pretratamiento con H_3PO_4 con el fin de remover el carbono inorgánico. Posteriormente las muestras se sometieron a combustión en altas temperaturas con el fin de producir CO_2 el cual se transfirió a un tubo de reacción con el fin de reducirlo a carbono puro (grafito) y entonces se procedió a colocar la muestra en recipientes especiales que fueron cargados en el espectrómetro de aceleración de masa (AMS). Las mediciones tuvieron una precisión entre 5 y 7 %.

Las edades de ^{14}C se calibraron en años calendario utilizando el programa computacional CALIB Versión 5.0.2 que está disponible en Internet y utilizando la base

de datos “marine04.14c”, la cual proporciona intervalos de confianza del 95% (Stuiver et al., 2005).

Con respecto a los testigos recolectados frente a Chile, aunque no se dataron las muestras, las zonas de donde proceden las muestras frente a Concepción e Iquique han sido objeto de intensiva investigación con respecto a la geocronología por parte del centro FONDAP-COPAS (e.g. Muñoz et al., 2004). De forma aún más intensiva, el área de la Bahía de Mejillones ha sido evaluada en cuanto a la geocronología de sus sedimentos, habiéndose publicado recientemente trabajos en los que se incluyen análisis de las laminaciones presentes, contenido de isótopos radiactivos de ^{210}Pb y ^{14}C , así como la razón de marcadores geoquímicos Y/Sc (Vargas et al., 2004; Vargas et al., 2007b y referencias citadas allí). De esta forma se cuenta con información secundaria confiable de las tasas de sedimentación lineal dentro del área correspondiente a los testigos recolectados frente al margen Chileno, las cuales resultan de utilidad para hacer una interpretación más o menos gruesa del registro sedimentario frente a Concepción y la Bahía de Mejillones (Tabla 1). Con respecto a Iquique, se remitieron inicialmente dos muestras para análisis de ^{14}C en materia orgánica al laboratorio NOSAMS del testigo recolectado a 93 m de profundidad de agua (Tabla 1), obteniéndose como resultado edades extremadamente antiguas para los niveles 1-1.5 cm (4000 ± 35 años ^{14}C AP) y 42-43 cm (18000 ± 85 años ^{14}C AP). En consecuencia, cualquier análisis en el ámbito cronológico del registro sobre la plataforma continental frente a Iquique debe ser tratado con precaución.

2.3 Indicadores biogénicos

2.3.1. Fósforo de restos de peces (P_{fish})

Las extracciones del P_{fish} se realizaron a partir de muestras de ~ 125 mg de sedimento seco siguiendo el método de Ruttenberg (1992) modificado por Schenau & De Lange (2000), consistente en 8 extracciones con NH_4Cl 2M (pH = 7). El contenido de fosfatos de las soluciones extraídas fue determinado mediante espectrometría de plasma acoplado inducido de emisión óptica (ICP-OES, Perkin Elmer Optima 3000). Los resultados se expresan en $mg-P\ kg^{-1}$ de sedimento seco. En principio, el P_{fish} fue implementado como una variable indicadora de la producción de peces. También se determinó el P ligado al hierro, el P autigénico, el P detrítico y el P orgánico + arcillas de acuerdo con el método de extracciones en series de Schenau & De Lange (2000). Además se utilizó la razón P_{fish}/P_{total} como un indicador de preservación de los restos de peces. Todos estos análisis fueron realizados en el laboratorio de Geoquímica Marina y Geociencias de la Universidad de Utrecht.

La regeneración del P_{fish} en el sedimento y en la columna de agua está estrechamente correlacionada con las condiciones redox del agua de fondo (Schenau & De Lange, 2000). En condiciones reductoras el P_{fish} puede volverse proporcionalmente más importante comparado con otras especies de fósforo como el autigénico, el P asociado con óxidos de hierro y el P orgánico (Slomp et al., 1996; Schenau et al., 2000; Slomp & Van Cappellen, 2007). En consecuencia, es de esperar que la proporción de P_{fish} con respecto al P_{total} se haga mayor en condiciones reductoras y por lo tanto la razón P_{fish}/P_{total} tenderá a 1.

2.3.2. Ópalo biogénico

El ópalo biogénico se extrajo a partir de ~ 0.5 g de sedimento de cada muestra, siguiendo el método de Mortlock & Froelich (1989). La absorbancia de las soluciones extraídas fue medida con un espectrofotómetro Agilent 8453 en 812 nm de longitud de onda, en el Laboratorio de Geoquímica Orgánica Marina, de la Universidad de Concepción. El contenido de ópalo biogénico se expresa como porcentaje de sílice en el sedimento seco (Mortlock & Froelich, 1989).

2.3.3. Carbono total, carbono orgánico y nitrógeno total

Los análisis de carbono total (C_{total}) y nitrógeno total (NT) se realizaron en el University of California Davis Isotope Facility con un espectrómetro de masa para razones isotópicas Europa Hydra 20/20. Se calculó el carbono orgánico (C_{org}) mediante la ecuación: $\%C_{\text{org}} = \%C_{\text{total}} - \%CaCO_3 / 8.34$. El error de medición asociado se estimó en ~ 3%.

2.3.4. Escamas de peces

Para los análisis de restos de peces, cada muestra de $\frac{3}{4}$ de sedimento húmedo fue lavada sobre tamices de 250, 180 y 63 μm y el material fue almacenado en frascos plásticos con etanol al 55% tamponado con tris-fosfato de sodio (pH = 8) (D. Holmgren, com. pers.). Solamente la fracción $> 250 \mu\text{m}$ se utilizó para los recuentos de escamas pues en las otras fracciones no se encontraron escamas completas.

Las escamas fueron sacadas manualmente, contadas e identificadas con la ayuda de una lupa binocular Olympus SZ40 en el laboratorio de Paleoceanografía de la

Universidad de Concepción. El trabajo taxonómico incluyó comparaciones con material fresco recolectado en Talcahuano (Chile) así como con la ayuda de las descripciones y fotografías publicadas en Patterson et al. (2002). Cuando las escamas no pudieron ser identificadas o estaban muy fragmentadas haciendo imposible su identificación correcta, las mismas se clasificaron en la categoría “otras”. Como los huesos, vértebras y espinas fueron muy raros en todas las muestras, los mismos no se contaron, aunque su presencia fue registrada.

El contenido de escamas (por especie y total) se expresa como número de escamas por 10 g de sedimento seco o como número de escamas por 1000 cm^{-3} , cuando las muestras no fueron liofilizadas.

2.4 Elementos traza

Se emplearon 125 mg de sedimento liofilizado de cada muestra el cual fue pulverizado con un mortero de ágata. Las muestras fueron sometidas a digestión total con 2.5 ml de una mezcla de HClO_4 (72%) y HNO_3 (4.5%) en proporción 3:2 y 2.5 ml de HF (48%). Las muestras fueron calentadas a 90°C durante toda la noche, posteriormente se secaron a 160°C hasta la formación de un gel y posteriormente se le agregó 2.5 ml de HNO_3 (4.5%). Cada muestra fue después dejada a 90°C toda la noche y pesada a temperatura ambiente para determinar el factor de dilución como la razón entre el peso inicial y el peso final de la solución de extracción. La concentración de los elementos traza fue medida en el ICP-OES por H. De Waard y R. Knoop en la Universidad de Utrecht. La precisión de las determinaciones se verificó mediante la utilización de un

estándar internacional (SO-1) y un estándar propio del laboratorio, obteniéndose un error analítico promedio < 4% para los elementos mayores y < 7% para los elementos menores. El contenido de carbonato de calcio se calculó a partir de la concentración de calcio medida con el ICP-OES mediante la fórmula: $\%CaCO_3 = \%Ca \times 2.5$.

Para analizar el aporte de material terrígeno, se calculó el Fe ligado a las arcillas (Fe-arcillas) partiendo del supuesto que en sedimentos anóxicos el Fe se encuentra principalmente repartido entre la pirita (FeS_2) y en las arcillas. El Fe en las piritas se estimó a partir del contenido de S y el Fe-arcillas se obtuvo por diferencia entre el Fe total y el Fe-pirita. Además se calculó el Ba total y el Ba contenido en la barita (Ba_{bar}). El Ba_{bar} fue extraído simultáneamente con el P_{fish} durante el tratamiento con NH_4Cl y se midió con el ICP-OES (Schenau et al., 2001).

2.5. Análisis estadístico

2.5.1. Comparaciones múltiples

Los elementos traza fueron clasificados y agrupados en una matriz de correlación con base en sus concentraciones. Los coeficientes de correlación debieron ser corregidos con un nivel α ($p < 0.05$) por la probabilidad de obtener correlaciones significativas solo por azar asociada con comparaciones múltiples. Dicha corrección se llevó a cabo utilizando la fórmula $\alpha_{corr} = 1 - (1 - \alpha)^C$, donde C es el número de comparaciones (Abdi, 2007).

2.5.2. Normalización por el contenido de aluminio

Los elementos traza fueron normalizados por el contenido de Al para tener en cuenta las interferencias ocasionadas por la dilución con material terrígeno (arcillas) (e.g. Calvert et al., 1996; Dean et al., 1997).

Para analizar los cambios en el estado redox en el sedimento, se seleccionaron los elementos traza Cu, Mo, Ni, V y Zn, que han sido identificados anteriormente como sensibles a los cambios en las condiciones redox por varios autores: Calvert et al., 1996 (pizarras marinas = *marine shales*), Valdés & Ortlieb, 2001 (norte de Chile), Böning et al., 2004 (centro del Perú), Böning et al., 2005 (Chile centro-sur).

En el manuscrito 1 (capítulo 3) las concentraciones normalizadas de los elementos redox-sensibles se ingresaron en un análisis de componentes principales (PCA) con el fin de resumir e interpretar su relación con los cambios de oxigenación y la preservación de los restos de peces. Debido a que los contenidos de los diferentes elementos traza redox-sensibles incluidos en el PCA tenían diferentes escalas, se normalizó restando a cada valor la respectiva media y dividiendo por la correspondiente desviación estándar. Además, se calculó el error estándar correspondiente a cada PCA debido al muestreo mediante la fórmula $\lambda(2/N)^{1/2}$ en donde λ representa el valor propio y N es el número de observaciones ingresadas en el análisis (North et al., 1982).

El PCA se utilizó además con los indicadores de productividad (más rigurosamente biogénicos) ópalo biogénico, CaCO_3 , C_{org} , NT y las escamas totales y de anchoveta.

Debido a que cada indicador biogénico puede encontrarse distorsionado por las condiciones de preservación en la columna de agua y en el sedimento, se analiza también el comportamiento de estas variables en función de la relación Mo/Al, variable

indicadora por excelencia de condiciones redox (e.g. Dean et al., 2006). En esta instancia se ajustaron modelos de regresión logarítmica entre el ópalo biogénico, CaCO_3 , Corg, la concentración total de escamas y la relación $P_{\text{fish}}/P_{\text{total}}$, como variables dependientes, y la relación Mo/Al, como variable independiente. Los residuos de estas regresiones (i.e. la diferencia entre las observaciones y los modelos) se interpretaron como un alejamiento del comportamiento esperado debido a cambios en las condiciones redox.

La mayoría de los análisis multivariados utilizados en esta tesis se han llevado a cabo con base en Johnson & Wichern (1998) y los cálculos estadísticos se llevaron a cabo con el programa Statistica 6 (Statsoft, 2001).

En el manuscrito 2 (capítulo 4) el análisis de los elementos redox-sensibles se centró en el indicador de sulfato reducción Mo/Al. Esta razón fue promediada cada 6 cm para poder comparar testigos que fueron cortados con resoluciones no necesariamente iguales (i.e. segmentos de 0.5, 1 ó 2 cm). En este caso el análisis estadístico se limitó a la comparación visual de los promedios, los cuales fueron representados en cajas delimitando percentiles del 75%, barras de error con el percentil del 95% y observaciones por fuera del rango (Manuscrito 2, Capítulo 4).

Capítulo 3.- Artículo científico N° 1

Preservación de escamas de peces en sedimentos recolectados frente a Callao, Perú central (Manuscrito 1).

Díaz-Ochoa, J.A., Lange C.B., Pantoja, S., De Lange G.J., Gutiérrez, D., Muñoz, P. & Salamanca, M. 2008. Fish scales in sediments from off Callao, central Peru. Aceptado para publicación en *Deep-Sea Research II*. Especial Volume: “The oceanography of the eastern South Pacific II: the oxygen minimum zone”.

Resumen:

Se analizan las escamas de peces como un indicador de abundancia y preservación junto con mediciones de fósforo derivado de restos de peces (P_{fish}) en un testigo recolectado frente a Callao, Perú ($12^{\circ} 1'S$, $77^{\circ} 42'W$; profundidad de agua= 179 m; longitud del testigo = 52 cm). Los resultados se interpretan en función de cambios en el estado redox inferidos de razones de elementos traza redox-sensibles (Cu/Al, Mo/Al, Ni/Al, Zn/Al, V/Al) e indicadores terrígenos (Fe asociado con arcillas, Ti, Al) y biogénicos (CaCO_3 , ópalo biogénico, nitrógeno total, carbono orgánico, Ba contenido en la barita). El testigo incluye aproximadamente 700 años de depositación estimados mediante la extrapolación hacia abajo de actividades de ^{210}Pb y algunas determinaciones de ^{14}C en intervalos seleccionados. El registro de escamas está dominado por escamas anchoveta *Engraulis ringens* y de merluza común *Merluccius gayii*.

El testigo presentó un cambio litológico abrupto a los 17 cm (correspondiendo al comienzo del siglo XIX), siendo laminado y más rico en materia orgánica (10-15% de carbono orgánico) por encima de esta profundidad que en profundidades mayores (< 10% de carbono orgánico). Este cambio litológico coincidió con cambios abruptos de la densidad seca aparente, el contenido de elementos terrígenos y redox-sensibles, así como también de los indicadores biogénicos incluidas las escamas de peces. El notable

aumento experimentado por los elementos redox-sensibles en los 17 cm superiores del testigo sugiere condiciones más reductoras que en los horizontes más profundos y antiguos. Estos cambios se interpretan como asociados con una intensificación de la Zona de Mínimo Oxígeno frente a Perú ocurrido desde comienzos del siglo XIX. Se observó un mayor contenido de escamas de peces y razones $P_{\text{fish}}/P_{\text{total}}$ más altas en los 17 cm superiores del testigo. Tanto los indicadores biogénicos como los elementos traza redox-sensibles tuvieron comportamientos similares; así hubo una correspondencia entre condiciones más reductoras y mayor contenido de CaCO_3 , C_{org} , nitrógeno total y escamas de peces que sugieren que estos indicadores podrían contener una importante señal de preservación.



Fish scales in sediments from off Callao, central Peru

J.A. Díaz-Ochoa^{1,2*}, C.B. Lange^{2,3}, S. Pantoja^{2,3}, G.J. De Lange⁴, D. Gutiérrez⁵, P. Muñoz⁶, M. Salamanca³

¹ Programa de Postgrado en Oceanografía, Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile

² Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur-Oriental (Centro FONDAP-COPAS), Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile

³ Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile

⁴ Department of Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Utrecht University, Budapestlaan 4, 3584 CD, Utrecht, Netherlands

⁵ Dirección de Investigaciones Oceanográficas, Instituto del Mar del Perú (IMARPE), Casilla 22, Callao, Perú

⁶ Departamento de Biología Marina, Universidad Católica del Norte, Larrondo 1281, Coquimbo, Chile

* Corresponding author. Programa de Postgrado en Oceanografía, Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile; phone: (56-41) 220-3557; fax: (56-41) 222-5400; email: jadiaz@udec.cl

Abstract

We study fish scales as a proxy of fish abundance and preservation biases together with phosphorus from fish remains (P_{fish}) measurements in a sediment core retrieved off Callao, Peru ($12^{\circ} 1'S$, $77^{\circ} 42'W$; water depth = 179 m; core length = 52 cm). We interpret our results as a function of changing redox conditions based on ratios of redox-sensitive trace elements (Cu/Al, Mo/Al, Ni/Al, Zn/Al, V/Al), terrigenous indicators (Fe in clays, Ti, Al), and biogenic proxies (CaCO₃, biogenic opal, total nitrogen, organic carbon, barite Ba). The core covers roughly 700 years of deposition, based on ²¹⁰Pb activities extrapolated downcore, and ¹⁴C dating at selected intervals. Our fish scale record is dominated by scales of the anchovy *Engraulis ringens* followed by the hake *Merluccius gayii*.

The core presented an abrupt lithological change at 17 cm (corresponding to the early 19th century); it was laminated and more organic-rich (10-15% organic carbon) above that depth, and partly laminated and less organic-rich (< 10%) below it. The lithological shift coincides with abrupt changes in dry bulk density and in the contents of terrigenous and redox-sensitive trace elements, biogenic proxies, and fish scales. The remarkable increase experienced by redox-sensitive trace elements in the upper 17 cm of the core suggests more reducing conditions when compared with deeper and older horizons, and is interpreted as an intensification of the Oxygen Minimum Zone off Peru since the early 19th century. Higher fish scale contents and higher $P_{\text{fish}}/P_{\text{total}}$ ratios were also observed within the upper 17 cm of the core. Biogenic proxies and redox-sensitive trace elements had a similar behavior; more reduced conditions corresponded to higher contents of

CaCO₃, C_{org}, total nitrogen and fish scales, suggesting that these proxies might convey an important preservation signal.

Keywords: Oxygen minimum zone, redox-sensitive trace elements, molybdenum, Peru, Callao, Clupeoid fish. Geographical bounding coordinates: 12°01'S, 77°42'W.



1. Introduction

Because of their high economic value, relatively long time-series of abundance records (*e.g.*, landings, recruitment, etc.) are available for pelagic fish such as anchovy, sardine, and jack mackerel in some highly productive Eastern Boundary Current settings (*e.g.*, Serra, 1983; Caviedes & Fik, 1992; FAO, 1997; Schwartzlose *et al.*, 1999; Yañez *et al.*, 2001; Alheit & Ñiquen, 2004). These time-series, however, include both environmental influences as well as the impact of fishing. In addition, most landing time-series are generally ≤ 50 years, limiting our capacity to detect natural scale variability. A “sediment approach” is particularly useful for overcoming this impediment since it provides longer timescales, including periods before the onset of intense commercial fishing.

The first precedents for studies of fish remains in anoxic/suboxic settings are the high resolution fish scale counts from laminated sediments retrieved from the Santa Barbara basin (California) at ~ 600 m water depth published by Soutar & Isaacs (1969, 1974) and later refined by Baumgartner *et al.* (1992). These records allowed the reconstruction of a 1700-year history of the Pacific sardine (*Sardinops sagax* Jenyns 1842) and the northern anchovy (*Engraulis mordax* Girard 1854) biomasses, and demonstrated that these species experienced extreme abundance variations in the California Current System (CCS) hundreds of years before human intervention (Baumgartner *et al.*, 1992). Later, this type of study was extended to the southern border of the CCS (Gulf of California) (Holmgren & Baumgartner, 1993) and to the northeast Pacific in anoxic settings off Canada

(Holmgren, 2001; O'Connell & Tunnicliffe, 2001; Tunnicliffe *et al.*, 2001; Patterson *et al.*, 2002, 2005).

Only a few studies have addressed the information contained in fish remains in the anoxic/suboxic sediments of the Peru-Chile Current System. DeVries & Percy (1982) analyzed 12 partly laminated sediment cores retrieved off Peru and found the greatest concentrations of fish debris within cores taken from the Oxygen Minimum Zone (OMZ) at 11° S and 12° S and 200-400 m water depth. They concluded that the anchovy (*Engraulis ringens* Jenyns 1842) was the dominant species in this ecosystem during the last 12,000 years. Analyzing recent sediments, these authors have also established that the standing stock of *E. ringens* was about five times greater than that of the northern anchovy (*E. mordax*) off California. Off Callao, Schwartzlose *et al.* (1999) provided a history of anchovy and sardine abundances between AD 1875 and 1974, and suggested alternating anchovy-sardine regimes before the development of industrial fisheries in Peru. This alternation between cooler (*E. ringens*) and warmer (*S. sagax*) periods was also detected off northern Chile by Ortlieb *et al.* (1994), who studied fish scales and other proxies from a gravity core retrieved in Mejillones Bay (~ 23° S; 104 m water depth).

There is evidence that OMZs may exhibit spatial and temporal variations in extension and strength (*e.g.*, Helly & Levin, 2004), leading to oxygenation changes in the underlying sediments that could greatly affect the preservation of fish remains (*e.g.*, Suess, 1981; Schenau & De Lange, 2000; Tunnicliffe *et al.*, 2001; Babu & Nath, 2005). However, only a few studies have addressed potential preservation biases of fish remains due to variable redox conditions. In fact, off Peru, the proportion of fish scale numbers relative to vertebrae has been used as an indicator of winnowing/sorting and abrasion

during and after deposition (DeVries & Pearcy, 1982). Based on this proportion these authors showed that anchovy and hake fish scales were better preserved within a laminated core located at ~ 190 m water depth (11°15'S) than in a more bioturbated core retrieved at > 400 m water depth (11°21'S).

Studies in Saanich Inlet, on the other hand, found that fish scales were more numerous than vertebrae in short cores encompassing the last ~ 1000 years of deposition than in the long record of ODP Hole 1034 where fish bones were dominant (O'Connell & Tunnicliffe, 2001).

The aim of this paper is to deliver a record of fish scales from sediments retrieved off Callao, central Peru (Fig. 1A), and discuss our results as a function of temporal changing redox conditions and biogenic proxies. Contemporarily, this area is characterized by high biological productivity, important fisheries dominated by anchovy and sardine, and a well-developed mid-water OMZ that impinges on the shelf and slope sediments. We analyzed concentrations of redox-sensitive trace elements and used them as potential proxies for temporal variations in the strength of the OMZ over the last few centuries. We further explored the use of phosphorus from fish remains (P_{fish}) and the ratio $P_{\text{fish}}/P_{\text{total}}$ as potential proxies of fish productivity and preservation, respectively, and compared them with the fish scale count records. Our results let us conclude that the marine environment off Callao has changed to more reducing (and probably more anoxic) conditions since the early 19th century, and that this change might have led to better preservation of fish remains and several biogenic proxies.

1.1. Preservation of fish remains

Many marine organisms such as invertebrate cestods, inarticulate brachiopods, bivalves, gastropods, and fish incorporate phosphate in their shells and bones. Fish scales are constituted by a mixture of mineral phosphorus (hydroxyapatite, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) and an organic matrix of collagen (Schenau & De Lange, 2000 and references therein). After a fish dies, this collagen breaks down, increasing the possibility of reacting with other substances (Petchey & Highman, 2000; O'Connell & Tunnicliffe, 2001). Preservation of hydroxyapatite (biogenic apatite) is variable and depends on dissolution during early diagenesis, which is affected by pH, phosphate, and calcium porewater concentrations, and destruction by microorganisms, winnowing, and bioturbation (Schenau & De Lange, 2000 and references therein). Depending on the pore water chemistry, biogenic apatite can eventually be transformed into the more stable fluorapatite by substitution of the hydroxyl (OH) ions by fluoride (F) (Schenau & De Lange, 2000). In oxygenated settings, acidity produced during organic matter aerobic respiration can induce the dissolution of carbonates and biogenic apatite. In suboxic and anoxic conditions, acidity may be significantly reduced due to processes such as pyrite (FeS_2) formation that consumes the H_2S resulting from sulfate reduction (Schenau & De Lange, 2000).

Schenau & De Lange (2000) suggested that the sedimentary fraction of phosphorus extractable with NH_4Cl is primarily associated with biogenic apatite contained in fish debris (P_{fish}). They showed that P_{fish} concentrations were higher in organic-rich, oxygen-poor sediments located at water depths shallower than 1200 m in sediments off Pakistan. These authors estimated a preservation potential of P_{fish} in surface sediments by relating its accumulation rate with fish production in the water column estimated from a trophic-dynamic model. Despite the uncertainties involved in such calculations, Schenau & De

Lange (2000) demonstrated that the dissolution of P_{fish} differed within the northern Arabian Sea and that this variability was greater than expected for the spatial variability of fish production in the water column above. Thus, higher preservation potentials in shallow waters could be attributed to shorter transit times to the bottom, high sedimentation rates, and low oxygenation of the water column and sediment surface. This was verified by Babu & Nath (2005) for the OMZ of the eastern Arabian Sea.

2. Study area: hydrography, oxygen conditions, and sediments

The hydrography of the Peruvian upwelling area is dominated by two currents: the equatorward oxygen-rich Peru Chile Current flowing at 0-100 m and the poleward Peru-Chile Undercurrent at ~ 100-350 m depth (*e.g.*, Brockmann *et al.*, 1980; Shaffer *et al.*, 1995, 1997). Upwelled water is associated with the equatorial subsurface water mass (Morales *et al.*, 1999; Fuenzalida *et al.*, this volume). An intense midwater OMZ impinges on the continental margins off Peru and northern Chile. On average, the $< 8.7 \mu\text{M O}_2$ (0.2 mL L^{-1}) boundaries of the OMZ correspond to water depths of ~ 75 and ~ 310 m, respectively (Helly & Levin, 2004), but the upper boundary can sink to ~ 200 m under strong El Niño events (Levin *et al.*, 2002). Sediments within the OMZ may offer a good potential for the preservation of geochemical and biological records due to inhibited bioturbation. In addition, the sediments underlying the OMZ along the continental margin off Peru are often laminated and have high organic carbon contents ($> 20\% C_{\text{org}}$), abundant diatoms, and fish debris (Suess, 1981; DeVries & Percy, 1982).

The content of trace elements and their behavior in the sediments off central Peru have been studied in detail by Böning *et al.* (2004), who found that Mn and Co are significantly depleted within and below the OMZ, likely because of mobilization from particles within the water column during settling. Diffusion of Mn and Co from reduced sediments only seems to occur in near coastal sediments at the upper edge of the OMZ, whereas sediments within the OMZ are extremely enriched in Cd, Mo, and Re. Although the dominant source for elements such as Ag, Cd, Cu, Zn, Ni, Cr, and Tl seems to be biodebris, the depth at which free H₂S appears in the sedimentary column is a critical factor for trace element enrichment (Böning *et al.*, 2004). These enrichments are due to the combination of perennial upwelling, high productivity, and a strong OMZ. Furthermore, high organic matter sedimentation and sulfate reduction rates promote trace elements and organic matter preservation (Böning *et al.*, 2004).

3. Material and methods

The 52-cm sediment core used in this study was retrieved with a Phleger gravity corer (C0329) from the upper continental shelf off Callao, Peru (12° 01' S, 77° 42' W, water depth = 179 m, Fig. 1A, B) in May 2003 onboard the R/V *Olaya* of the Instituto del Mar del Peru (IMARPE).

The core was sliced at 1-cm intervals; samples were weighed and sealed in plastic bags and kept at 4 °C for various analyses in the laboratory. For each sample, approximately ¼ (wet weight) of the sediment was freeze-dried and used for dating and all chemical analyses. The remaining ¾ of the sample was used for fish scale counts.

The dry bulk density (DBD) of the sediments was computed as:

$$DBD = \frac{\text{dry weight [g]}}{\text{water content [g]} \frac{1}{\rho_{H_2O}} \left[\frac{cm^3}{g} \right] + \text{dry weight} \frac{1}{\rho_{DW_{sed}}} \left[\frac{cm^3}{g} \right]}$$

where ρ_{H_2O} is the density of pore seawater (1.025 g cm⁻³) and $\rho_{DW_{sed}}$ is the density of the dry sediment (2.65 g cm⁻³).

3.1. Radiometry and core chronology

Total ²¹⁰Pb activities were quantified by alpha spectrometry of its daughter ²¹⁰Po according to the methodology described by Flynn (1968). ²¹⁰Po activity was counted with a Canberra Quad Alpha 7404 spectrometer at the radioisotope laboratory of the Universidad de Concepción, requiring 24-48 h to achieve the desired counting statistics (4-10%, 1σ errors).

Since direct measurements of the supported activity of ²¹⁰Pb were not available for this core, we used information of downcore ²²⁶Ra activities measured by gamma spectrometry in a nearby box core collected in 2004 (BC0413, 12°00.8' S, 77°43.0' W, 184 m depth; Fig. 1A; D. Gutiérrez, unpub. data) to estimate the excess values of ²¹⁰Pb. For the most recently deposited sediment (*i.e.*, ages < 130 yrs), we used the constant flux-constant supply model (CF-CS) from excess activities of the radioactive isotope ²¹⁰Pb (Appleby & Oldfield, 1978) to determine an average sediment accumulation rate.

In addition, we measured ¹⁴C activity at two intervals (12-13 and 37-38 cm; Table 1). For organic carbon ¹⁴C determinations, we weighed ~ 0.3 g of freeze-dried sediment from core depths 12-13 cm and 37-38 cm. These samples were stored in glass containers and

submitted to the National Ocean Sciences Mass Spectrometry Facility (NOSAMS). Sediment samples were subjected to acid pretreatment with H_3PO_4 to remove inorganic carbon. Samples were subsequently combusted at a high temperature to produce CO_2 , which was transferred to a reaction tube for reduction to pure carbon (graphite) and then placed into target cartridges for loading into the accelerator mass spectrometer (AMS). Measurement precision was 5-7%. ^{14}C ages were calibrated to AD years using the CALIB Rev 5.0.2 on-line software with the marine calibration dataset “marine04.14c”, which also provided a 95% confidence interval (Stuiver *et al.*, 2005).

3.2. Phosphorus from fish remains (P_{fish})

P_{fish} extractions in selected samples of ~ 125 mg dry sediment were made following Ruttenger's method (Ruttenger, 1992), modified by De Lange (1992) and Schenau & De Lange (2000), and were based on 8 extractions with 2M NH_4Cl (pH = 7) (Schenau, 1999). The phosphate content of the extracted fluids was determined by spectrometry (Schenau & De Lange, 2000) with an inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES, Perkin Elmer Optima 3000). The results are expressed in mg-P kg^{-1} dry sediment. P_{fish} is used as a fish productivity proxy. We also determined iron-bound P, authigenic P, detrital P, and clay + organic P, following the method of Schenau & De Lange (2000). We used the ratio $P_{\text{fish}}/P_{\text{total}}$ as a proxy for the preservation of fish remains. These analyses were carried out at the Marine Geochemistry/Geosciences Laboratory, Utrecht University.

P_{fish} regeneration in the sediment and the water column is closely correlated with bottom water redox conditions (Schenau & De Lange, 2000). Under reducing conditions

P_{fish} might become proportionally more important than other P species such as authigenic P, ferric iron oxides (i.e. iron bound-P), and organic P (Slomp *et al.*, 1996; Schenau *et al.*, 2000; Slomp & Van Cappellen 2007). Therefore, we expect the proportion of P_{fish} to P_{total} to be higher under more reducing conditions and, correspondingly, the sedimentary $P_{\text{fish}}/P_{\text{total}}$ ratio will be closer to 1.

3.3. Trace elements

For trace element analyses, we used ~ 125 mg of powdered sediment, which was subjected to total digestion in a 2.5 mL 3:2 mixture of HClO_4 (72%), HNO_3 (4.5%), and 2.5 mL HF (48%). The samples were placed on a hot plate at 90 °C overnight; thereafter, they were dried at 160 °C until a gel was formed, and subsequently 25 mL of HNO_3 (4.5%) were added. Each sample was kept at 90 °C overnight and weighed at room temperature to determine the dilution factor as the ratio between the initial sample weight and the final weight of the extracted solution. Trace element concentrations were measured by ICP-OES at Utrecht University. Measurement precision was checked with an international standard (SO-1) and one in-house standard, achieving a mean analytical error of < 3% for major and < 6% for minor elements.

The calcium carbonate content was computed from the Ca concentration measured by ICP-OES using the expression: $\% \text{CaCO}_3 = \% \text{Ca} \times 2.5$.

For analyzing terrigenous input, we calculated the proportion of Fe bound to clays (Fe-clay) based on the assumption that, in anoxic sediments, Fe is mainly distributed within pyrite (FeS_2) and Fe-clay. Fe in pyrite was estimated from the S concentration and Fe-clay was computed as the difference between total Fe and Fe in pyrite. In addition, we

computed the clay Ba (Ba-clay) concentration as the difference between total Ba (Ba_{total}) and barite Ba (B_{bar}). Ba_{bar} was simultaneously extracted with P_{fish} during the NH_4Cl treatment and was measured by ICP-OES (Schenau *et al.*, 2001).

3.4. Biogenic opal

Biogenic opal was extracted from ~ 0.5 g of sediment for each sample following the method of Mortlock & Froelich (1989). The absorbance of the extracts was measured with an Agilent 8453 Spectrophotometer at 812 nm at the Marine Organic Geochemistry Laboratory, Universidad de Concepción. The biogenic opal content is expressed as percent silica in dry sediment (Mortlock & Froelich, 1989).

3.5. Total carbon, total nitrogen, and $CaCO_3$ contents

Total carbon and total nitrogen (TN) analyses of organic matter were performed at the University of California Davis Isotope Facility on a Europa Hydra 20/20 Isotope Ratio Mass Spectrometer. We computed organic carbon (C_{org}) from the equation $\%C_{org} = \%total\ carbon - (\%CaCO_3/8.34)$. The measurement error was ~ 3%.

3.6. Fish scales

For the analysis of fish remains, each $\frac{3}{4}$ sample of wet sediment was washed through sieves of 250, 180, and 63 μm ; the material was stored in plastic containers with 55% ethanol buffered with sodium tris-phosphate (pH = 8) (D. Holmgren, pers. comm.). Only the > 250 μm fraction was used for fish scale counts since the other fractions did not contain whole fish scales.

Fish scales were hand-picked, counted, and identified under a stereomicroscope Olympus SZ40 at the Paleoceanography Laboratory, Universidad de Concepción. Taxonomic work included comparisons with fresh fish material collected in Talcahuano (Chile), and taxonomic descriptions and photographs from Patterson *et al.* (2002). When fish scales could not be identified or were highly fragmented, they were classified as “other”. Because fish bones, vertebrae, and spines were very rare in all samples, they were not counted but their presence was recorded.

Fish scale contents (for each species and total) are expressed as the number of scales per 10 g of dry sediment.

3.7. Statistical analysis

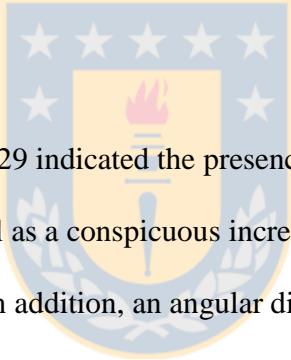
Trace elements were classified and grouped by calculating a correlation matrix among all trace element concentrations (Table 2). We corrected the probability level α ($p < 0.05$) of correlation coefficients taking into account the probability of obtaining a significant value by chance during multiple comparisons using the formula: $\alpha_{\text{corr}} = 1 - (1 - \alpha)^C$, where C is the number of comparisons (Abdi, 2007). Subsequently, trace elements were normalized by Al content to account for terrigenous (clay) input (Calvert *et al.*, 1996; Dean *et al.*, 1997). For analyzing sedimentary changes in redox conditions, we selected the trace elements Cu, Mo, Ni, V, and Zn, identified previously as redox sensitive by various authors: Calvert *et al.*, 1996 (marine shales), Valdés & Ortlieb, 2001 (for northern Chile), Böning *et al.*, 2004 (for central Peru), Böning *et al.*, 2005 (for central-southern Chile). Al-normalized concentrations were included in a principal component analysis (PCA) to summarize and interpret their relationship with sediment oxygenation and the

preservation of fish remains. Since measurements of the different variables included in the PCA had different scales, we normalized each variable by subtracting its average and dividing by its standard deviation. The standard error of each factor due to sampling was calculated as $\lambda(2/N)^{1/2}$, where λ is the corresponding eigenvalue and N the number of observations (North *et al.*, 1982).

Most multivariate statistical analyses followed Johnson & Wichern (1998) and for statistical calculations we used Statistica 6 software (StatSoft, 2001).

4. Results

4.1. Sediment characteristics



The X-radiograph of core C0329 indicated the presence of laminations, especially in the upper part of the core, as well as a conspicuous increase of the opacity for X-rays at 16-17 cm core depth (Fig. 1B). In addition, an angular discordance was observed at 26 cm depth, covered by ~2 cm of mixed sediments (Fig. 1B). Dry bulk density increased near the core top reaching values of 0.42 g cm^{-3} (Fig. 1C). This feature, as well as the shrinkage of the core near the top, suggests a significant compaction during coring. A lower density subsurface layer ($< 0.2 \text{ g cm}^{-3}$) was measured from 6 to 17 cm depth, followed by higher values below, confirming that the shift at 16-17 cm depth in the X-radiograph is caused by an abrupt increase in sediment density (Fig. 1C).

Overall, CaCO_3 was lower than 20% and ranged between $> 10\%$ in the upper ~ 16-17 cm of the core and $< 5\%$ below the density shift (Fig. 2A, B). A second interval of high contributions (~ 15%) was observed at 44-45 cm. Numerous small-sized benthic

foraminifers, predominantly of the genus *Bolivina*, were found in the high-CaCO₃ sections (R. Tapia, pers. comm.). A diverse assemblage of coccoliths was also commonly seen in smear slides in those intervals (C. Lange, unpubl. data).

The sediments also contained high quantities of diatom valves and frustules, especially *Chaetoceros* resting spores (G. Sanchez, pers. comm.). Concentrations of biogenic opal fluctuated widely (~ 5-15%) between 7 cm and the bottom of the core, whereas values in the upper 7 cm were relatively constant around 6% (Fig. 2C).

Organic carbon (C_{org} 6-9%) and total nitrogen (TN 0.7-1%) were closely correlated ($r = 0.99$, $p < 0.01$); C_{org} was especially high in the upper 16-17 cm of the core (Fig. 2D, E). The molar C/N ratio exhibited little variability (9.8-10.3) with minor peaks at 2-3 cm, 14-15 cm, and 40-42 cm core depths (Fig. 2F).

4.2 Fish scales and phosphorus

Numerous fish scales, predominantly from anchovy (~ 60%) and, in minor proportions, from hake (13%) and sardine (3%) were found in the sediments; jack mackerel and myctophid scales were very rare (Fig. 3A). The item “others” constituted the second most abundant category of fish debris (~ 23%) and was mainly composed of non-identified and fragmented fish scales. Fish remains other than scales (*e.g.*, bones or vertebrae) were negligible and were not counted; however, their presence was annotated.

Total phosphorus ranged between ~ 1500 and 3700 ppm (average 2400 ± 450 ppm); most phosphorous corresponded to P_{fish} (54%) and clay-organic P (20%). Iron-bound P, authigenic P, and detrital P were also detected in much lower proportions (Fig. 3B).

4.3 Chronological estimations

^{210}Pb activities decreased exponentially from the core top ($80.00 \pm 3.55 \text{ dpm g}^{-1}$) to 7 cm sediment depth ($6.60 \pm 1.21 \text{ dpm g}^{-1}$) (Fig. 1C). A rather constant activity layer (6 dpm g^{-1}) was observed at 7-11 cm depth, and decreasing activities were seen below 14 cm depth with values $< 3 \text{ dpm g}^{-1}$. Neighboring box core B0413 (Fig. 1A) showed ^{226}Ra activities between $2.10 \pm 0.05 \text{ dpm g}^{-1}$ and $4.45 \pm 0.10 \text{ dpm g}^{-1}$ in the top 35 cm depth in core, with an average level equal to $2.78 \pm 0.23 \text{ dpm g}^{-1}$ (D. Gutiérrez, unpubl. data), which is similar to the ^{210}Pb activities in the deeper section of core C0329. No direct measurements of ^{226}Ra were made in the core C0329, so we estimated the excess ^{210}Pb activities by subtracting the above mentioned background of $^{226}\text{Ra} \pm 2\sigma$ from the total activities. From this calculation, we estimated that the layer with excess ^{210}Pb activities extended up to ~ 11-14 cm depth in core (Fig. 1C).

Since it cannot be distinguished if the constant ^{210}Pb activity values resulted from true changes in sedimentation or downcore changes of supported activity, we only used the uppermost 8 cm interval of excess activities ($3.2\text{-}77.0 \text{ dpm g}^{-1}$; Fig. 1C) for applying the CF-CS model. An average sediment accumulation rate of $0.029 \pm 0.003 \text{ g cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ($r^2 = 0.98$) was obtained, yielding a relative age of ~ 130 years at 13 cm depth in core, consistent with the downcore distribution of excess activities.

^{210}Pb activity at the surface of core C0329 was about 20 dpm g^{-1} lower than the surface activity in core BC0413 (D Gutiérrez, pers. comm.), thus implying sediment loss during coring. The very low concentrations of anchovy scales at the top of core C0329 (Fig. 4B) differ from the high contents near the sediment-water interface seen in several cores collected recently by IMARPE in the same area (D. Gutiérrez, pers. comm.). This

discrepancy together with the presence of sardine scales in the uppermost 3 cm of our core (Fig. 4D) do not coincide with the historical data documenting the recovery of anchovy and the collapse of sardine after the early 1990s (Chavez *et al.*, 2003).

Therefore, based on the ^{210}Pb and fish scale signals we infer that ~ 10-15 years may have been lost during coring and thus the age at the top of core C0329 could be estimated as AD 1990 ± 5 years. Using this information and extrapolating downcore, we estimated an age of AD 1831 ± 16 years for the lithological shift, and of AD 1742 ± 25 years for the upper boundary (at 24 cm core depth) of the angular discordance.

The two ^{14}C dates at 12-13 cm (775 ± 25 ^{14}C years BP) and 37-38 cm (1210 ± 30 ^{14}C years BP) are given in Table 1. According to the CF-CS age model, the first radiocarbon age would correspond to AD 1865 ± 14 years. If we assume that there have been no significant changes in the ocean reservoir age in the timeframe covered by our study, the date at 37-38 cm depth should be around the mid-15th century. We estimated a total reservoir effect of 690 ± 39 years BP by subtracting the age predicted by the CF-CS model at 12-13 cm (85 ± 14 years BP) from the radiocarbon age measured at that depth (Table 1). Thus, using the global reservoir effect in AD 1865 (395 ± 23 years BP) obtained from the marine calibration database (Hughen *et al.*, 2004), it was possible to infer a local reservoir correction of $\Delta R = 295 \pm 62$ years BP. This estimation is within the range of the ΔR estimated by Taylor & Berger (1967) from marine shells collected off central Peru (243 ± 49 years BP). However, a high spatial and temporal variability of local reservoir effects can be expected due to changes in subsurface circulation and/or upwelling intensity. Such variability may modify the transport of radiocarbon signatures to the surface ocean, where they are incorporated into the organic matter.

For calibrating the second radiocarbon age, we used both the Taylor & Berger (1967) ΔR and the ΔR estimated above, yielding calendar years of AD 1407 (1 σ range AD 1339-1431) and AD 1435 (1 σ range AD 1394-1470), respectively (Table 1). Considering the uncertainty of these estimates, we averaged the two higher probability dates and set the calendar year AD 1421 \pm 50 years as a reference date.

If no change in the sediment accumulation rate is assumed, then the lower boundary (at 26 cm) of the angular discordance would be dated at AD 1576 \pm 50 years, implying a loss of ca. 170 years, and the total age of the core would then be 710 \pm 50 years. On the other hand, if no sediment loss is assumed, the radiocarbon age measured at 37-38 cm could also be explained by a reduction in the sediment accumulation rate. However, the two strongest historic marine earthquakes off the central Peruvian margin occurred in 1687 and 1746 (Dorbath et al., 1990; Tavera & Bernal, 2005), which match the stratigraphic anomaly within dating uncertainties. If both events caused a loss of the sedimentary record of ca. 59 years, a 42% reduction in the sedimentation rate is needed to explain the radiocarbon dating at 37-38 cm. In that case, the age at the bottom of the core would be 811 \pm 100 years.

Unfortunately, the available data are not sufficient to constrain the chronology and decide on one of the two hypotheses (constant sedimentation rate vs. change in sedimentation rate); thus we use the average of both dates and give AD 1230 \pm 150 years for the bottom of the core. We note that the age model reported here is very preliminary; especially the deeper section of the core is not well constrained. Since the purpose of this paper is to explore the relationship between fish scale preservation and changes in redox

conditions, we consider that the uncertainties in the age model are not critical in the interpretation of the results.

4.4. Fish scale contents

Total fish scale contents (Fig. 4A) showed considerable variability downcore, ranging from 0 to > 40 scales 10 g^{-1} dry sediment, with the highest values (> 10 scales 10 g^{-1}) mainly concentrated in two major intervals: 1-10 cm core depth (the 1900s) and 40-46 cm. Other maxima in fish scale concentrations of relatively shorter duration were found at 14-17 cm (early 1800s) and 24-25 cm (at the angular discordance). We also identified a section of the core between 18 and 32 cm where values were substantially lower or even null (Fig. 4A). Although very scarce, fish remains such as bone fragments and vertebrae were observed mostly in “scales depleted” horizons along the core (Fig. 4A).

P_{fish} followed the general trend of fish scales, with the highest values (> 1000 ppm) at 40-45 cm, 23-24 cm, 15-16 cm, 4-6 cm, and 1-2 cm (Fig. 4A). However, no significant statistical correlation was found between P_{fish} and total fish scales ($r = 0.42$, $p > 0.05$, $n = 14$). Highest values of the $P_{\text{fish}}/P_{\text{total}}$ ratio (Fig. 4A) occurred between 2 and 15 cm and at depths ≥ 35 cm.

When analyzed by species, we noted that anchovy dominated total scale trends (Fig. 4B) with the sole exception of a peak at 24-25 cm core depth where hake scales were more abundant (Fig. 4C). During most of the 19th and 20th centuries, anchovy scale concentrations were, on average, greater and more variable than during any other time in our record (Figs. 4B). Although rather scarce, sardine scales were observed in the topmost 3 cm (the late 20th century), at 8-9 cm (late 19th/early 20th centuries), at 42-43

cm, and at 45-46 cm core depths, with typical concentrations of ≤ 5 scales 10 g^{-1} dry sediment (Fig. 4D). Non-identified and/or fragmented fish scales (“other”) reached highest abundances in the upper 17 cm of the core (since the early 1800s) and at 40-48 cm (Fig. 4E).

4.5. Trace elements

Several trace elements were strongly correlated to each other ($p < 0.05$, corrected for multiple comparisons). The terrigenous input indicators Al and Ti were positively and significantly associated with Fe, Mn, Zn, and Zr; inversely correlated with Ca, Mg, Mo, Na, and V; and not significantly correlated with Ba and Ni (Table 2). We observed that the Ti/Al ratio was positively correlated with Fe-clay ($r = 0.84$, $p < 0.01$) and negatively correlated with the $\text{Ba}_{\text{total}}/\text{Al}$ ratio ($r = -0.82$, $p < 0.01$). These three variables experienced an abrupt change in the early 19th century (at the density shift; Fig. 5A-C). In addition, Ba-clay and Ba_{bar} (Fig. 5D, E) also point to important variations in the sources of terrigenous material and productivity at the lithological change.

On the other hand, most of the normalized redox-sensitive trace elements showed significant correlations among each other. They increased dramatically in the top 17 cm of the core when compared to the lower levels observed downcore (Fig. 6). A notable exception within this “low” interval was a brief period between 43 and 45 cm when trace elements had similar concentrations to those found in the younger sediments (Fig. 6). It is interesting to note that, despite the high correlation exhibited by Cu and Zn with other redox-sensitive trace elements, both had a unique behavior in the topmost 0-5 cm, where they were enriched (Fig. 6A, B).

Normalized redox-sensitive trace elements could be summarized by two principal components (PC) accounting for 75% and 15% of the total variance, respectively (Table 3). PC1 included the redox-sensitive elements Cu, Mo, Ni, V, and Zn, with approximately the same contributions, whereas Fe and Mn were mostly represented in PC2, likely indicating their link with terrigenous input.

5. Discussion

We describe the distribution of fish scales and phosphorus derived from fish remains in a sediment core (C0329) recovered off Callao, Peru, and incorporate these results into a general framework of changes in biogenic proxies and oxygenation (derived from trace element concentrations indicative of redox conditions).

In general, the productivity proxies preserved in core C0329 (*i.e.*, organic carbon, total nitrogen, biogenic opal, B_{bar} , calcium carbonate) reflect the overall high productivity conditions typical of the upwelling area off Peru (Barber & Smith, 1981; Carr, 2002). This sedimentary column was presumably deposited in a rather stable environment under low oxygen conditions that favored the clear laminated pattern observed since the early 1800s (upper 17 cm of the core) (Fig. 1A). In contrast, below 17 cm, laminations are faint, implying different environmental conditions. Our results show that the lithological change at 17 cm (AD 1831 \pm 16 years) can be interpreted as a major shift in redox conditions (Morales *et al.*, 2006).

Our sampling resolution, compaction during coring, and the possible loss of surface material do not allow to resolve changes in the sediment accumulation rate with the excess ^{210}Pb time-scale. Changes in sedimentation rates along the Callao margin through the past millennium and the Holocene have been observed by several authors (Koide & Goldberg, 1982; Kriete *et al.*, 2004; Rein *et al.*, 2004; Skilbeck & Fink, 2006). A 30 - 50% acceleration of sedimentation rates since ~ the mid 20th century was reported by Koide & Goldberg (1982) and Kriete *et al.* (2004), based on the distribution of short-lived natural radionuclides and bomb-derived radionuclides, respectively.

Sediment unconformities have been described previously in the Peruvian margin, and attributed to the intense seismic activity of tectonic origin (DeVries & Percy, 1982; Kim & Burnett, 1988; Skilbeck & Fink, 2006; Gutiérrez *et al.*, 2006). The potential hiatuses associated with the unconformities add complexity to the chronological development and interpretations. This required a cautionary approach for chronological interpretation, which nevertheless is sufficient for the objective of this manuscript.

5.1. Oxygenation changes

Adsorption of trace elements to organic matter in sinking particles provides the mechanism of transport to the sediments (*e.g.*, Böning *et al.*, 2004). However, only a poorly-oxygenated environment will favor trace element incorporation and immobilization on the seafloor (Nameroff *et al.*, 2004 and references therein), as suggested for Mejillones Bay off northern Chile (Valdés *et al.*, 2003; Valdés, 2004). Once in the sediment, the concentration of redox-sensitive trace elements is mainly regulated by the flux of oxidants from the overlying seawater and the decomposition of

exported organic matter (Nameroff *et al.*, 2004, and references within). Recently, Mo has emerged as a paleo-redox proxy in both ancient and modern organic carbon-rich sediments (e.g., Meyers *et al.*, 2005; Brumsack, 2006). In the Santa Barbara Basin, for example, ~85% of authigenic Mo accumulates at or below the sediment-water interface (Zheng *et al.*, 2000). This was related to the availability of sulfide and enrichment of Brønsted acids in pore waters, and high concentrations of clay minerals in the surface sediments (see Meyers *et al.*, 2005 and references within).

The downcore redox-sensitive trace element pattern in core C0329 implies that the upper 17 cm were deposited under more reducing conditions (and probably in a more anoxic environment) when compared with deeper and older horizons (Fig. 6). This remarkable increase experienced by redox-sensitive trace elements since the early 1800s may imply intensification of the OMZ that impinges on the shelf and slope sediments off Peru at water depths between ~ 75 m and ~ 310 m (e.g., Helly & Levin, 2004). Furthermore, changes in redox conditions seem to be intimately associated with variations in CaCO₃, C_{org}, and TN; namely, more reduced conditions corresponded to higher contents. Also, better preservation of fish remains seems to be favored by reducing (anoxic) conditions (Figs 4A and 6).

Several studies have shown that, within the eastern South Pacific OMZ, benthic foraminifera fauna is characterized by low diversity and high dominance of small and thin-shell forms of *Bolivina* that seem to survive well under dysoxia (e.g. Boltovskoy *et al.*, 1991; Sen Gupta & Machin-Castillo, 1993). A recent study conducted with sediments from off Pisco (Peru, 14° 05' S) found several assemblages of benthic foraminifera, mostly *Bolivina seminuda* and *B. subfusiformis*, whose preservation was greatly

improved in sediments younger than ~ AD 1826 associated with a reduction in the concentration of oxygen in the system (Morales *et al.*, 2006). In this work we confirm that the presence of abundant foraminifera of the genus *Bolivina* off Callao also coincides with CaCO₃ peaks in sediments younger than AD 1831 (the upper 17 cm of core; Fig. 2C), more reducing conditions as inferred from redox-sensitive trace elements (Fig. 6), and better preservation of fish scales (Fig. 4). Thus, it seems that an important shift has occurred off Peru on a regional scale since the early 19th century.

5.2. Preservation of fish scales

Our fish scale record was dominated by *E. ringens* scales, suggesting that this species has been the most abundant pelagic fish off Callao during the last several centuries (Figs 3A, 4B). This is in agreement with previous reports for the area (DeVries & Percy, 1982; Schwartzlose *et al.*, 1999). Hake fish scales were the second most abundant in the record (Fig. 4C), although three times lower, in numbers, than anchovy.

The analysis of redox-sensitive elements suggests that fish scale concentrations contain an important preservation signal superimposed over the abundance signal. This can be inferred from the relationship between total fish scales and the Mo/Al ratio ($r = 0.82$, $p < 0.001$), suggesting that the increase/decrease in the scale concentration is a response to a less/more oxygenated environment.

A previous report approached the issue of fish remains preservation in central Peru, relying on counts of fish scales and vertebrae, and implying that the ratio scale/vertebrae would be low under less preservation, and *viceversa* (DeVries & Percy, 1982). Since we found very few vertebrae in our core at all core depths (Fig. 4A), we could not apply the

scale/vertebrae ratio as a tool to assess fish remains preservation. The use of chemical determinations of P in the sediment might provide a more quantitative method for studying fish remains (Schenau & De Lange, 2000). Despite the lower number of observations of the $P_{\text{fish}}/P_{\text{total}}$ ratio ($N = 14$) relative to fish scale data ($N = 51$) this series was significantly associated with the Mo/Al ratio ($r = 0.57$, $p < 0.05$) with the greatest values above the density shift and between 43 and 45 cm (Fig. 4A). Together, these observations suggest that the content of P_{fish} relative to P_{total} increased in the sediment under more sulfate reducing conditions coinciding with improved fish scale preservation above the density shift. Despite the nice covariation of P_{fish} and fish scales the correlation between both parameters was not significant ($r = 0.42$, $p > 0.05$). A plausible explanation may be related to the instability of P_{fish} . This species may be an important precursor for authigenic apatite (phosphorite) in the sediments off central Peru, a process known as phosphogenesis and reported to occur contemporarily in the Arabian Sea OMZ (Schenau *et al.*, 2000) but that remains poorly studied in the Peru margin.

To the best of our knowledge, the works of Schenau & De Lange (2000) off Pakistan, Slomp *et al.* (2002) in the eastern Mediterranean Sea, and Babu & Nath (2005) in the eastern Arabian Sea are the only published records of P_{fish} determinations. Total phosphorus values are somewhat lower in the Arabian Sea OMZ than off Peru (~ 1600 ppm vs. ~ 2400 ppm), whereas in sediments from Mediterranean sapropels, P_{fish} is definitively much less concentrated (maximum ~ 370 ppm). In addition, spatial variations of P_{fish} deposition rates seem to be larger than variations in fish production, implying that the regeneration of fish remains could be an important process in the Arabian Sea (Schenau & De Lange, 2000). Off Peru, on the other hand, there is contradicting evidence

about the role of fish remains as a source or sink of reactive phosphorus (*e.g.*, Suess, 1981; Froelich *et al.*, 1983). Fish remains regeneration is intimately related to pore water fluoride availability. Evidently, one of the topics that remains to be investigated is the significance of the P_{fish} preservation in relation to other P species off Peru, and whether it measures exclusively abundance/preservation of fish remains or is affected by other processes such as the transformation of fish remains (hydroxyapatite) into the more stable form, fluorapatite, as has been suggested elsewhere (Schenau & De Lange, 2000).

5.2. Terrigenous indicators

The terrigenous indicators Ti/Al ratio and Fe associated with clays behaved similarly and were much lower in the younger sediments, *i.e.*, above the density shift rather than below it (Fig. 5A, B), suggesting that an important change in the sediment sources occurred off Callao after the early 1830s. Such a change might be related to a shift in the source of terrigenous material and/or linked to a change in the ocean circulation pattern. Studies by Klump *et al.* (2000) and Reitz *et al.* (2004) showed that the sediments along the Peru-Chile margin exhibit a pattern of increasing values of the Ba/Al ratio, which may reflect terrigenous input and latitudinal pluviosity patterns (Klump *et al.*, 2000), as well as changes in sediment sources due to variations in current dynamics in the area between the Peru-Chile Undercurrent and the Chile Coastal Current (Reitz *et al.*, 2004 and references therein). In core C0329, Ba_{total}/Al had higher values in the upper 17 cm than deeper downcore, revealing a simultaneous increase in Ba-clay and Ba_{bar} in this upper section (Fig. 5C-E). An increase in Ba-clay may indicate a shift in the sediment sources whereas Ba_{bar} suggests an increasing trend of phytoplankton productivity (it

provides at least a minimum estimation under sulfate reducing conditions) with an important peak in the late 19th century (Fig. 5E). A change in sediment sources is also supported by the systematically lower Ti/Al ratios observed in our core since the early 19th century (Fig. 5A). These changes may be associated with variations in the strength of the Peru-Chile Undercurrent since the early 19th century. This hypothetical weakening of the Peru-Chile Undercurrent would imply a reduction of ventilation in the benthic environment similar to that observed during the onset of the El Niño phenomenon (*e.g.* Strub *et al.*, 1998) but on a centennial scale. This may also be true for the older section at 43-46 cm, in which we observed good preservation of fish scales and more reducing conditions (Figs 4, 6).



6. Conclusion

The continental shelf off Callao seems to have experienced an important shift in the early 19th century when the system changed in a relatively abrupt manner from a more to a less oxygenated state. Our data show that fish scale preservation off Callao, as well as other biogenic proxies such as CaCO₃ and C_{org}, seems to be significantly affected by this change in oxygenation so that it is maximized under more reduced conditions. Two major periods with high fish scale and P_{fish} concentrations and high preservation were observed between AD 1990 and 1831 (0-17 cm core depth) and in the late 13th/early 14th centuries (40-46 cm). They were separated by a ~ 20 cm interval (~ 15th century to early 1800s) of

poor preservation characterized by low values in scale concentrations and low $P_{\text{fish}}/P_{\text{total}}$ ratios.

In contrast to the biogenic proxies CaCO_3 and C_{org} , biogenic opal was less associated with changing redox conditions as inferred from Mo/Al, indicating that in the area off Callao this variable might be used with more confidence as a productivity proxy.

Acknowledgments

We thank Gabriel Vargas (Universidad de Chile) for helping with the age model of core C0329, Diego Holmgren for methodological advice on fish scale work, Eleuterio Yáñez (Universidad Católica de Valparaíso) for providing landing statistics, and Gloria Sanchez (Universidad de Concepción) for opal analysis. Comments and suggestions of four anonymous reviewers have greatly improved the final version of this manuscript. We are grateful to the POGO-Nippon Foundation and the Fundación Andes/UdeC/WHOI agreement for funding JDO's research visit to the Marine Geochemistry Laboratory at Utrecht University; colleagues at Marine Geochemistry/Geosciences Utrecht University are thanked for their hospitality. JDO also thanks project EPCOR of IAI, and the Graduate School of the Universidad de Concepción for providing student scholarships. We also acknowledge IMARPE, the IAI small grant project 03SGP 211-222, and the IMARPE-IRD Paleopeces project, which supplied the core samples and supplementary, unpublished information, and NOSAMS at Woods Hole Oceanographic Institution for ^{14}C dating. This study was funded by the FONDAP-COPAS Center Grant #15010007.

References

- Abdi, H., 2007. The Bonferonni and Šidák corrections for multiple comparisons. In: Salkind, N. (Ed.), *Encyclopedia of Measurements and Statistics*, Thousand Oaks (CA).
- Alheit, J., Ñiquen, M., 2004. Regime shifts in the Humboldt Current ecosystem. *Progress in Oceanography* 60, 201-222.
- Appleby, P.G., Oldfield, F., 1978. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. *Catena* 5, 1-8.
- Babu, C.P., Nath, B.N., 2005. Processes controlling phosphorus in surficial sediments from the eastern Arabian Sea impinged by varying bottom water oxygenation conditions. *Deep-Sea Research II* 52, 1965-1980.
- Barber, R., Smith, R., 1981. Coastal upwelling ecosystems. In: Longhurst, A. (Ed.), *Analysis of marine ecosystems*. Academic Press, N.Y., pp. 31-68.
- Baumgartner, T., Soutar, A., Ferreira-Batrina, V., 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. *Reports of California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations* 33, 24-40.
- Boltovskoy, E., Scott, D., Medioli, F., 1991. Morphological variations of benthic foraminiferal tests in response to changes in ecological parameters: a review. *Journal of Paleontology* 65, 175-185.
- Böning, P., Brumsack, H., Böttcher, M., Schnetger, B., Kriete, C., Kallmeyer, J., Borchers, S., 2004. Geochemistry of Peruvian near-surface sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68, 4429-4451.

- Böning, P., Cuypers, S., Grunwald, M., Schnetger, B., Brumsack, H., 2005. Geochemical characteristics of Chilean upwelling sediments at ~30°S. *Marine Geology* 220, 1-21.
- Brockmann, C., Fahrbach, E., Huyer, A., Smith, R.L., 1980. The poleward undercurrent along the Peru coast: 5 to 15°S. *Deep-Sea Research* 27A, 847-856.
- Brumsack, H-J. 2006. The trace metal content of recent organic carbon-rich sediments: Implications for Cretaceous black shale formation. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 232, 344-361.
- Calvert, S., Bustin, R., Ingall, E., 1996. Influence of water column anoxia and sediment supply on the burial and preservation of organic carbon in marine shales. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 1577-1593.
- Carr, M., 2002. Estimation of potential productivity in eastern boundary currents using remote sensing. *Deep-Sea Research II* 49, 59-80.
- Caviedes, C., Fik, T., 1992. The Peru-Chile eastern Pacific fisheries and climate oscillation. In: Glantz, M. (Ed.), *Climate variability, climate change and fisheries*. Cambridge University Press, Cambridge UK, pp. 355-376.
- Chavez, F., Ryan, J., Lluch-Cota, S., Niquen, M., 2003. Climate, fish, ocean productivity, and atmospheric carbon dioxide, *Science* 299, 217-221.
- Dean, W., Gardner, J., Piper, D., 1997. Inorganic geochemical indicators of glacial-interglacial changes in productivity and anoxia on the California continental margin. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 4507-4518.

- De Lange, G.J., 1992. Distribution of various extracted phosphorus compounds in the interbedded turbidic/pelagic sediments of the Madeira Abyssal Plain, eastern North Atlantic, *Marine Geology* 109, 115-139.
- DeVries, T., Percy, W., 1982. Fish debris in sediments of the upwelling zone off central Peru: a late Quaternary record. *Deep-Sea Research* 28, 87-109.
- Dorbath, L., Cisternas, A., Dorbath, C., 1990. Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America* 80, 551-576.
- FAO, 1997. Review of the state of world fishery resources: marine fisheries. FAO Fisheries Circular 920, Rome.
- Flynn, W., 1968. The determination of low levels of polonium-210 in environmental materials. *Analytica Chimica Acta* 43, 221-227.
- Froelich, P., Kim, K., Jahnke, R., Burnett, W., Soutar, A., Deakin, M., 1983. Pore water fluoride in Peru continental margin sediments: uptake from seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 47, 1605-1612.
- Fuenzalida, R., Schneider, W., Garcés-Vargas, J., Bravo, L., Lange, C.B. . Vertical and horizontal extension of the oxygen minimum zone in the eastern South Pacific Ocean. *Deep-Sea Research II*; this volume.
- Gutiérrez, D., Field, D., Salvattecchi, R., Baumgartner, T., Díaz-Ochoa, J., Velazco, F., Ortlieb, L., Sifeddine, A., Tapia, P., Lange, C.B., Ferreira, V., Vargas, G., 2006. Decadal to centennial variability of the Peruvian upwelling ecosystem during the last centuries as inferred from fish scale deposition rates of anchovy and other marine sediment records. In: *Extended abstracts of the International Conference*;

- “The Humboldt Current System: climate, ocean dynamics, ecosystem processes, and fisheries”. Instituto del Mar del Perú, IRD, FAO: 24-26.
- Helly, J., Levin, L., 2004. Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins. *Deep-Sea Research* 51, 1159-1168.
- Holmgren, D., 2001. Decadal-centennial variability in marine ecosystems of the northeast Pacific Ocean: the use of fish scales deposition in sediments. Ph. D. thesis, University of Washington.
- Holmgren, D., Baumgartner, T., 1993. A 250-year history of pelagic fish abundances from the anaerobic sediments of the central Gulf of California. *Reports of California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations* 34, 60-68.
- Hughen, K. A., Baillie, M. G. L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Buck, C. E., Burr, G. S., Cutler, K. B., Damon, P. E., Edwards, R. L., Fairbanks, R. G., Friedrich, M., Guilderson, T. P., Herring, C., Kromer, B., McCormac, F. G., Manning, S. W., Ramsey, C. B., Reimer, P. J., Reimer, R. W., Remmele, S., Southon, J. R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F. W., van der Plicht, J., Weyhenmeyer, C. E., 2004. Marine04 Marine radiocarbon age calibration, 26 - 0 ka BP. *Radiocarbon* 46,1059-1086.
- Johnson, R.A., Wichern, D.W., 1998. *Applied multivariate statistical analysis*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J.
- Kim, K., Burnett, W., 1988. Accumulation and biological mixing of Peru margin sediments. *Marine Geology* 80, 181-194.
- Klump, J., Hebbeln, D., Wefer, G., 2000. The impact of sediment provenance on barium-based productivity estimates. *Marine Geology* 169, 259-271.

- Koide, M. & E. Goldberg. 1982. Transuranic nuclides in two coastal marine sediments off Peru. *Earth and Planetary Science Letters*, 57: 263-277.
- Kriete, C., Suckow, A., Harazim, B., 2004. Pleistocene meteoric pore water in dated marine sediment cores off Callao, Peru. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 59, 499-510.
- Levin, L., Gutiérrez, D., Rathbun, A., Neira, C., Sellanes, J., Muñoz, P., Gallardo, V., Salamanca, M., 2002. Benthic processes on the Peru margin: a transect across the oxygen minimum zone during the 1997-98 El Niño. *Progress in Oceanography* 53, 1-27.
- Meyers, S., Sageman, B., Lyons, T. 2005. Organic carbon burial rate and the molybdenum proxy: Theoretical framework and application to Cenomanian-Turonian oceanic anoxic event 2. *Paleoceanography* 20, doi:10.1029/2004PA001068.
- Morales, C., Hormazábal, S., Blanco, J., 1999. Interannual variability in the mesoscale distribution of the upper boundary of the oxygen minimum layer off northern Chile (18-24°S): implications for the pelagic system and biogeochemical cycling. *Journal of Marine Research* 57, 909-932.
- Morales, M., Field, D., Mayor, S., Gutierrez, D., Sifeddine, A., Ortlieb, L., Ferreira, V., Salvatecci, R., Velazco, F., 2006. Variaciones de foraminíferos de los últimos 460 años en sedimentos laminados de la plataforma continental peruana. *Boletín Sociedad Geológica del Perú* 101, 5-18.
- Mortlock, A., Froelich, P., 1989. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep-Sea Research* 36, 1415-1426.

- Nameroff, T., Calvert, E., Murray, W., 2004. Glacial-interglacial variability in the eastern tropical North Pacific oxygen minimum zone recorded by redox-sensitive trace metals. *Paleoceanography* 19, doi: 10.1029/2003PA000912.
- North, G., Bell, T., Cahalan, R., 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Monthly Weather Review* 10, 699-706.
- O'Connell, J., Tunnicliffe, V., 2001. The use of sedimentary fish remains for interpretation of long-term fish population fluctuations. *Marine Geology* 174, 177-195.
- Ortlieb, L., Zuñiga, O., Follegati, R., Escribano, R., Kong, I., Mourguiart, P., Valdés, J., Iratchet, P., 1994. Paleocceanografía de Bahía de Mejillones del sur (Antofagasta, Chile): resultados preliminares para el último milenio. *Estudios Oceanológicos* 13, 45-55.
- Patterson, R., Wright, C., Chang, A., Taylor, L., Lyons, P., Dallimore, A., Kumar, A., 2002. Atlas of common squamatological (fish scale) material in coastal British Columbia and an assessment of the utility of various scale types in paleofisheries reconstruction. *Paleontologia Electronica* 4.
- Patterson, R., Prokoph, A., Kumar, A., Chang, A., Roe, H., 2005. Late Holocene variability in fish scales and dinoflagellate cysts along the west coast of Vancouver Island, NE Pacific Ocean. *Marine Micropaleontology* 55, 183-204.
- Petchey, F., Higham, T., 2000. Bone diagenesis and radiocarbon dating of fish bones at the Shag river mouth site, New Zealand. *Journal of Archaeological Science* 27, 135-150.

- Rein, B., Lückge, A., Sirocko, F., 2004. A major Holocene ENSO anomaly during the Medieval period. *Geophysical Research Letters* 31, L17211, doi:10.1029/2004GL020161,
- Reitz, A., Pfeifer, K., De Lange, G.J., Klump, J., 2004. Biogenic barium and detrital Ba/Al ratio: a comparison of their direct and indirect determination. *Marine Geology* 204, 289-300.
- Ruttenberg, K., 1992. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. *Limnology and Oceanography* 37, 1460-1482.
- Sen Gupta, B., Machin-Castillo, M., 1993. Benthic foraminifera in oxygen-poor habitats. *Marine Micropaleontology* 20, 183-201.
- Schenau, S., 1999. Cycling of phosphorus and manganese in the Arabian Sea during the late quaternary. *Geologica Ultraiectina* 182, Ph.D. thesis, University of Utrecht.
- Schenau, S., De Lange, G.J., 2000. A novel chemical method to quantify fish debris in marine sediments. *Limnology and Oceanography* 45, 963-971.
- Schenau, S., Slomp, C., De Lange, G., 2000. Phosphogenesis and phosphorite formation in sediments located within the Arabian Sea Oxygen Minimum Zone. *Marine Geology* 169, 1-20.
- Schenau, S., Prins, M.A., De Lange, G., Monnin, C., 2001. Barium accumulation in the Arabian Sea: controls on barite preservation in marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65, 1545-1556.
- Schwartzlose, R., Alheit, J., Bakun, A., Baumgartner, T., Cloete, R., Crawford, R., Fletcher, W., Green-Ruiz, Y., Hagen, E., Kawasaki, T., Lluch-Belda, D., Lluch-

- Cota, S., MacCall, A., Matsuura, Y., Narvaéz-Martínez, M., Parrish, R., Roy, C., Serra, R., Shust, K., Ward, M., Zuzunaga, J., 1999. Worldwide large-scale fluctuations of sardine and anchovy populations. *South African Journal of Marine Science* 21, 289-335.
- Skilbeck, C.G., Fink, D., 2006. Data report: Radiocarbon dating and sedimentation rates for Holocene–upper Pleistocene sediments, eastern equatorial Pacific and Peru continental margin. In: Jørgensen, B.B., D’Hondt, S.L., and Miller, D.J. (Eds.), *Proc. ODP, Sci. Results* 201, pp. 1–15 [Online].
- Serra, R., 1983. Changes in the abundance of pelagic resources along the Chilean coast. *FAO Fisheries Report* 291, 255-284.
- Shaffer, G., Salinas, S., Pizarro, O., Vega, A., Hormázabal, S., 1995. Currents in the deep ocean off Chile (30°S). *Deep-Sea Research* 42, 425-426.
- Shaffer, G., Pizarro, O., Djurfeldt, L., Salinas, S., Rutllant, J., 1997. Circulation and low-frequency variability near the Chilean coast: remotely forced fluctuations during the 1991-92 El Niño. *Journal of Physical Oceanography* 27, 217-235.
- Slomp, C., Van Cappellen, P., 2007. The global marine phosphorus cycle: sensitivity to oceanic circulation. *Biogeosciences* 4, 155-171.
- Slomp, C.P., Thompson, J., De Lange, G.J., 2002. Enhanced regeneration of phosphorus during formation of the most recent eastern Mediterranean sapropel (SA). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66, 1171-1184.
- Slomp, C., Epping, E., Helder, W., Van Raaphorst, W., 1996. A key role for iron-bound phosphorus in authigenic apatite formation in North Atlantic continental platform sediment. *Journal of Marine Research* 54, 1179–1205.

- Soutar, A., Isaacs, J., 1969. History of fish populations inferred from fish scales in anaerobic sediments off California. Reports of California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations 13, 63-70.
- Soutar, A., Isaacs, J., 1974. Abundance of pelagic fish during the 19th and 20th centuries as recorded in anaerobic sediment off the Californias. Fishery Bulletin 72, 257-273.
- StatSoft, Inc., 2001. STATISTICA (data analysis software system), version 6, www.statsoft.com.
- Strub, T., Mesias, J., Montecino, V., Rutllant, J., Salina, S., 1998. Coastal ocean circulation off western South America. Coastal segment (6,E). In: Robinson, A., Brink, K. (Eds.), The Sea, Volume 11, pp. 273-310.
- Stuiver, M., Reimer, P.J., Reimer, R.W., 2005. CALIB 5.0. [WWW program and documentation].
- Suess, E., 1981. Phosphate regeneration from sediments of the Peru continental margin by dissolution of fish debris. Geochimica et Cosmochimica Acta 45, 577-588.
- Tavera, H., Bernal, I., 2005. Distribución espacial de áreas de ruptura y lagunas sísmicas en el borde del oeste de Perú. In: Arce Helberg, J., Giesecke Matto, A. (Eds.), Sociedad Geológica del Perú. Volumen Especial. no. 6, pp. 89-102.
- Taylor, R.E., Berger, R., 1967. Radiocarbon content of marine shells from the Pacific coasts of Central and South America. Science 158, 1180-1182.
- Tunnicliffe, V., O'Connell, J., McQuoid, M., 2001. A Holocene record of marine fish remains from the Northeastern Pacific. Marine Geology 174, 197-210.

- Valdés, J., 2004. Evaluación de metales redox-sensitivos como proxies de paleoxigenación en un ambiente marino hipóxico del norte de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 77, 121-138.
- Valdés, J., Ortlieb, L., 2001. Paleoxigenación subsuperficial de la columna de agua en la bahía Mejillones del sur (23°S): Indicadores geoquímicos en testigos de sedimento marino. *Investigaciones Marinas, Valparaíso*, 29, 25-35.
- Valdés, J., Ortlieb, L., Sifeddine, A., 2003. Variaciones del sistema de surgencia de Punta Angamos (23°S) y la zona de mínimo oxígeno durante el pasado reciente. Una aproximación desde el registro sedimentario de la Bahía Mejillones del Sur. *Revista Chilena de Historia Natural* 76, 347-362.
- Yáñez, E., Barbieri, M.A., Silca, C., Nieto, K., Espíndola, F., 2001. Climate variability and pelagic fisheries in northern Chile. *Progress in Oceanography* 49, 581-596.
- Zheng, Y., Anderson, R., Geen, R., Kuwabara, J., 2000. Authigenic molybdenum formation in marine sediments: a link to pore water sulfide in the Santa Barbara Basin. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64, 4165-4178.

Figure captions

Figure 1. A) Study area off central Peru showing the position of core C0329 (this study) and neighboring box core BC0413; B) X-radiography of core C0329; and C) dry bulk density (DBD) and ^{210}Pb activity profiles of core C0329. The dotted lines show a 2σ interval for ^{226}Ra measured in the nearby core BC0413. (X) denotes overlaps of X-radiographs.

Figure 2. A) X-radiography of core C0329; relative abundances of B) CaCO_3 , C) biogenic opal, D) organic carbon (C_{org}), E) total nitrogen (TN); and F) C/N molar ratio. Dashed horizontal line marks the lithological shift at 17 cm, and gray bar corresponds to the angular discordance associated with the AD 1687/1746 earthquakes.

Figure 3. A) Relative contribution (%) of fish scales by species and B) partitioning of phosphorus species for selected samples from core C0329.

Figure 4. A) Concentrations of total fish scales (in # 10 g^{-1} dry sediment), phosphorus from fish remains (P_{fish}) and $\text{P}_{\text{fish}}/\text{P}_{\text{total}}$ in core C0329. Concentration of fish scales by species is shown for B) anchovy, C) hake, D) sardine, and E) “other” (unidentified or fragmented fish scales). Historical landings available for anchovy and sardine (Eleuterio Yáñez, Universidad Católica de Valparaíso, pers. comm.) are superimposed over the respective fish scale concentration plots. (■) marks the presence of vertebrae and/or bone fragments. Dashed line and gray bar as in Fig. 2.

Figure 5. A) Profiles of the Ti/Al ratio, B) Fe associated with clay (Fe-clay/Al), C) Ba_{total}/Al ratio, D) Ba associated with clay (Ba-clay/Al), and E) barium as barite (Ba_{bar}/Al) for core C0329. Dashed line and gray bar as in Fig. 2.

Figure 6. Al-normalized redox-sensitive trace elements A) Cu, B) Zn, C) V, D) Mo, and E) Ni in core C0329. Dashed line and gray bar as in Fig. 2.



Table 1. ^{14}C ages for Phleger gravity core C0329 retrieved off Callao.

Core depth (cm)	^{14}C years B.P. $\pm 1\sigma$	* $\Delta\text{R} \pm 1\sigma$	Calibrated age, calendar years AD (1 σ)	§ $\Delta\text{R} \pm 1\sigma$	Calibrated age, calendar years AD (1 σ)
12-13	775 \pm 25	243 \pm 49	-	-	-
37-38	1210 \pm 30	243 \pm 49	1407 (1339-1431)	295 \pm 37	1435 (1394-1470)

* Estimated for northern Peru by Taylor & Berger (1967)

§ Estimated from the difference between the age calculated with the CF-CS ^{210}Pb model and the corresponding ^{14}C age (see text for details)



Table 2. Correlation matrix based on Pearson correlation coefficient for trace element concentrations in core C0329.

	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	Ti	V	Zn	Zr
Al	1	0.26 ^{ns}	-0.87*	-0.26 ^{ns}	0.99*	-0.48*	0.99*	-0.73*	-0.72*	-0.25 ^{ns}	1.00*	-0.62*	0.84*	0.95*
Ba		1	-0.06 ^{ns}	0.29 ^{ns}	0.24 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.26 ^{ns}	0.11 ^{ns}	-0.09 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.21 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.42*	0.33*
Ca			1	0.27 ^{ns}	-0.87*	0.67*	-0.88*	0.79*	0.66*	0.23 ^{ns}	-0.88*	0.63*	-0.70*	-0.86*
Cu				1	-0.23 ^{ns}	0.05 ^{ns}	-0.27 ^{ns}	0.60*	0.10 ^{ns}	0.60*	-0.30 ^{ns}	0.37 ^{ns}	0.20 ^{ns}	-0.23 ^{ns}
Fe					1	-0.47*	0.99*	-0.70*	-0.71*	-0.20 ^{ns}	0.99*	-0.61*	0.85*	0.95*
Mg						1	-0.48*	0.53*	0.74*	0.35 ^{ns}	-0.48*	0.58*	-0.41*	-0.47*
Mn							1	-0.74*	-0.70*	-0.22 ^{ns}	0.99*	-0.63*	0.84*	0.97*
Mo								1	0.54*	0.65*	-0.75*	0.80*	-0.34*	-0.68*
Na									1	0.25 ^{ns}	-0.72*	0.47*	-0.60*	-0.63*
Ni										1	-0.26 ^{ns}	0.70*	0.14 ^{ns}	-0.15 ^{ns}
Ti											1	-0.64*	0.81*	0.95*
V												1	-0.37 ^{ns}	-0.59*
Zn													1	0.86*
Zr														1

*: 5% significance level corrected for multiple comparisons, ns: non-significant correlation.

Table 3. Principal component analysis for Al-normalized redox-sensitive trace elements of core C0329. The eigenvalue \pm one standard error and the percent of total variance explained by each principal component (PC) are in parentheses.

Al normalized trace element	PC1 (5.25 \pm 1.05, 75%)	PC2 (1.05 \pm 0.21, 15%)
Cu/Al	-0.41	0.031
Fe/Al	-0.31	-0.53
Mn/Al	0.19	-0.84
Mo/Al	-0.43	0.056
Ni/Al	-0.42	-0.08
V/Al	-0.41	0.024
Zn/Al	-0.42	-0.015



Figure 1

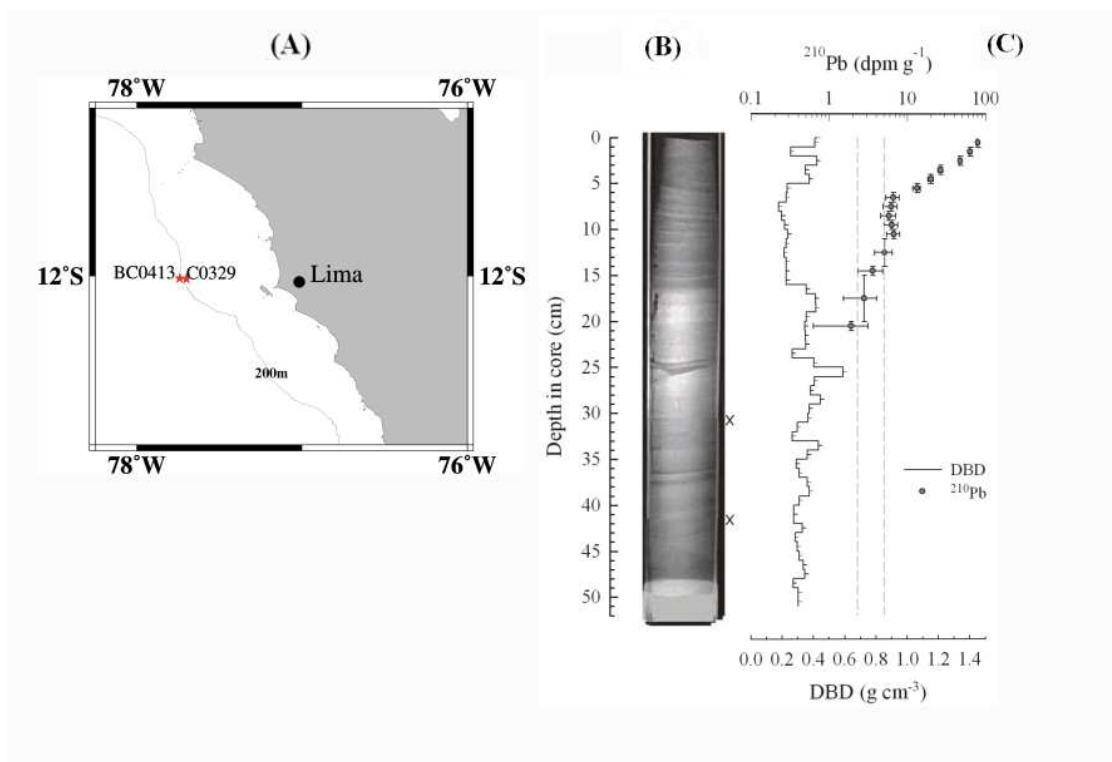


Figure 2

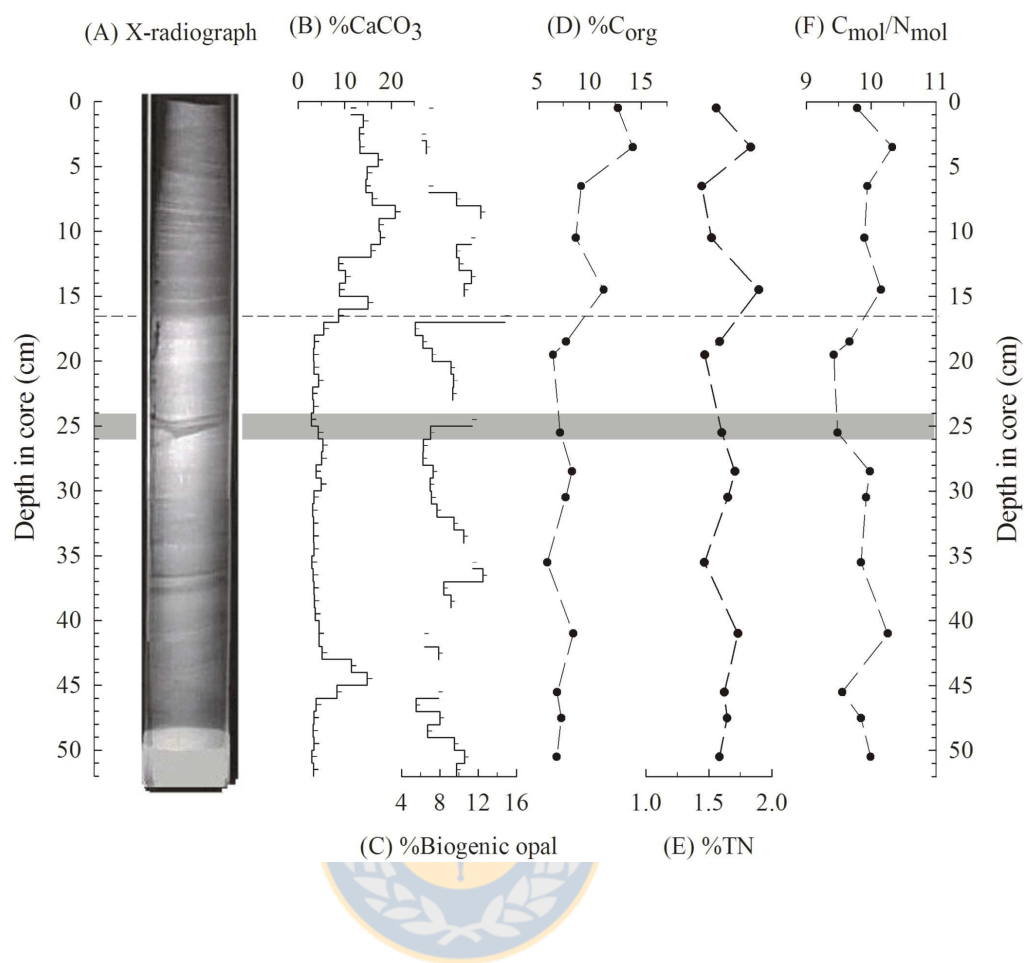


Figure 3

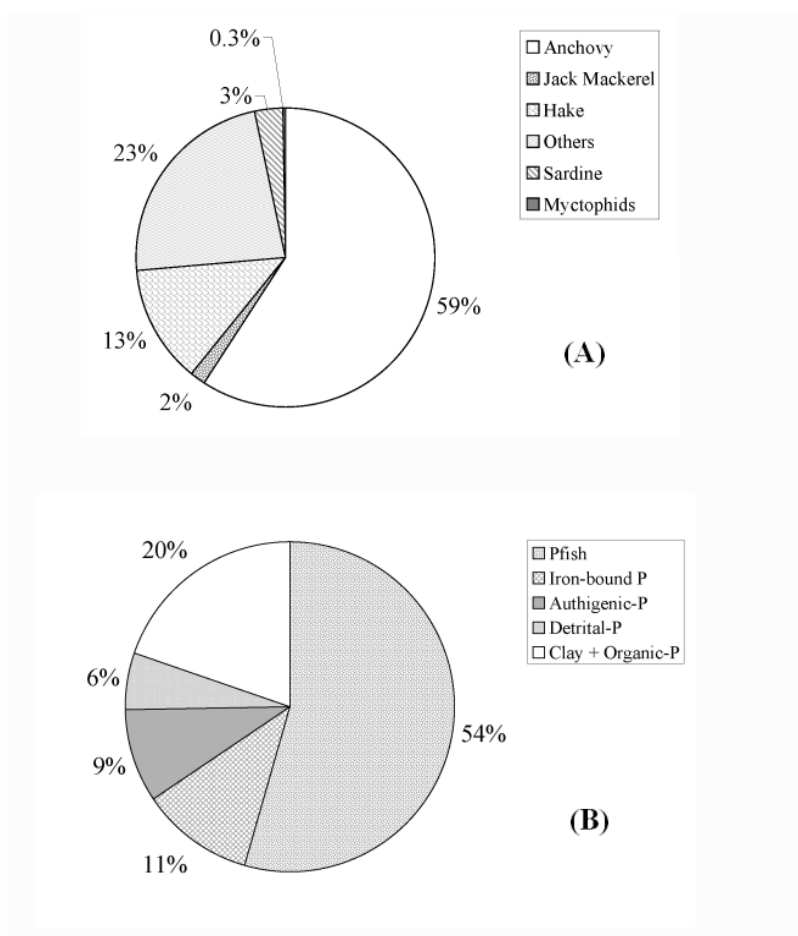


Figure 4

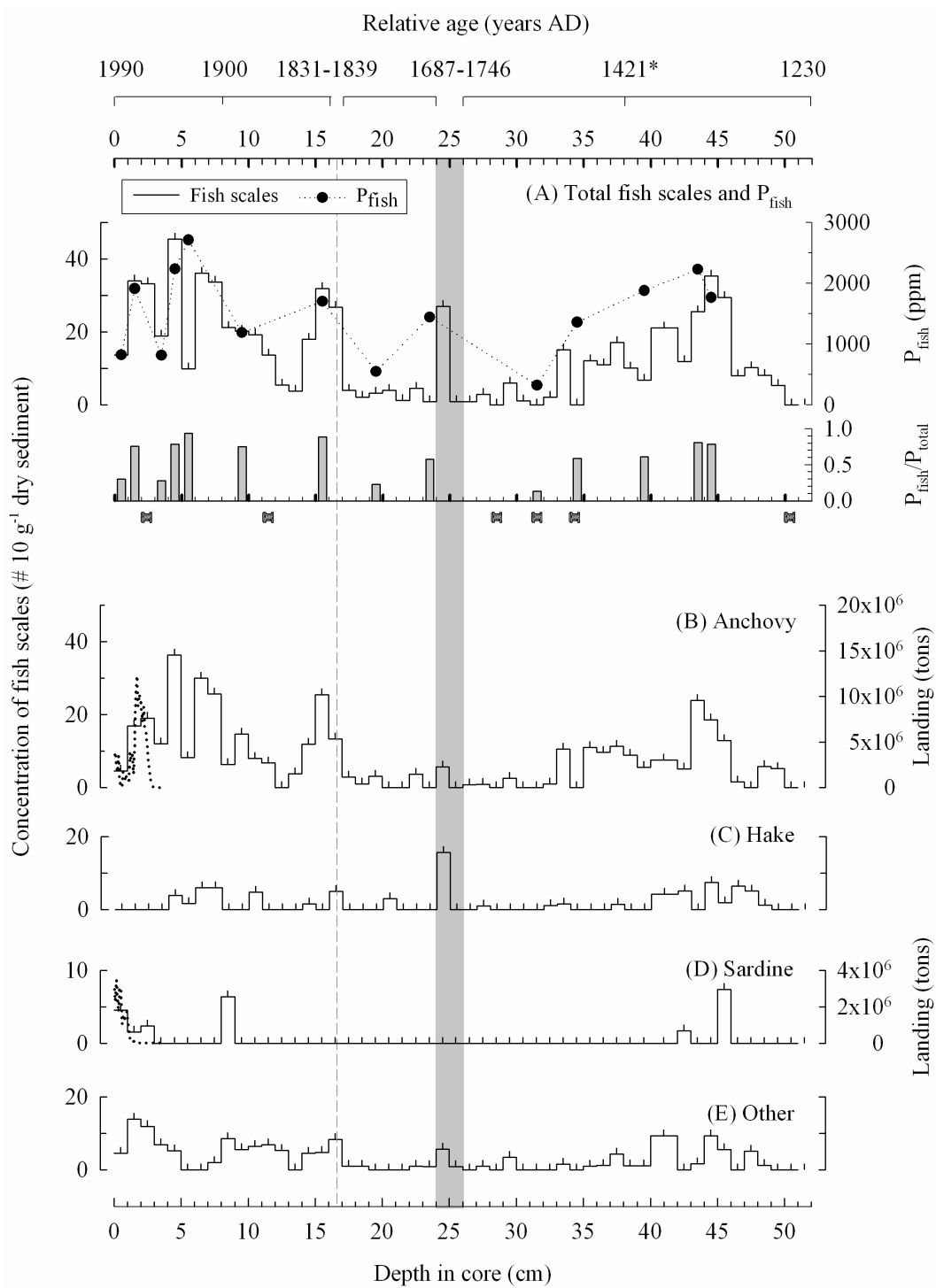


Figure 5

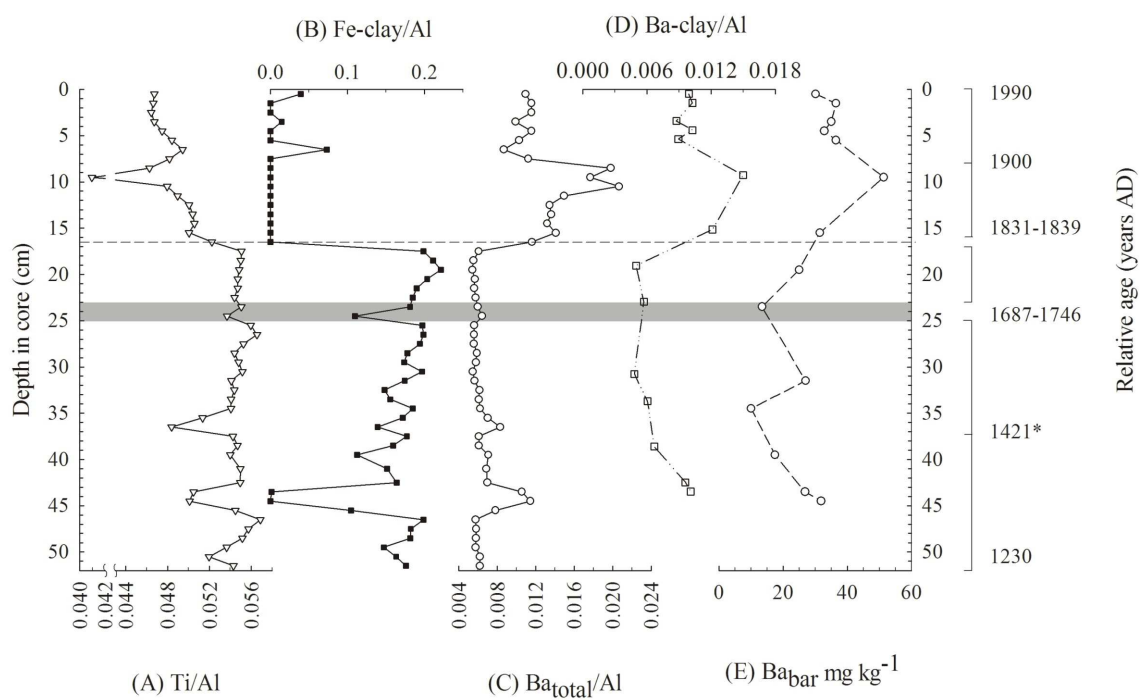
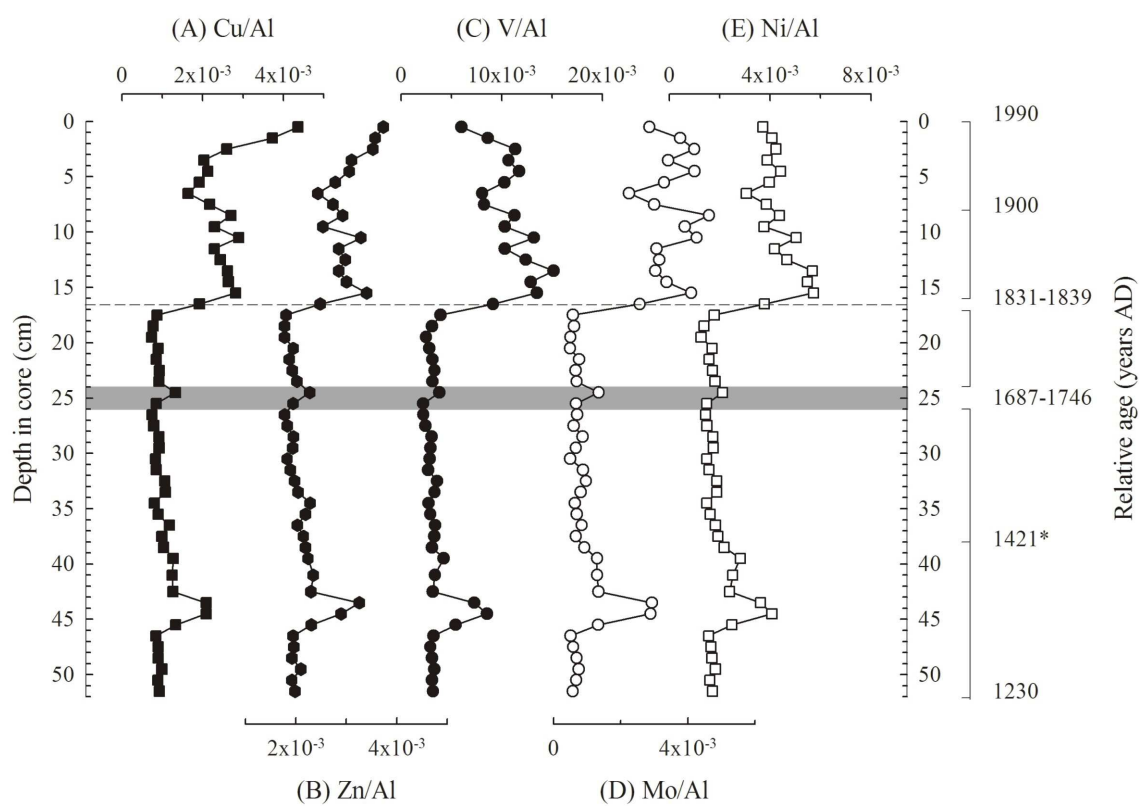


Figure 6



Capítulo 4.- Artículo científico N° 2

Preservación y abundancia de escamas de peces en sedimentos del margen continental de Chile (21° – 36° S) (Manuscrito 2).

Díaz-Ochoa, J.A., Lange, C.B. & De Lange, G. de J. (En revisión). Preservación y abundancia de escamas de peces en sedimentos del margen continental de Chile (21° – 36° S). En revisión en la *Revista Chilena de Historia Natural*.

Resumen:

En este trabajo se presentan recuentos de escamas de peces y concentraciones normalizadas de elementos redox sensibles (Mo/Al, Fe/Al, S/Al) en ocho testigos de sedimento recolectados en la zona de mínimo oxígeno frente a Chile (Iquique: ~20°15'S, Bahía de Mejillones: ~23°S y Concepción: ~36°S). En el norte de Chile (Iquique y Mejillones) predominan escamas de anchoveta (*Engraulis ringens*) y de peces de la familia Myctophidae ($\bar{X} = 90$ y 120 escamas 1000 cm^{-3} , respectivamente) mientras que en Chile centro-sur (Concepción) son más abundantes las escamas de jurel (*Trachurus murphyi*) y de merluza común (*Merluccius gayi gayi*) ($\bar{X} = 140$ y 30 escamas 1000 cm^{-3} , respectivamente). Una fuerte correlación entre las razones Mo/Al, Fe/Al y S/Al en el talud continental frente a Iquique ($r > 0.9$, $p < 0.001$) y en los primeros ~16 cm de la columna de sedimento en Concepción ($r > 0.8$, $p < 0.01$) sugiere condiciones sulfato reductoras persistentes hacia el presente. En la Bahía de Mejillones las razones Mo/Al y S/Al también están estrechamente correlacionadas ($r = 0.85$, $p < 0.001$) pero ninguna de las dos lo está con la razón Fe/Al ($r \leq 0.33$, $p > 0.05$). Este comportamiento sugiere un aumento substancial del aporte terrígeno hacia el presente en la Bahía de Mejillones, el cual sin embargo, no está relacionado directamente con cambios en las condiciones redox. Específicamente, la razón Mo/Al es consistente con condiciones reductoras relativamente

más intensas en los sedimentos de la Bahía de Mejillones ($\bar{X} = 4.8 \pm 2.8 \text{ mg g}^{-1}$) y el talud continental frente a Iquique ($\bar{X} = 0.4 \pm 0.4 \text{ mg g}^{-1}$) que en Concepción ($\bar{X} = 0.072 \pm 0.013 \text{ mg g}^{-1}$). Las observaciones en conjunto revelan una asociación estadísticamente significativa entre la abundancia de escamas de anchoveta y el logaritmo de la razón Mo/Al ($r^2 = 0.46$, $p < 0.0001$). Se concluye que las condiciones altamente reductoras en el norte de Chile probablemente favorecen una alta preservación de escamas y es modulada por fluctuaciones en la intensidad de la zona de mínimo oxígeno. En Concepción, en cambio, es más probable que la alta abundancia poblacional del jurel y de la merluza común constituya un factor clave para la preservación de escamas en sedimento considerablemente menos reductores.



Preservación y abundancia de escamas de peces en sedimentos del margen continental de Chile (21° – 36° S)

Fish scale preservation and abundance in sediments from the continental margin off Chile (21° – 36° S)

Titulo acortado: Abundancia y preservación de escamas de peces, Chile

Short title/Running head: Fish scale preservation and abundance, Chile

Javier A. Díaz-Ochoa^{1,2}, Carina B. Lange² & Gert J. de Lange³

¹ Programa de Postgrado en Oceanografía, Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile

² Departamento de Oceanografía y Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur Oriental, FONDAP-COPAS, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile

³ Department of Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Utrecht University, Budapestlaan 4, 3584 CD, Utrecht, the Netherlands

RESUMEN

En este trabajo se presentan recuentos de escamas de peces y concentraciones normalizadas de elementos redox sensibles (Mo/Al, Fe/Al, S/Al) en ocho testigos de sedimento recolectados en la zona de mínimo oxígeno frente a Chile (Iquique: ~20°15'S, Bahía de Mejillones: ~23°S y Concepción: ~36°S). En el norte de Chile (Iquique y Mejillones) predominan escamas de anchoveta (*Engraulis ringens*) y de peces de la familia Myctophidae ($\bar{X} = 90$ y 120 escamas 1000 cm^{-3} , respectivamente) mientras que en Chile centro-sur (Concepción) son más abundantes las escamas de jurel (*Trachurus murphyi*) y de merluza común (*Merluccius gayi gayi*) ($\bar{X} = 140$ y 30 escamas 1000 cm^{-3} , respectivamente). Una fuerte correlación entre las razones Mo/Al, Fe/Al y S/Al en el talud continental frente a Iquique ($r > 0.9$, $p < 0.001$) y en los primeros ~16 cm de la columna de sedimento en Concepción ($r > 0.8$, $p < 0.01$) sugiere condiciones sulfato reductoras persistentes hacia el presente. En la Bahía de Mejillones las razones Mo/Al y S/Al también están estrechamente correlacionadas ($r = 0.85$, $p < 0.001$) pero ninguna de las dos lo está con la razón Fe/Al ($r \leq 0.33$, $p > 0.05$). Este comportamiento sugiere un aumento substancial del aporte terrígeno hacia el presente en la Bahía de Mejillones, el cual sin embargo, no está relacionado directamente con cambios en las condiciones redox. Específicamente, la razón Mo/Al es consistente con condiciones reductoras relativamente más intensas en los sedimentos de la Bahía de Mejillones ($\bar{X} = 4.8 \pm 2.8 \text{ mg g}^{-1}$) y el talud continental frente a Iquique ($\bar{X} = 0.4 \pm 0.4 \text{ mg g}^{-1}$) que en Concepción ($\bar{X} = 0.072 \pm 0.013 \text{ mg g}^{-1}$). Las observaciones en conjunto revelan una asociación estadísticamente significativa entre la abundancia de escamas de anchoveta y el logaritmo de la razón Mo/Al ($r^2 = 0.46$, $p < 0.0001$). Se concluye que las condiciones altamente reductoras en el norte de Chile probablemente favorecen una alta preservación de escamas y es modulada por

fluctuaciones en la intensidad de la zona de mínimo oxígeno. En Concepción, en cambio, es más probable que la alta abundancia poblacional del jurel y de la merluza común constituya un factor clave para la preservación de escamas en sedimento considerablemente menos reductores.

ABSTRACT

In this work we present fish scale counts and Al-normalized concentrations of three elements related with redox conditions (Mo/Al, Fe/Al, S/Al) from eight sediment cores retrieved within the Oxygen Minimum Zone off Chile (Iquique: $\sim 20^{\circ}15'S$, Bahía de Mejillones: $\sim 23^{\circ}S$ y Concepción: $\sim 36^{\circ}S$). Off northern Chile (Iquique and Mejillones) fish scales of anchovy (*Engraulis ringens*) and individuals of the family Myctophidae were the most abundant ($\bar{X} = 90$ and 120 scales 1000 cm^{-3} , respectively), whereas off Central-south Chile jack mackerel (*Trachurus murphyi*) and hake (*Merluccius gayi gayi*) fish scales were dominant ($\bar{X} = 140$ and 30 scales 1000 cm^{-3} , respectively). A strong correlation between Mo/Al, Fe/Al and S/Al in the sediments from the continental shelf off Iquique ($r > 0.9$, $p < 0.001$) and within the upper ~ 16 cm of the sediment column off Concepción ($r > 0.8$, $p < 0.01$) suggests a recent shift to more sulphate reducing conditions. In Bahía de Mejillones Mo/Al and S/Al ratios are closely correlated ($r = 0.85$, $p < 0.001$) however they were not correlated with the Fe/Al ratio ($r \leq 0.33$, $p > 0.05$). Such a behavior suggests a recent increase of terrigenous input in Mejillones which, nevertheless, is not directly correlated with a shift in redox conditions. On the other hand, Mo/Al ratios indicate that sediments from Mejillones ($\bar{X} = 4.8 \pm 2.8\text{ mg g}^{-1}$) and the continental shelf off Iquique ($\bar{X} = 0.4 \pm 0.4\text{ mg g}^{-1}$) were subjected to more reducing conditions than those from off Concepción ($\bar{X} = 0.072 \pm 0.013\text{ mg g}^{-1}$). As a whole, our results reveal a statistically significant association

between the abundance of anchovy fish scales and the logarithm of the Mo/Al ratio ($r^2=0.46$, $p < 0.0001$). We conclude that the substantially more reducing conditions within the sediments off northern Chile determine a good preservation of fish scales. In contrast off Concepción the high abundance of jack mackerel and hake populations in the water column may constitute a key factor for fish scales preservation even under less reducing conditions.



INTRODUCCIÓN

El estudio de escamas preservadas en sedimentos tiene un gran potencial como herramienta para reconstruir la abundancia de peces en sistemas de límite oriental altamente productivos como la corriente de California (Soutar & Isaacs 1966, 1974, Baumgartner et al. 1992, Holmgren-Urba & Baumgartner 1993, O'Connell & Tunnicliffe 2001, Tunnicliffe et al. 2001, Patterson et al. 2005), la corriente de Benguela (Shackleton 1987) o la corriente Perú-Chile o corriente de Humboldt (Perú central: DeVries & Pearcy 1982, norte y centro de Chile Milessi et al. 2005, Callao y Pisco, Perú: Gutiérrez et al., datos sin publicar). A la fecha, las mejores reconstrucciones de abundancia de peces pelágicos a partir de escamas han sido realizadas en sedimentos laminados recolectados en la cuenca de Santa Bárbara, en la corriente de California, para especies como la anchoveta californiana (*Engraulis mordax* Girard 1854) o la sardina del Pacífico (*Sardinops sagax* Jenyns 1842) permitiendo la reconstrucción de ~1700 años de historia (Soutar & Isaacs 1966, 1974, Baumgartner 1992). Por su parte, en la Corriente Perú-Chile, este tipo de estudios han permitido establecer que frente a Perú la anchoveta (*Engraulis ringens* Jenyns 1842) ha sido la especie de pez pelágico más abundante durante los últimos ~12 mil años (DeVries & Pearcy 1982). No obstante, a lo largo de la costa peruana, los sedimentos de la plataforma y el talud presentan con frecuencia discontinuidades (*slumps*), alta bioperturbación aun con bajos niveles de oxigenación (Kim & Burnett 1988) y significativas variaciones espaciales en la preservación de escamas (DeVries & Pearcy 1982) dificultado la interpretación de la señal de abundancia de peces en el registro.

Frente a Chile, son escasos los estudios que han utilizado las escamas de peces en reconstrucciones paleoceanográficas. Por ejemplo, se ha demostrado que en los sedimentos laminados de la Bahía de Mejillones (norte de Chile), en forma similar a lo observado frente a Perú central, predominan las escamas de anchoveta y en considerable menor proporción las escamas de jurel (*Trachurus murphyi* Nichols 1920) y sardina (*S. sagax*) (Ortlieb et al. 1994, 2000). Estos autores documentan la ocurrencia simultánea de altas abundancias de escamas y foraminíferos bentónicos (e. g. *Bolivina seminuda* Cushman 1911) así como un mayor contenido de carbono orgánico en las láminas más oscuras del sedimento. Los mismos autores comentan que todos estos indicadores biogénicos probablemente aumentaron su acumulación en el sedimento durante períodos con condiciones anóxicas intensificadas (Ortlieb et al. 2000). Recientemente, otro estudio realizado en la Bahía de Mejillones ha establecido que la disolución de escamas es baja en sedimentos superficiales, en profundidades de agua >50 m, caracterizados por concentraciones de oxígeno ambiental <0.1 mL L⁻¹ (Valdés et al. 2008). Además, mediciones de δ¹⁵N y carbono orgánico se correlacionaron positivamente con el flujo de escamas en intervalos de la columna sedimentaria depositados bajo condiciones anóxicas más intensas. Se sugiere, entonces, que la preservación de escamas en el sedimento de la Bahía de Mejillones disminuyó (e.g. Valdés et al. 2008) en períodos durante los cuales este sistema experimentó regímenes de mayor oxigenación (Valdés 2004, Vargas et al. 2007).

Estos antecedentes sugieren un importante potencial de las escamas de peces preservadas en los sedimentos como indicadores de abundancia en el margen chileno. Sin embargo, es evidente que para poder llevar a cabo reconstrucciones paleoecológicas es indispensable incrementar el conocimiento sobre los factores que gobiernan la preservación de escamas en estos ambientes subóxicos y anóxicos. A continuación se hace una breve

revisión de los factores que potencialmente afectan la preservación de restos de peces en ambientes pobres en oxígeno.

Preservación de escamas y huesos de peces

El principal constituyente inorgánico de los huesos y escamas de peces es la apatita biogénica o hidroxiapatita, la cual se encuentra ensamblada en una matriz orgánica de colágeno que impide su inmediata disolución (e.g. Soutar & Isaacs, 1966). Sin embargo, debido a que este compuesto se encuentra insaturado en el océano (e.g. Schenau & De Lange 2000) una vez que los peces mueren o las escamas son liberadas por las especies con escamas deciduas, las mismas tienden a disolverse rápidamente en la columna de agua y el sedimento superficial. La alta solubilidad de la apatita biogénica se explica además por la forma irregular y superficie relativamente grande de sus cristales (Schenau & De Lange 2000). No obstante, cuando los restos de peces alcanzan el fondo marino los grupos hidroxilo eventualmente son sustituidos por flúor durante la diagénesis transformándose en carbonato de fluorapatita (i.e. apatita autigénica) que es más resistente a la degradación (Schenau & De Lange 2000).

Estudios realizados en áreas de afloramiento revelan que la cantidad de restos de peces acumulados en los sedimentos aumenta en profundidades de agua ≤ 600 m (e.g. Soutar & Isaacs 1974, Baumgartner et al. 1992: en la cuenca de Santa Bárbara, DeVries & Percy 1982 en Perú central, Schenau & De Lange 2000 en el norte del Mar de Arabia). Este rango de profundidad de agua coincide con la ubicación de los núcleos de las zonas de mínimo oxígeno (ZMO) en los principales sistemas de límite oriental del océano mundial (e.g. Helly & Levin 2004), razón por la cual se piensa que las condiciones anóxicas son el

principal factor que determina la preservación de escamas (e.g. Soutar & Isaacs 1966, Baumgartner et al. 1992). No obstante es de anotar, por ejemplo, que algunos estudios llevados a cabo en el margen peruano sugieren que la abundancia de restos de peces desempeña un papel importante en la regulación del flujo de fosfato en el agua intersticial, así como en la formación de apatita autigénica (Suess 1981), proceso que también tiene lugar en sedimentos dentro de la ZMO del Mar Árabe (Schenau et al. 2000, Babu & Nath 2005). A diferencia de la escala global, en la cual la apatita biogénica es un sumidero insignificante de fósforo reactivo, en las ZMO este mecanismo es potencialmente más importante (e.g. Schenau & De Lange 2000). Sin embargo, en la actualidad los procesos de regeneración y acumulación de apatita biogénica permanecen muy poco estudiados y existe alguna evidencia conflictiva sobre el grado de preservación (i.e. disolución) de restos de peces en sedimentos dentro de las ZMO en diferentes partes del océano. Por ejemplo, en el norte del mar Árabe el contenido de fósforo derivado de restos de peces (P_{fish} *sensu* Schenau & De Lange 2000) muestra mayor variabilidad a lo largo del talud continental comparado con la producción de peces en la columna de agua, sugiriendo que la distribución espacial de la apatita biogénica allí está gobernada por la regeneración (Schenau & De Lange 2000). En contraste, en Saanich Inlet (corriente de California, Canadá), la formación de sedimentos laminados en un ambiente muy poco oxigenado ha favorecido la preservación de escamas y series de tiempo derivadas de diferentes testigos exhiben patrones espaciales consistentes entre sí (e.g. O'Connell & Tunnicliffe 2001). Por su parte, en el margen peruano, la disolución de restos de peces podría explicar la existencia de altos niveles subsuperficiales de fosfatos no explicables exclusivamente por la degradación de materia orgánica y la reducción de óxidos de hierro en algunas localidades (e.g. Froelich et al. 1988). En efecto, una fracción significativa del fósforo asociado con

restos de peces puede ser regenerada en las primeras fases de la diagénesis, siendo este proceso potencialmente afectado por las condiciones redox del agua de fondo y del agua intersticial (Schenau & De Lange 2000, Slomp et al. 2002). Es de esperar que durante la diagénesis suboxica (desnitrificación, reducción del Mn y del Fe) y anoxica (reducción del sulfato) no se produzca acidez en el sedimento si el H₂S es consumido para formar pirita (FeS₂), con lo cual se desfavorece la disolución de restos de peces. Igualmente, los niveles de fosfato procedentes de la descomposición de materia orgánica en estos ambientes suelen ser elevados y por consiguiente tienden a disminuir la solubilidad de la apatita biogénica (Schenau & De Lange 2000).

Teniendo en cuenta que a lo largo del margen chileno la preservación de escamas probablemente depende de las variaciones en las condiciones redox del sedimento, este trabajo tiene por objetivo general analizar las variaciones espaciales y en función de profundidad de testigo del contenido de escamas en tres localidades ubicadas dentro de la ZMO en el norte (Iquique y Bahía de Mejillones) y el centro sur de Chile (Concepción). La dimensión espacial es considerada debido a que existe evidencia que indica que la ZMO frente a Chile presenta gradientes de intensidad tales como los que se observan en el norte (i.e. OMZ permanente y relativamente somera) y en el centro sur (i.e. OMZ más profunda y bien formada sólo en primavera-verano) (e.g. Paulmier et al. 2006). Considerando el amplio rango latitudinal incluido en las muestras utilizadas, se espera observar patrones espaciales de disminución del contenido de escamas en el sedimento en función de los cambios de intensidad de la ZMO. Para evaluar las condiciones de oxigenación se utilizan principalmente mediciones de Mo en el sedimento. Este elemento traza redox-sensible ha ganado recientemente aceptación como indicador de paleo oxigenación debido que se

encuentra enriquecido en sedimentos sulfato reductores y bajas concentraciones de oxígeno (e.g. Nameroff et al. 2004, Meyers et al. 2005, Dean et al. 2006).

Características de los sedimentos en el área de estudio

En el margen Perú-Chile, entre los diferentes tipos de material biogénico exportado hacia el lecho marino se encuentran abundantes restos de peces (e.g. Perú¹: DeVries & Percy 1982, Schwartzlose et al. 1999, Bahía de Mejillones: Ortlieb et al. 1994, 2000, norte y centro de Chile: Milessi et al. 2005) y fosforitas tanto frente a Perú (e.g. Burnett 1977, Froelich et al. 1988, Kudrass et al., 2002) como frente a Chile (e.g. Burnett 1977, Baturin 2002). En Chile, los sedimentos sobre la plataforma continental de Iquique constan de abundante detrito orgánico, restos de peces y nódulos de fosforita pobremente consolidados (Muñoz et al. 2004), mientras que el contenido de ópalo biogénico varía entre ~2% y ~16% (Sánchez et al.²). Más hacia el sur, en la Bahía de Mejillones, los sedimentos se acumulan conformando láminas claras y oscuras de coloración oliva-claro a oliva-oscuro muy ricas en carbono orgánico (~2->6%) y en ópalo biogénico (>36-65%) (Vargas et al. 2004). En esta localidad se encuentran también restos de huesos fosfatados y escamas (Ortlieb et al., 2000). Avanzando aún más al sur, frente a Concepción, los sedimentos son oliva grisáceos, con niveles de materia orgánica total >10% (Gutiérrez et al. 2000) equivalente a ~3-5% de carbono orgánico (Muñoz et al. 2007), el ópalo biogénico fluctúa entre 5 y 11% (Contreras et al. 2007). En la actualidad se cuenta con muy pocos antecedentes acerca de la presencia de restos de peces en Chile centro sur, habiéndose solamente informado la ocurrencia de

huesos y escamas frente a Concepción (~36°S) entre 120 y 300 m de profundidad de agua (Milessi et al. 2005).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los análisis se basan en ocho testigos de sedimento recolectados en tres localidades del norte y centro-sur de Chile (Tabla 1) durante diferentes cruceros oceanográficos organizados por el Centro FONDAP-COPAS de la Universidad de Concepción entre 2002 y 2005 (Fig. 1). Los testigos se cortaron en intervalos de 0.5-1 cm y 2 cm en el laboratorio de Paleoceanografía de la Universidad de Concepción y las muestras húmedas fueron guardadas en bolsas plásticas a 4° C para su posterior análisis.

Análisis químico

Aproximadamente ¼ en peso húmedo de las muestras fue liofilizado y reservado para este análisis. Se pesaron ~125 mg de sedimento liofilizado para someterlos a destrucción total con una mezcla de ácidos fuertes (HClO₄ al 72%, HNO₃ al 4.5% y HF al 48%) y posteriormente determinar la concentración de elementos con un espectrómetro de plasma acoplado inducido de emisión óptica (ICP-OES Perkin Elmer Optima 3000). Estas determinaciones se llevaron a cabo en el laboratorio de geoquímica marina de la Universidad de Utrecht (Holanda) siguiendo la metodología recomendada por Schenau & De Lange (2000). Por razones prácticas (i.e. disponibilidad de personal de laboratorio,

tiempo de análisis) solamente se seleccionaron cuatro testigos para estos análisis (RhC-1, MUC-1B, BX-3 y BX-2). En el presente trabajo se entregan los resultados correspondientes a los elementos Fe, Mo y S que son indicadores del estado redox del sedimento debido a su asociación con las reacciones de reducción de sulfato (e.g. Meyers et al. 2005, Dean et al. 2006).

Teniendo en cuenta que las muestras en su mayoría fueron tomadas sobre la plataforma continental (sólo el testigo RhC-1 fue recolectado en el talud) la concentración de elementos fue normalizada dividiendo por el contenido de Al (determinado también por destrucción total) para corregir por el ingreso de material terrígeno.

Recuentos de escamas

Los restantes $\frac{3}{4}$ de muestra se filtraron en húmedo con tamices de 250, 150 y 63 μm y las escamas fueron separadas manualmente. Sólo en la fracción $>250 \mu\text{m}$ se encontraron escamas no fragmentadas identificables a nivel de especie y/o familia, siendo estos resultados los únicos que se presentan en este trabajo. La identificación de escamas se hizo con ayuda de una lupa binocular Olympus SZ40 comparando con material fresco y claves fotográficas (Patterson et al. 2002). La abundancia de escamas se calculó dividiendo los recuentos por el volumen de sedimento húmedo de la muestra expresado los resultados en unidades de número por 1000 cm^3 . Para estimar el volumen de la muestra se multiplicó el área del tubo colector (Tabla 1) por el grosor de corte de cada loza de sedimento. Estos análisis se realizaron en el Laboratorio de Paleoceanografía de la Universidad de Concepción.

Procesamiento de la información

Se graficaron los diferentes indicadores en función de la profundidad de testigo para Iquique, Mejillones y Concepción. Debido a la persistencia en el sedimento de señales de alta frecuencia se calcularon promedios entre muestras contiguas en intervalos de 6 cm. Este procedimiento es, en cierta medida, análogo a la utilización de filtros de frecuencias pasa-baja en los análisis de series de tiempo (e.g. Emery & Thompson 2001). Además, para hacerse a una idea de los patrones de largo plazo de la acumulación de escamas en las diferentes localidades se promedió su abundancia en los primeros 24 cm de profundidad de testigo.

Con el fin de analizar los efectos de los cambios en las condiciones redox sobre la preservación de escamas se hizo un análisis de regresión lineal entre la abundancia de escamas y la razón Mo/Al, incluyendo información de testigos recolectados en los tres sitios de muestreo. En este análisis se combinaron (1) mediciones del contenido de escamas y de la razón Mo/Al en un mismo testigo (RhC-1, Iquique), (2) mediciones de ambas variables en testigos diferentes pero recolectados en el mismo lance (MUC-1A y MUC-1B, Mejillones) y (3) datos de testigos no tomados simultáneamente pero procedentes de localidades muy próximas entre sí (BX-2, BX-3; razón Mo/Al y BX-2, MUC-2, MUC-3; recuento promedio de escamas, frente a Concepción).

RESULTADOS

Escamas de peces

En los sedimentos recolectados frente a Mejillones, Iquique y Concepción, se encuentran abundantes escamas de anchoveta, jurel, merluza y sardina. Sobre el talud continental frente a Iquique y en la Bahía de Mejillones se observan además cantidades apreciables de escamas pequeñas (~1 mm) identificadas como pertenecientes a miembros de la familia mesopelágica Myctophidae (Salvatecci R comunicación personal).

Los promedios en 24 cm de la columna de sedimento indican que las escamas de anchoveta y de Myctophidae son más abundantes en Iquique y en Mejillones (Fig. 2A, B) que en Concepción donde predominan las escamas de jurel (Fig. 2C). Latitudinalmente, la abundancia de escamas de anchoveta y Myctophidae disminuye en sentido norte-sur siguiendo un patrón opuesto al del jurel mientras que, de la costa a mar abierto, las escamas de Myctophidae son considerablemente más abundantes sobre el talud (~200 escamas 1000 cm⁻³) que en la plataforma continental frente a Iquique (10 escamas 1000 cm⁻³, Fig. 2B). Por otra parte, la abundancia de escamas de merluza (Fig. 2D) y de sardina (Fig. 2E) es aproximadamente un orden de magnitud más baja que la de anchoveta o jurel. Con respecto al jurel la máxima abundancia de escamas se encuentra frente a Concepción (>100 escamas 1000 cm⁻³) superando en aproximadamente un orden de magnitud los valores observados frente a Iquique o en Mejillones (~5-50 escamas 1000 cm⁻³, Fig. 2C).

Por intervalos de profundidad de sedimento (i.e. 0-6, 6-12, 12-18 y 18-24 cm) la abundancia de escamas presenta los siguientes patrones:

(1) predominio de escamas de Myctophidae en el talud de Iquique (~>300 escamas 100 cm⁻³, 0-12 cm, Fig. 3A) y en Mejillones (~>500 escamas 1000 cm⁻³, 18-24 cm, Fig. 3C),

(2) altas concentraciones de escamas de anchoveta ($\sim > 200$ escamas 1000 cm^{-3}) tanto en la plataforma continental frente a Iquique (6-12 cm, Fig. 3B) como en Mejillones (12-18 cm, Fig. 3C),

(3) abundantes escamas de jurel sobre la plataforma frente a Concepción en profundidades de testigo ≤ 12 cm ($100 \sim > 300$ escamas 1000 cm^{-3} , Fig. 3D) y en menor cantidad ($\sim < 100$ escamas cm^{-3}) en la plataforma frente a Iquique, en profundidades de testigo de 6 a 18 cm (Fig. 3B),

(4) ausencia de escamas de jurel en todas las localidades estudiadas en profundidades de testigo > 18 cm (Fig. 3).

Entre las escamas de otras especies con menor representación las de merluza común (*Merluccius gayi gayi* Guichenot 1848) son más abundantes frente a Concepción en profundidades de testigo < 12 cm ($\sim 40-70$ escamas 1000 cm^{-3} , Fig. 3D), mientras que las de sardina son más abundantes sobre la plataforma continental de Iquique entre 12 y 24 cm de profundidad de testigo ($25 \sim 40$ escamas 1000 cm^{-3} , Fig. 3B).

Elementos redox-sensibles

En el talud de Iquique (RhC-1) las razones Fe/Al, S/Al y Mo/Al permanecen casi constantes en profundidades de testigo > 6 cm pero hacia la superficie las mismas prácticamente se duplican (Fig. 4A). Por su parte en la Bahía de Mejillones (MUC-1B) las razones Fe/Al y S/Al aumentan hacia la superficie en profundidades de testigo < 12 cm

mientras que la razón Mo/Al se mantiene constante en todos los intervalos excepto entre 6 y 12 cm de profundidad de testigo donde alcanza valores máximos (Fig. 4B). En cambio, frente a Concepción (testigos BX-2 y BX3) estas tres razones cambian poco en función de la profundidad de testigo (Fig. 4C).

Razón Mo/Al y abundancia de escamas

Teniendo en cuenta que las escamas de anchoveta son las únicas bien representadas simultáneamente en las tres áreas de muestreo, en este trabajo se presentan los resultados de la regresión escamas-Mo/Al correspondientes solamente a esta especie (Fig. 5A). Si bien el ajuste de un modelo de regresión lineal simple es significativo ($r^2 = 0.34$, $p = 0.023$) una transformación logarítmica de la razón Mo/Al aumenta substancialmente el coeficiente de determinación de dicha regresión ($r^2 = 0.46$, $p < 0.0001$, Tabla 2). Una relación no lineal como la establecida revela que la tasa de cambio de la abundancia de escamas de anchoveta es considerablemente más elevada para razones Mo/Al $\leq 0.1 \text{ mg g}^{-1}$ mientras que tiende a estabilizarse alrededor de valores mínimos para razones Mo/Al $\geq 1 \text{ mg g}^{-1}$ (Fig. 5B).

DISCUSIÓN

En este trabajo se han presentado los resultados correspondientes a recuentos de escamas como indicadores de abundancia de peces, así como de las razones Fe/Al, Mo/Al, S/Al, para evaluar la influencia de las condiciones redox sobre la preservación de la señal de productividad de peces exportada a los sedimentos dentro de la ZMO del margen Chileno.

Los patrones de abundancia de escamas en las diferentes localidades muestreadas (Fig. 2) coinciden con la historia de pesquerías basadas en la captura de anchoveta en Perú y el norte de Chile, y de merluza común y jurel en el centro-sur de Chile (e.g. Serra 1983, Arcos et al. 2001, Zuzunaga 2002).

Un análisis más detallado de los sedimentos por intervalos de profundidad (dimensión temporal) revela que la abundancia de escamas ha fluctuado importantemente en el pasado (Fig. 3). De esta forma, se establecen los siguientes patrones para las especies cuyas escamas fueron encontradas en el sedimento.

Anchoveta y sardina

La mayor abundancia de escamas de anchoveta sobre la plataforma continental frente a Iquique (Figs. 3A, B) es consistente con la distribución de sus poblaciones entre 0 y 100 m de profundidad de agua frente a Chile-Perú, (e.g. Serra 1983, Gutiérrez et al. 2007). Por otro lado, la presencia de un máximo subsuperficial de escamas común a los testigos BX-1 (plataforma, frente a Iquique) y MUC-1B (Bahía de Mejillones) (Figs. 3B, C) con un desfase de ~6 cm puede corresponder a un mismo evento si se suponen tasas de sedimentación lineales de ~0.1 cm año⁻¹ (BX-1) y de ~0.16 cm año⁻¹ (MUC-1A) para las respectivas localidades (Tabla 1). En este sentido, los sedimentos de Iquique y Mejillones registran la dinámica correspondiente a la unidad de pesquería del norte de Chile (Serra 1988) y revelan una tendencia decreciente hacia el presente para la anchoveta en esta región (Figs. 3A, B).

Con respecto a la sardina, sus escamas están poco representadas en las muestras siendo, por lo tanto, aventurado sugerir patrones para sus poblaciones en el área de estudio. Es más,

el hecho de que la abundancia de escamas de sardina en el sedimento sea ~5 veces menor que la anchoveta (Fig. 3) es sorprendente pues al parecer no ha quedado registrado en el sedimento el período de altos desembarques de sardina tanto en Perú como en el norte de Chile ocurrido durante la década de 1980 (e.g. Schwartzlose et al. 1999, Yáñez, datos de desembarque, Com. Pers.). Una explicación posible es que las localidades donde se recolectaron los sedimentos contienen pocas escamas de sardina debido al hábito más oceánico de esta especie (hasta 200 millas náuticas mar afuera) comparado con el de la anchoveta (25 y 50 millas de la costa) (Serra 1983). Si las poblaciones de sardina están espacialmente más dispersas que las de anchoveta esto genera un potencial problema de representatividad debido a la pequeña área muestreada con los testigos (<100 cm², Tabla 1). Por otro lado, se ha determinado que en sedimentos superficiales en la Bahía de Mejillones las escamas de sardina son más abundantes que las de anchoveta en profundidades de agua entre 40 y 60 m, mientras que lo opuesto es observado en profundidades de ~90 m (Valdés et al. 2008). Estos autores consideran que las escamas de sardina podrían ser menos afectadas por los cambios de oxigenación del sedimento que las escamas de anchoveta. Sin embargo, esa hipótesis no explica la baja representatividad de las escamas de sardina en el MUC-1B. Por lo tanto, parece más probable la hipótesis alternativa de que las escamas de sardina y anchoveta son transportadas verticalmente de forma distinta por las corrientes de la Bahía de Mejillones (Valdés et al. 2008). No obstante, en la actualidad no es posible determinar con certeza la causa de la baja frecuencia de escamas de sardina en las muestras, siendo necesaria más investigación sobre este importante problema paleoceanográfico.

Mictófidos

Estos peces mesopelágicos extremadamente abundantes en todos los océanos y que habitan entre los 200 y 1000 m de profundidad (Salvanes & Kristoffersen 2001), actualmente no constituyen un objetivo para las pesquerías en Chile, razón por la cual no existen series históricas de desembarque. Sin embargo, información obtenida en cruceros oceanográficos recientes en el norte de Chile indica que ~60% del ensamblaje de peces mesopelágicos del área está constituido por especies de mictófidios como *Triphoturus mexicanus* Gilbert (1890), *Diogenichthys atlanticus* Tåning (1928) y *Scolopengys tristis* Alcock (1890), asociadas con aguas tropicales y subtropicales de la “lente de agua cálida Arica-río Loa” (isoterma de 18 °C y la isohalina de 34.5) (Sielfeld et al. 1995). Se piensa que estos peces mesopelágicos pueden servir como indicadores de influencia oceánica y de la dinámica del Agua Ecuatorial Subsuperficial en el área costera (Sielfeld et al. 1995, Rodríguez-Graña & Castro 2003, Sielfeld & Kawaguchi 2004). Por consiguiente, altas abundancias de escamas de mictófidios en el talud continental frente a Iquique (Figs 2 y 3) sugieren cambios en el pasado en los cuales el ecosistema de afloramiento pudo haber estado sometido a mayor influencia desde el trópico y/o el océano abierto (i.e. ingreso de aguas relativamente más cálidas).

Jurel

En Concepción, las altas abundancias de escamas de jurel en los primeros 12 cm de la columna de sedimentos sugieren un gran aumento en la frecuencia de esta especie en el área costera frente a Chile centro-sur hacia el presente (Fig. 3D). Esta observación es consistente con determinaciones de biomasa en el área oceánica frente a Chile realizadas recientemente (e.g. Bertrand et al. 2004). En escala estacional, algunos estudios indican que

el jurel varía su distribución espacial a lo largo de la costa dependiendo de la posición latitudinal de la isoterma de los 15 °C, en estrecha relación con el desarrollo de su ciclo vital y con la disponibilidad de alimento (Arcos et al. 2001). No obstante, estos patrones observados en el presente bien podrían estar fuertemente distorsionados por los altos niveles de explotación pesquera ejercidos sobre las poblaciones (e.g. Sepúlveda et al. 2001).

El jurel es un depredador generalista que durante sus extensas migraciones se alimenta de una diversidad de presas tanto en ambientes costeros como oceánicos (Konchina 1980). También se ha descrito a los eufáusidos y los peces mesopelágicos como las presas principales del jurel (e.g. Quiñones et al. 1997, Medina & Arancibia 2002, Bertrand et al. 2004). Por consiguiente, la distribución espacial del jurel podría depender también de la distribución de sus presas. A este respecto, cabe mencionar que en el testigo BX-2, utilizado principalmente para análisis químicos, se observaron varias escamas de Myctophidae (resultados no mostrados) que no fueron detectadas en los testigos destinados expresamente para los recuentos. En este trabajo no es posible establecer una asociación directa entre la abundancia de escamas de jurel y las escamas de Myctophidae frente a Concepción. Sin embargo, especulamos que futuras investigaciones basadas en tamaños de muestra mayores podrían identificar períodos con aumentos simultáneos en el contenido de escamas de jurel y Myctophidae. Estos períodos estaría además caracterizados por una mayor influencia ecuatorial y/o oceánica frente a Chile.

Merluza

La merluza es una especie batidemersal que habita entre 50 y 500 m de profundidad en la columna de agua (<http://www.fishbase.org>). En las muestras tomadas sobre el talud continental frente a Iquique y frente a Concepción, la abundancia de escamas fue relativamente alta en profundidades de testigo >12 cm en la primera localidad y en profundidades <12 cm en la segunda (Figs. 3A, D). Al comparar con las estadísticas de desembarque de merluza, se observa que en la década de 1940, la flota pesquera se concentró entre 33.5 y ~37°S, llegando a obtener capturas anuales máximas >100 mil toneladas al final de la década de 1960 (Instituto de Fomento Pesquero, www.ifop.cl). Sin embargo, durante los 1980s los desembarques llegaron a mínimos históricos (<30 mil toneladas) implicando una reducción drástica >70%. Posteriormente, hacia finales de la década de 1990 y el comienzo de la década de 2000, la pesquería de merluza produjo nuevamente altos desembarques (>80 mil toneladas) (Subsecretaría de Pesca, www.subpesca.cl, Oyarzún et al. 1997), al tiempo que las evaluaciones directas con métodos acústicos revelaron altas concentraciones poblacionales en las áreas de pesca de Chile centro-sur (e.g. Lillo et al. 2001). Por consiguiente, los registros de escamas de merluza presentados en este trabajo son consistentes con las tendencias de abundancia sugeridas por las estadísticas de pesca y las evaluaciones directas, revelando una mayor cantidad de escamas de esta especie frente a Concepción hacia el presente (profundidad de testigo <12 cm, Fig. 3D). Por otra parte, dado que la abundancia promedio de escamas de merluza en 24 cm de la columna de sedimento muestra valores similares en los testigos de Iquique y Concepción (Fig. 2D), los patrones observados por intervalos de profundidad de 6 cm sugieren que esta especie podría pasar por períodos en que se amplía su distribución latitudinal (Figs. 3A, D). Esta hipótesis se basa en la suposición de que las poblaciones de merluza común en Chile conforman un solo stock, tal como ha sido sugerido por algunos

autores (Oyarzún et al. 1997, Galleguillos et al. 2000) o alternativamente, que existen dos stocks, uno asociado con Puerto Montt y otro central asociado con los puertos de Talcahuano, San Antonio y Coquimbo (e.g. Oliva & Ballón 2002). En este sentido, futuros estudios basados en un mayor tamaño de muestras ayudarán a describir posibles contracciones en el rango y/o cambios de abundancia de la merluza común frente a Chile central (Figs. 3A, D).

Indicadores redox en el sedimento

Las razones Mo/Al en Mejillones, aproximadamente ~1 orden de magnitud más altas que en Iquique y ~2 ordenes de magnitud mayores que en Concepción (un patrón semejante fue observado para la razón S/Al), concuerdan con la existencia de gradientes espaciales en la intensidad de la ZMO frente a Chile (Fig. 4). En función de la profundidad de testigo, la variabilidad en la razón Mo/Al está muy ligada con las razones Fe/Al y S/Al en el testigo RhC-1 (talud de Iquique, $r > 0.9$, $p < 0.001$) sugiriendo que para profundidades de testigo ≤ 12 cm es probable una intensificación en las condiciones anóxicas y la precipitación de pirita (Fig. 4A). Por su parte, la razón Mo/Al en el área de Mejillones (MUC-1B) es la más alta de las tres áreas analizadas y revela para el intervalo 6-18 cm una probable intensificación de la anoxia (Fig. 4B). En contraste con los testigos RhC-1 (Iquique), BX-2 y BX-3 (Concepción), en el testigo MUC-1B (Mejillones) las razones Fe/Al y S/Al fueron más variables, verificándose además una correlación significativa sólo para las razones Mo/Al y S/Al ($r = 0.85$, $p < 0.001$). En cambio, en Mejillones la relación Fe/Al exhibe una fuerte tendencia creciente hacia el presente, la cual es prácticamente independiente de las razones Mo/Al y S/Al ($r \leq 0.33$, $p > 0.05$, Fig. 4B). De hecho, el aumento de la razón Fe/Al

en el MUC-1B podría estar dominado por una señal terrígena, tal como se infiere de un hipotético incremento hacia el presente en la intensidad de los vientos para la Bahía de Mejillones (e.g. Vargas et al. (2007).

A diferencia de las muestras recolectadas en Mejillones o Iquique, en los testigos recolectados frente a Concepción (BX-2, BX-3) la razón Mo/Al fue más baja (0.07 ± 0.02 mg g^{-1}). Este valor está bastante cerca del umbral de ~ 1 mg g^{-1} que delimita los sedimentos dentro de la ZMO inferidos de los datos para Perú central de Böning et al. (2004).

Aparentemente las fluctuaciones en el estado redox del sedimento en Concepción en el pasado reciente no han sido de tanta amplitud como las que habrían tenido lugar frente a Iquique (RhC-1) o la Bahía de Mejillones (MUC-1B) (Fig. 4C). Sin embargo, es interesante resaltar que al igual que las muestras tomadas en el talud frente a Iquique (RhC-1) frente a Concepción las razones Mo/Al, Fe/Al y S/Al tuvieron una fuerte correlación entre sí en el testigo BX-3 ($r > 0.8$, $p < 0.01$), el cual corresponde a los 16 cm más superficiales de la columna de sedimento. Por lo tanto, es probable que hacia el presente los sedimentos de Concepción también hayan experimentado un aumento significativo en su carácter reductor.

Preservación

La relación logarítmica encontrada entre la abundancia de escamas y la razón Mo/Al para la escamas de anchoveta (Fig. 5A) sugiere que la interpretación de los registros de escamas en los sedimentos frente a Chile debe ser hecha teniendo en cuenta la evolución pasada de la intensidad de la zona de mínimo oxígeno. Estos efectos son especialmente notorios para las observaciones de Concepción e Iquique que están menos dispersas alrededor de la recta que

las observaciones de Mejillones (Fig. 5A). La mayor dispersión en la Fig. 5A en las muestras de Mejillones se debe a la elevada cantidad de escamas encontradas en intervalo 12-18 cm (Fig. 3C), las cuales sin embargo, no están asociadas con un incremento apreciable de razón Mo/Al (Fig. 4B) sugiriendo que esta señal está asociada mayormente con productividad y poco con preservación. En particular, aunque con la información disponible no es posible separar la señal de preservación de la de productividad, la relación estadística establecida entre la abundancia de escamas y la razón Mo/Al (Fig. 5A) permite sugerir que para razones Mo/Al ≥ 1 mg g⁻¹ la señal de productividad contenida las escamas de anchoveta en los sedimentos es poco afectada por los cambios de oxigenación, mientras que en sedimentos con razones Mo/Al entre 0.1 y 0.5 mg g⁻¹ los registros deberían ser utilizados con mayor precaución (Fig. 5B).

Por otra parte, es importante mencionar que es probable que la preservación de las escamas en el sedimento varíe también dependiendo de la especie. Al microscopio se observa que la constitución de la escamas de merluza es más robusta comparada con las escamas de anchoveta o de sardina las cuales, a su vez, tienen un aspecto similar a hojas y frecuentemente aparecen desgarradas. En el área de Concepción las escamas de jurel en general aparecieron en buenas condiciones siendo raro encontrar escamas desgarradas o incompletas como en el caso de la anchoveta o de la sardina.

También es interesante notar que aunque la razón Mo/Al en Concepción fue ligeramente más alta en profundidades de testigo <18 cm (Fig. 4C), la abundancia de escamas de jurel solamente aumentó en forma pronunciada a partir de profundidades <12 cm (Fig. 3C). Este hecho sugiere que las escamas del jurel no son tan afectadas las condiciones de oxigenación como, por ejemplo, las escamas de anchoveta. Podría pensarse entonces, que altas tasas de

sedimentación combinadas con una alta abundancia del jurel en el mar costero (e.g. Arcos et al. 2001) pudieron favorecer la preservación del registro de escamas frente a Concepción.

Las abundancias de escamas de peces en los sedimentos disóxicos y subóxicos del margen continental frente a Chile son útiles en reconstrucciones paleoecológicas. Las abundancias de escamas en estos sedimentos indican que la anchoveta es la especie dominante en el norte de Chile, en tanto que el jurel y la merluza predominan en la zona centro-sur. En las localidades frente al norte de Chile la preservación de escamas en los sedimentos es poco afectada por las fluctuaciones en la oxigenación mientras que en el centro-sur de Chile, los registros correspondientes a especies como el jurel y la merluza están determinados no solo por la abundancia en la columna de agua sino también por fluctuaciones en la preservación asociadas con cambios en las condiciones redox. La gran cantidad de escamas de jurel encontrada en el sedimento superficial frente a Concepción revela, además, que el aumento de las poblaciones de esta especie frente a Chile parece haber sido de grandes proporciones, por lo cual el flujo de escamas se convirtió en el factor dominante para su preservación, incluso por encima de la relativa mayor oxigenación y (probablemente) mayor grado de bioperturbación de estos sedimentos comparados con los ubicados frente al norte de Chile.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Luis Cubillos (Universidad de Concepción) por facilitar la recolección de ejemplares frescos para la identificación de escamas, a Diego Holmgren por sugerencias metodológicas para la conservación de escamas al inicio de este estudio y al personal del laboratorio de Geoquímica de la Universidad de Utrecht (Holanda) por su valiosa asesoría

técnica en las mediciones de elementos traza. Este trabajo fue financiado por el Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur-Oriental (FONDAP-COPAS) de la Universidad de Concepción. JADO agradece las becas de estudios de doctorado proporcionadas por el Eastern Pacific Consortium for Oceanographic Research (EPCOR-IAI) y la escuela de Graduados de la Universidad de Concepción. También se agradece al convenio Woods Hole Oceanographic Institution-Universidad de Concepción-Fundación Andes y a la Partnership for Observation of the Global Oceans (POGO)-Nippon Foundation por patrocinar dos estancias de investigación en la Universidad de Utrecht a JADO.



LITERATURA CITADA

- ARCOS D, L CUBILLOS & S NÚÑEZ (2001) The jack mackerel fishery and El Niño 1997-98 effects off Chile. *Progress in Oceanography* 49: 597-617.
- ARNTZ WE, E VALDIVIA & J ZEBALLOS (1988) Impact of El Niño 982–83 on the commercially exploited invertebrates (mariscos) of the Peruvian shore. *Meeresforsch* 32: 3–22.
- BATURIN G (2002) Manganese and molybdenum in phosphorites from the ocean. *Lithology and Mineral Resources* 37: 412-428.
- BERTRAND A, MA BARBIERI, J CÓRDOVA, C HERNÁNDEZ, F. GÓMEZ & F LEIVA (2004). Diel vertical behaviour, predator-prey relationships, and occupation of space by jack mackerel (*Trachurus murphyi*) off Chile. *ICES Journal of Marine Science* 61: 1105-1112.
- BLANCO JL, AC THOMAS, M-E CARR, T. STRUB (2001) Seasonal climatology of hydrographic conditions in the upwelling region off northern Chile. *Journal of Geophysical Research* 106: 11,451-11,467.
- BÖNING P, H-J BRUMSACK, M BOTTCHE, B SCHNETGER, C KRIETE, J KALLMEYER & SL BORCHERS (2004) Geochemistry of Peruvian near-surface sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68: 4429-4451.
- BÖNING P, S CUYPERS, M GRUNWALD, B SCHNETGER & H-J BRUMSACK (2005) Geochemical characteristics of Chilean upwelling sediments at ~36°S. *Marine Geology* 220: 1-21.

- BURNETT W (1977) Geochemistry and origin of phosphorites deposits from off the coast of Peru and Chile. *Geological Society of America Bulletin* 88: 813-823.
- CALVERT S, R BUSTIN & E INGALL (1996) Influence of water column anoxia and sediment supply on the burial and preservation of organic carbon in marine shales. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60: 1577-1593.
- CONTRERAS S, S PANTOJA, C NEIRA & C LANGE (2007) Biogeochemistry of surface sediments off Concepción (~36°S), Chile: El Niño vs. non-El Niño conditions. *Progress in Oceanography* 75: 576-585.
- DEAN W, Y ZHENG, J, ORTIZ & A VAN GEEN (2006) Sediment Cd and Mo accumulation in the oxygen-minimum zone off western Baja California linked to global climate. *Paleoceanography* 21, PA4209, doi:10.1029/2005PA001239.
- DEVRIES T & W PEARCY (1982) Fish debris in sediments of the upwelling zone off central Peru: a late Quaternary record. *Deep-Sea Research* 28: 87-109.
- FAO (1997) Review of the state of world fishery resources: marine fisheries. FAO Fisheries Circular 920: 173 pp.
- FROELICH P, M ARTHUR, W BURNETT, M DEAKIN, V HENSLEY, R JAHNKE, L KAUL, K KIM, K ROE, A SOUTAR, C VATHAKANON (1988) Early diagenesis of organic matter in Peru continental margin sediments: phosphorite precipitation. *Marine Geology* 80: 309-343.
- GALLEGUILLOS R, L TRONCOSO, C OYARZUN, M ASTORGA & M PEÑALOSA (2000) Genetic differentiation in Chilean hake *Merluccius gayi gayi* (Pisces: Merlucciidae). *Hydrobiologia* 420: 49-54.

- GUTIÉRREZ D, V GALLARDO, S MAYOR, C NEIRA, C VÁSQUEZ, J SELLANES, M RIVAS, A. SOTO, F CARRASCO & M BALTAZAR (2000) Effects of dissolved oxygen and fresh organic matter on the bioturbation potential of macrofauna in sublittoral sediments off central Chile during the 1997/98 El Niño. *Marine Ecology Progress Series* 202: 81-99.
- GUTIÉRREZ M, G SWARTZMAN, A BERTRAND & S BERTRAND (2007) Anchovy (*Engraulis ringens*) and sardine (*Sardinops sagax*) spatial dynamics and aggregation patterns in the Humboldt Current ecosystem, Peru, from 1983-2003. *Fisheries Oceanography* 16: 155-168.
- HELLY J & L LEVIN (2004) Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins. *Deep-Sea Research* 51: 1159-1168.
- KIM K. & W BURNETT (1988) Accumulation and biological mixing of Peru margin sediments. *Marine Geology* 80: 181-194.
- KLUMP J, D HEBBELN & G WEFER (2000) The impact of sediment provenance on barium-based productivity estimates. *Marine Geology* 169: 259-271.
- KONCHINA GV (1980) The feeding niche of the hake *Meluccius gayi* (Merlucciidae), and the jack mackerel, *Trachurus symmetricus murphyi* (Carangidae) in the trophic system of the Peruvian coastal upwelling. *Journal of Ichthyology* 23: 87-98.
- KUDRASS H (2002) Cruise Report SO-147 Peru-Upwelling. Federal Institute for Geoscience and Natural Resources, Hannover.

- LAMY F, D HEBBELN & G WEFER (1998) Terrigenous sediment supply along the Chilean continental margin: modern regional patterns of texture and composition. *Geol Rundsch* 87: 477-494.
- LEVIN L, D GUTIÉRREZ, A RATHBUN, C NEIRA, J SELLANES, P MUÑOZ, V. GALLARDO, M SALAMANCA (2002) Benthic processes on the Peru margin: a transect across the oxygen minimum zone during the 1997-98 El Niño. *Progress in Oceanography* 53: 1-27.
- LILLO S, V OJEDA, J OLIVARES, R TASCHERI, M BRAUN, S NUÑEZ, J ORTIZ & P TORRES (2001) Evaluación acústica de merluza común en la zona centro-sur, año 2000. Informe Técnico Fondo de Investigación Pesquera, Proyecto FIP 2000-04. 126 p.
- MEDINA M & H ARANCIBIA (2002) Dinámica trófica del jurel (*Trachurus symmetricus murphyi*) en el norte de Chile. *Investigaciones Marinas, Valparaíso* 30: 45-55.
- MEYERS S, B SAGEMAN & T LYONS (2005) Organic carbon burial and the molybdenum proxy: theoretical framework and application to Cenomanian-Turonian oceanic anoxic event 2. *Paleoceanography* 20, doi: 10.1029/2004PA001068.
- MILESSI A, J SELLANES, V GALLARDO & C LANGE (2005) Osseous skeletal material and fish scales in marine sediments under the oxygen minimum zone off northern and central Chile. *Estuarine and coastal shelf science* 64: 185-190.
- MORALES C, S HORMAZÁBAL & JL BLANCO (1999) Interannual variability in the moscale distribution of the upper boundary of the oxygen minimum layer off

- northern Chile (18-24 S): implications for the pelagic system and biogeochemical cycling. *Journal of Marine Research* 57: 909-932.
- MUÑOZ P, J SELLANES, C LANGE, M PALMA & M SALAMANCA (2007) Temporal variability of ^{210}Pb fluxes and bioturbation in shelf sediments beneath the high primary production area off Concepción, central-southern Chile (~36°S). *Progress in Oceanography* 75: 586-602.
- MUÑOZ P, C LANGE, D GUTIÉRREZ, D HEBBELN, M SALAMANCA, L DEZILEAU, J REYSS & L BENNINGER (2004) Recent sedimentation and mass accumulation rates based on ^{210}Pb along the Peru-Chile continental margin. *Deep-Sea Research II* 51: 2523-2541.
- NAMEROFF T, E CALVERT, W MURRAY (2004) Glacial-interglacial variability in the eastern tropical North Pacific oxygen minimum zone recorded by redox-sensitive trace metals. *Paleoceanography* 19, PA1010, doi: 10.1029/2003PA000912.
- O'CONNELL J & V TUNNICLIFFE (2001) The use of sedimentary fish remains for interpretation of long-term fish population fluctuations. *Marine Geology* 174: 177-195.
- OLIVA M & I BALLON (2002) Metazoan parasites of the Chilean hake *Merluccius gayi gayi* as a tool for stock discrimination. *Fisheries Research* 56: 313-320.
- ORTLIEB L, R ESCRIBANO, R FOLLEGATI, O ZUÑIGA, I KONG, L RODRÍGUEZ, J VALDÉS, N GUZMÁN & P IRATCHET (2000) Recording of ocean-climate changes during the last 2,000 years in the hypoxic marine environment off northern Chile (23°S). *Revista Chilena de Historia Natural* 72: 221-242.
- ORTLIEB, L, O ZUÑIGA, R FOLLEGATI, R ESCRIBANO, I KONG, P MOURGUIART, J VALDÉS & P IRATCHET (1994) *Paleoceanografía de Bahía*

de Mejillones del sur (Antofagasta, Chile): resultados preliminares para el último milenio. *Estudios Oceanológicos* 13: 45-55.

OYARZUN C, I PAYA, R GALLEGUILLOS & M OLIVA (1997) Unidades de stock en el recurso merluza común de la zona centro-sur. Informe Técnico Instituto de Fomento Pesquero, proyecto FIP 94-18. 72 p.

PATTERSON R, C WRIGHT, A CHANG, L TAYLOR, P LYONS, A DALLIMORE & A KUMAR (2002) Atlas of common squamatological (fish scale) material in coastal British Columbia and an assessment of the utility of various scale types in paleofisheries reconstruction. *Paleontologia Electronica* 4 (http://palaeo-electronica.org/2001_2/index.html).

PAULMIER A, D RUIZ-PINO, V. GARÇON & L. FARÍAS (2006) Maintaining of the Eastern South Pacific Oxygen Minimum Zone (ZMO) off Chile. *Geophysical Research Letters* 33: L20601, doi:10.1029/2006GL026801.

QUIÑONES R, R SERRA, S NUÑEZ, H ARANCIBIA, J CORDOVA & F BUSTOS (1997) Relación espacial entre el jurel (*Trachurus symmetricus murphyi*) y sus presas en la zona centro-sur de Chile. En: TARIFEÑO E (ed.) *Gestión de sistemas oceanográficos del Pacífico oriental*. Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO. IOC/INF-1046: 187-202.

RODRÍGUEZ-GRAÑA L & L CASTRO (2003) Ichthyoplankton distribution off the Peninsula de Mejillones, Chile (23°S, 71°W), under hydrographic conditions during the austral summer and winter of the 1997 El Niño. *Hydrobiologia* 501: 59-73.

SALVANES AG & JB KRISTOFFERSEN (2001) Mesopelagic fishes. En: STEELE J (ed.) *Encyclopaedia of Ocean Sciences* 3: 1711-1717.

- SEPULVEDA A, S NUÑEZ, H PEÑA, L CUBILLOS, A HERNANDEZ, T MARIELA, D BUCARY, A ROJAS, F VEJAR, C GONZALEZ, M A BARBIERI, J CORDOVA, M ESPEJO & S LILLO (2001). Informe Técnico Instituto de Fomento Pesquero, Proyecto FIP 99-14. 147 p.
- SCHENAU S & GJ DE LANGE (2000) A novel chemical method to quantify fish debris in marine sediments. *Limnology and Oceanography* 45: 963-971.
- SCHWARTZLOSE, R, J ALHEIT, A BAKUN, T BAUMGARTNER, R CLOETE, R CRAWFORD, W FLETCHER, Y GREEN-RUIZ, E HAGEN, T KAWASAKI, D LLUCH-BELDA, S LLUCH-COTA, A MACCALL, Y MATSUURA, M NARVAÉZ-MARTÍNEZ, R PARRISH, C ROY, R SERRA, K SHUST, M WARD & J ZUZUNAGA (1999) Worldwide large-scale fluctuations of sardine and anchovy populations. *South African Journal of Marine Science* 21: 289-335.
- SERRA R (1983) Changes in the abundance of pelagic resources along the Chilean coast. *FAO Fisheries Report* 291: 255-284.
- SHAFFER G, S HORMAZABAL, O PIZARRO & S SALINAS (1999) Seasonal and interannual variability of currents and temperature off central Chile. *Journal of Geophysical Research* 104: 29,951-29,961.
- SHAFFER G, S HORMAZABAL, O PIZARRO, M RAMOS (2004) Circulation and variability in the Chilean basin. *Deep-Sea Research* 1 51: 1367-1386.
- SIELFELD W & A KAWAGUCHI (2004) Peces mesopelágicos capturados durante el crucero Cimar 6-Islas Oceánicas. *Ciencia y Tecnología del Mar* 27: 87-97.
- SIELFELD W, M VARGAS & R FUENZALIDA (1995) Peces mesopelágicos frente a la costa norte de Chile. *Investigaciones Marinas, Valparaíso* 23: 83-97.

- STRUB T, J MESÍAS, V MONTECINO, J RUTLLANT & S SALINAS (1998) Coastal ocean circulation off western South America, coastal segment (6,E). En: ROBINSON AR & KH BRINK (eds.) *The Sea* 11: 273-304.
- STUUT J, S KASTE, F LAMY & D HEBBELN (2007) Sources and modes of terrigenous sediment input to the Chilean continental slope. *Quaternary International* 161: 67-76.
- VALDÉS J (2004) Evaluación de metales redox-sensitivos como proxies de paleoxigenación en un ambiente marino hipóxico del norte de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 77: 121-138.
- VALDÉS J, L ORTLIEB, D GUTIÉRREZ, L MARINOVIC, G VARGAS & A SIFEDDINE (2008). A 250-years record of sardine and anchovy scale deposition in Mejillones Bay, 23°S, northern Chile. *Progress in Oceanography*. En prensa.
- VALDÉS J, G VARGAS, A SIFEDDINE, L ORTLIEB & M GUIÑEZ (2005) Distribution and enrichment evaluation of heavy metals in Mejillones bay (23°S), northern Chile: geochemical and statistical approach. *Marine Pollution Bulletin* 50: 1558-1568.
- VARGAS G, L ORTLIEB, J PICHON, J BERTAUX & M PUJOS (2004) Sedimentary facies and high resolution primary production inferences from laminated diatomaceous sediments off northern Chile (23°S). *Marine Geology* 211: 79-99.
- WRIGHT C, A DALLIMORE, R THOMPSON, R PATTERSON & D WARE (2005) Late Holocene paleofish populations in Effingan Inlet, British Columbia, Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology* 224: 367-384.

ZUZUNAGA J (2002) Some shared fish stocks of south eastern Pacific. FAO Fisheries

Report 695: 1-240.



Notas a pie de página

¹GUTIÉRREZ D, D FIELD, R SALVATTECI, T BAUMGARTNER, J DÍAZ-OCHOA, F VELAZCO, L ORTLIEB, A SIFEDDINE, P TAPIA, CB LANGE, V FERREIRA, G VARGAS (2006) Decadal to centennial variability of the Peruvian upwelling ecosystem during the last centuries as inferred from fish scale deposition rates of anchovy and other marine sediment records. En: Proceedings of the International Conference “The Humboldt Current System”. Lima (Perú), 27 de noviembre al 1 de diciembre de 2006.

² SÁNCHEZ G; C LANGE; P MUÑOZ & R CASTRO (2004) Composición y abundancia de diatomeas y silicoflagelados en sedimentos costeros de Iquique (Norte de Chile), durante el pasado reciente. Memorias del XXIV Congreso de Ciencias del Mar, Coquimbo (Chile), 17-20 de mayo de 2004.



Leyendas de figuras

Figura 1. Áreas de estudio frente a Chile (A), mostrando las localidades de muestreo sobre el talud y plataforma frente a Iquique (B), Bahía de Mejillones y (C) plataforma continental frente a Concepción.

Figure 1. Study area off Chile (A), sampling locations on the shelf brake and shelf off Iquique (B), Bahía de Mejillones (C) and continental shelf off Concepción (D).

Figura 2. Distribución latitudinal de la abundancia promedio de escamas por especie entre 0 y 24 cm de profundidad de testigo. (A) anchoveta, (B) Myctophidae, (C) jurel, (D) merluza y (E) sardina.

Figure 2. Latitudinal distribution of mean fish scales concentration by species between 0 and 24 cm depth in core. (A) anchovy, (B) Myctophidae, (C) jack mackerel, (D) hake, and (E) sardine.

Figura 3. Abundancia promedio de escamas en intervalos de 6 cm de profundidad de testigo en Iquique (A, B), Mejillones (C) y Concepción (D) (para esta última localidad las abundancias corresponden al promedio de los tres testigos de sedimento).

Figure 3. Mean fish scale concentration integrated over 6 cm core depth intervals in Iquique (A, B), Mejillones (C) and Concepción (D) (for the last location the abundances correspond to averages of 3 sediment cores).

Figura 4. Relaciones Mo/Al, Fe/Al y S/Al para muestras de sedimento recolectadas frente a (A) Iquique (testigo RhC-1), (B) Bahía de Mejillones (testigo MUC-1B) y (C) Concepción (testigos BX-2; símbolos rellenos y BX-3, símbolos vacíos). Las líneas corresponden a promedios de las razones en intervalos de 6 cm de profundidad de testigo.

Figure 4. Mo/Al, Fe/Al and S/Al ratios in sediment samples collected off (A) Iquique (RhC-1), (B) Bahía de Mejillones (MUC-1B) and (C) Concepción (core BX-2, filled symbols, and core BX-3, empty symbols). Continuous lines represent mean ratios computed each 6 cm core depth.

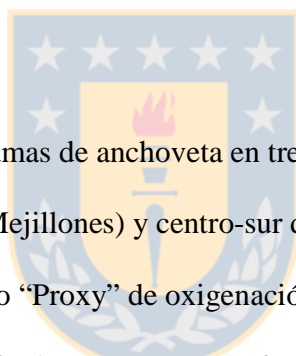


Figura 5. (A) Abundancia de escamas de anchoveta en tres sitios sobre la plataforma continental del norte (Iquique y Mejillones) y centro-sur de Chile (Concepción) en función de la razón Mo/Al (utilizada como “Proxy” de oxigenación). (B) Tasa de cambio (primera derivada = dy/dx) de la abundancia de escamas (y) en función de la razón Mo/Al (x) de la curva (A).

Figure 5. (A) Abundance of anchovy scales from three sites on the continental shelf off northern (Iquique and Mejillones) and central-south Chile (Concepción) as a function of the Mo/Al ratio (used as a proxy of oxygenation). (B) Rate of change (first derivative = dy/dx) of fish scale abundance (y) as a function of the Mo/Al ratio (x) in curve (A).

Tabla. 1. Localidades de muestreo, tipo de colector, tasas de sedimentación y análisis efectuados en los sedimentos recolectados.

Table 1. Sampling sites, coring devices used, sedimentation rates and type of analyses done on the sediments collected.

Localidad	Posición	Z (m)	No. testigo	Área colector (cm ²)	TS (cm año ⁻¹)	Tipo de análisis
Iquique	20°15'S, 70°16'W	291	RhC-1	43.0	-	Escamas y ET
	20°14'S, 70°12'W	100	BX-1	45.8	0.10 ⁽¹⁾	Escamas
Mejillones	23°03'S, 70°27'W	93	MUC-1A	35.3	0.16 ⁽²⁾	Escamas
	”	”	MUC-1B	70.9	”	ET
Concepción (Estación 26)	36°26'S, 73°23'W	120	MUC-2	70.9	0.12-0.24 ⁽¹⁾⁽³⁾	Escamas
	”	”	BX-2	95.0	”	Escamas y ET
	”	”	MUC-3	70.9	”	Escamas
	”	”	BX-3	95.0	”	ET

RhC = Rhumor corer, BX = Box corer, MUC = Multicorer, Z = profundidad de agua, TS = tasa de sedimentación lineal, ET =

elementos traza. ⁽¹⁾Muñoz et al. (2004), ⁽²⁾Vargas et al. (2004) y ⁽³⁾Muñoz, comunicación personal.

Tabla 2. Modelos de regresión lineal ajustados a la relación Mo/Al (X) – abundancia de escamas de anchoveta (Y) en sedimentos recolectados sobre la plataforma (Concepción y Mejillones) y el talud continental (Iquique) frente al margen chileno (se presentan los parámetros \pm un error estándar).

Table 2. Linear regression fits for the relationship between the Mo/Al ratio (X) and fish scale concentration (Y) in sediments collected on the continental shelf (Bahía de Mejillones and Concepción) and break (Iquique) off Chile (parameters \pm one standard error).

Modelo	Intercepto (a)	Pendiente (b)	R ²	Valor-p
$Y = a + b \cdot X$	33.6 ± 14.5	13.14 ± 5.1	0.34	0.023
$Y = a + b \cdot \ln X$	72.2 ± 11.8	20.79 ± 6.3	0.46	<0.0001

Figura 1

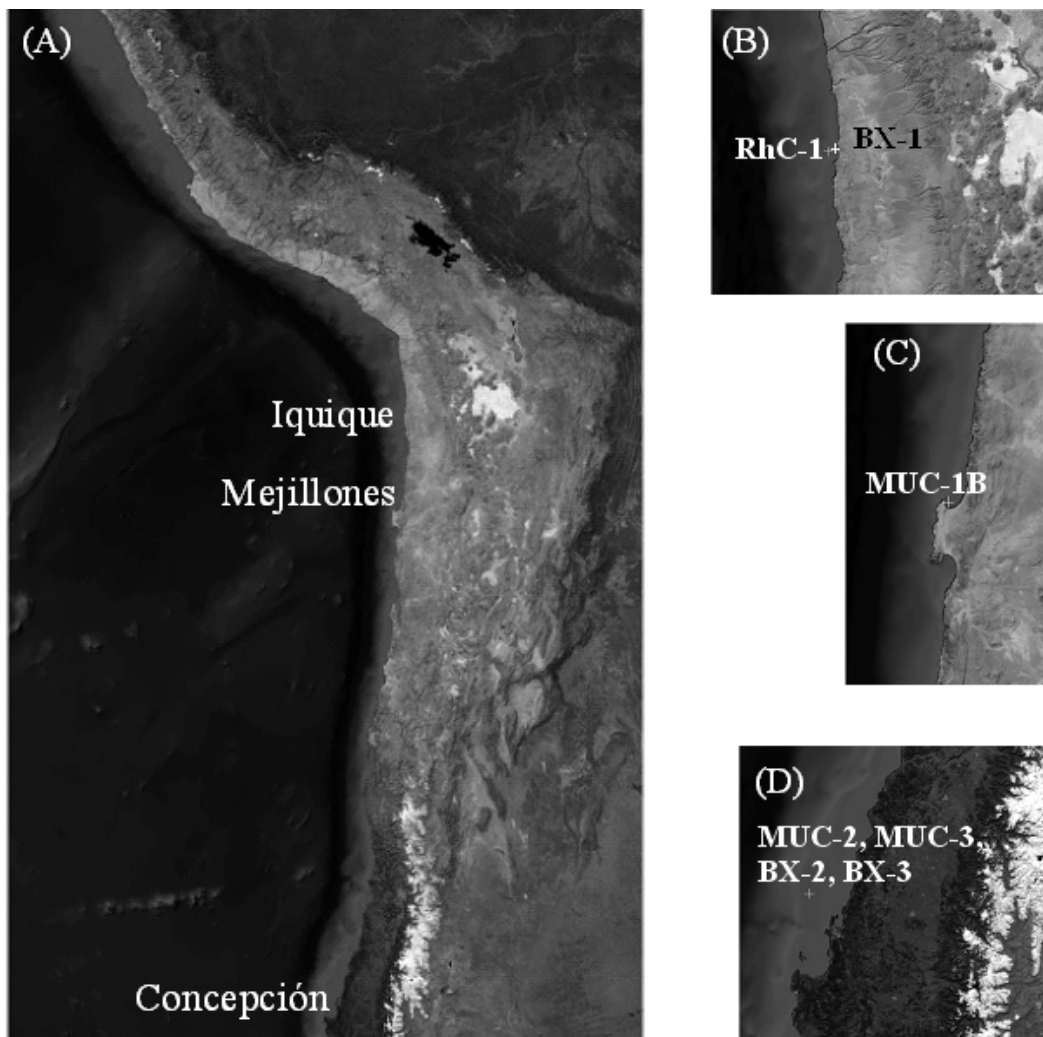


Figura 2

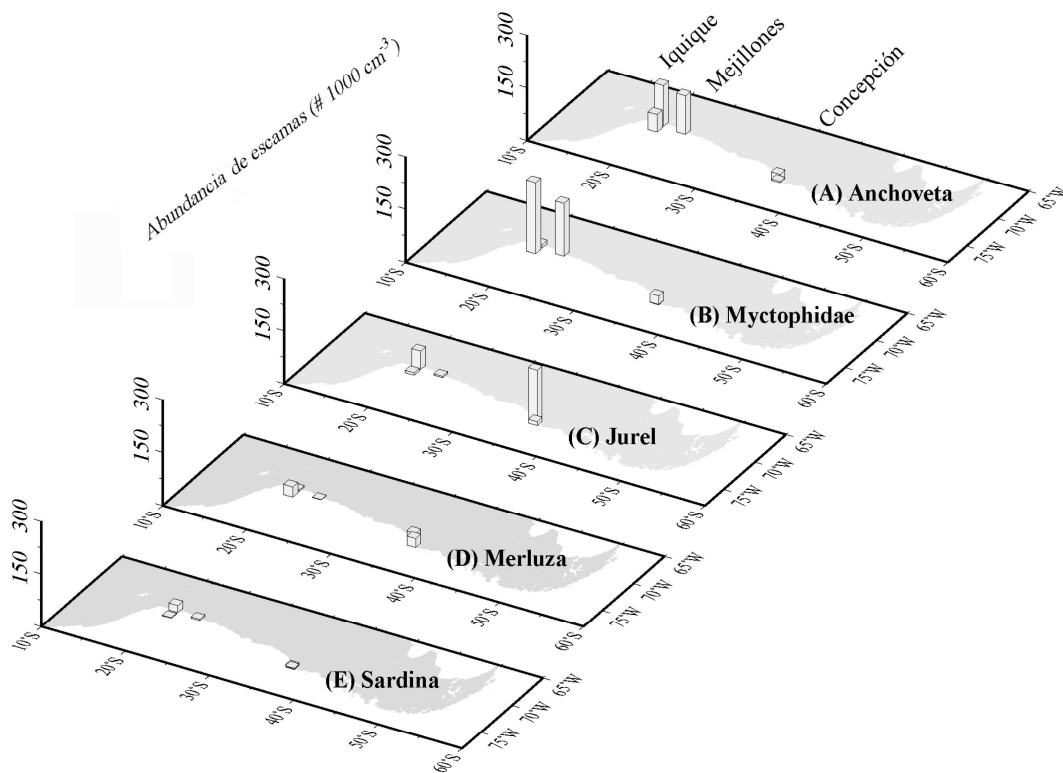


Figura 3

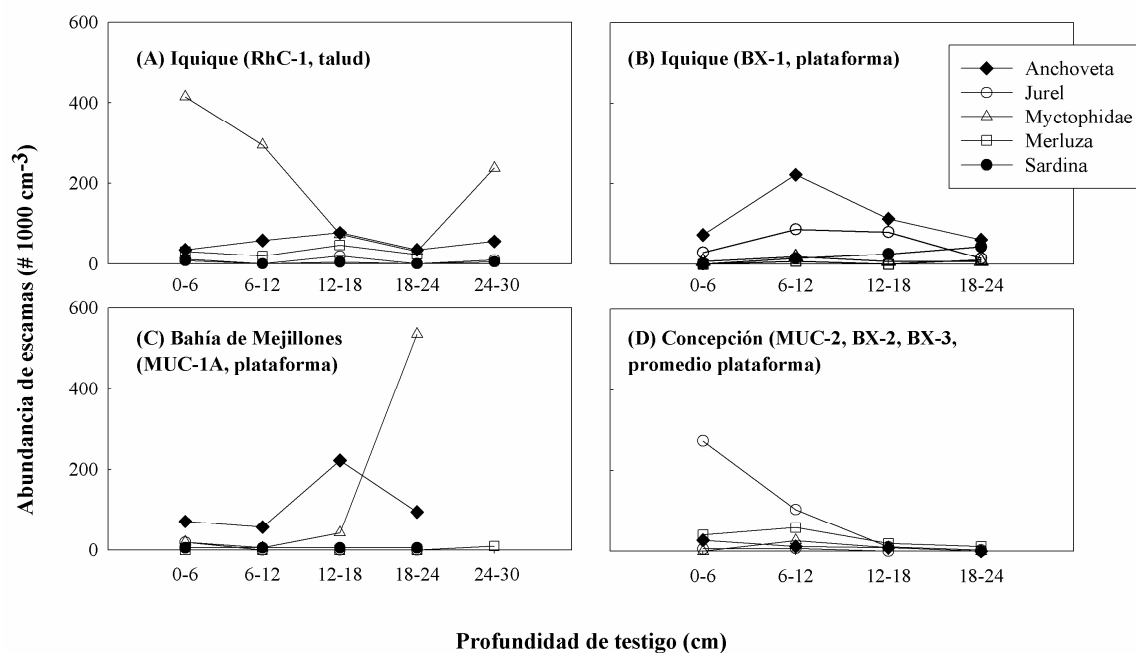


Figura 4

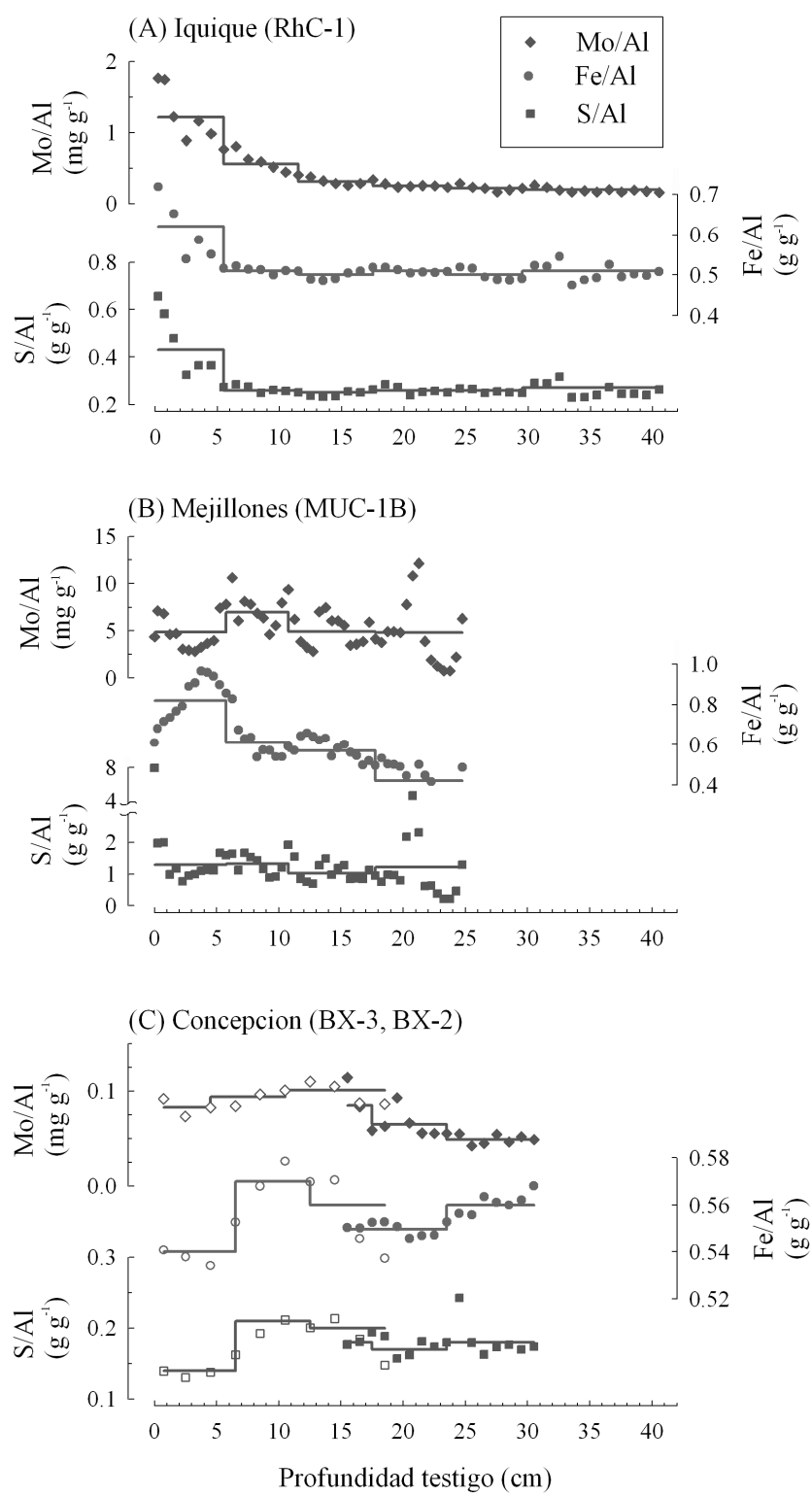
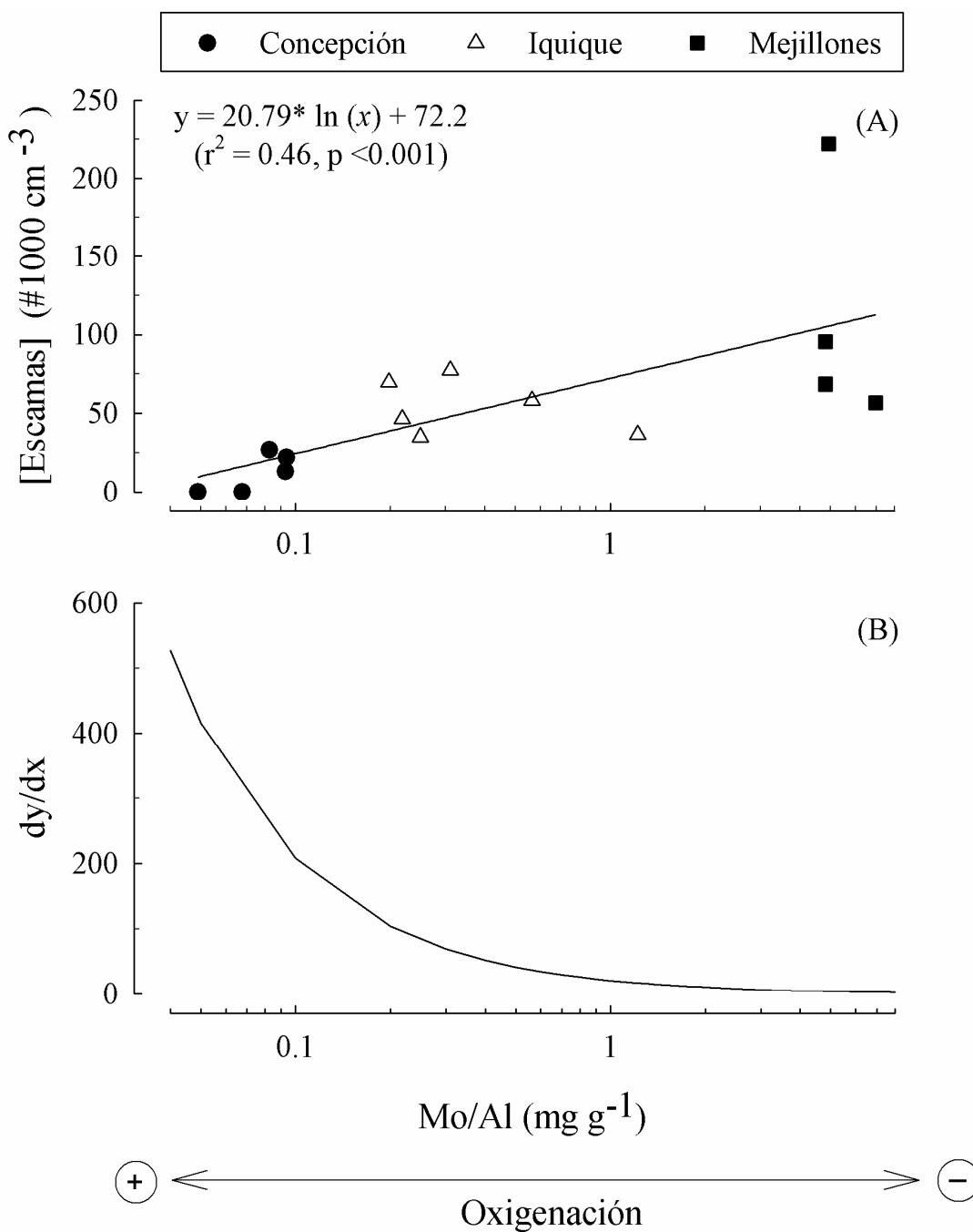


Figura 5



Capítulo 5.- Discusión General

A lo largo del margen Peruano se ha documentado frecuentemente la presencia de abundantes restos de peces depositados en los sedimentos marinos, los cuales asimismo, comúnmente están asociados con depósitos de fosforita (e.g. Suess, 1981; DeVries & Percy, 1982; Froelich et al., 1983; Kudrass et al., 2002). Aunque menos estudiados, los restos de peces sobre los sedimentos frente al margen Chileno también se encuentran en cantidades apreciables (e.g. Ortlieb et al., 1994, 2000; Milessi et al., 2005 y referencias citadas allí; Vargas et al., 2004). En paleoceanografía, la utilización de las escamas de peces como indicadores de la historia pasada de peces se originó con las reconstrucciones de abundancia de anchoveta y sardina en el sistema de la Corriente de California (Soutar & Isaacs, 1969, 1974; Baumgartner et al., 1992) y desde entonces, los resultados e interpretaciones derivados de estos estudios se han constituido en el referente por excelencia para probar que las pesquerías de peces pelágicos en los sistemas de límite oriental del océano mundial han experimentado colapsos y recuperaciones periódicas en épocas anteriores a las pesquerías, probablemente respondiendo a la variabilidad de largo plazo del sistema océano atmósfera (e.g. Schwartzlose et al., 1999; Klyashtorin, 2001; Sharp, 2004).

El sistema de la Corriente Perú-Chile debido a su configuración geográfica y su conexión tanto con la zona ecuatorial a través de la Corriente Subsuperficial Perú-Chile como con latitudes altas, a través de la Corriente de Humboldt, es afectado por cambios oceanográficos de gran escala, a lo cual debe sumarse la intensa variabilidad interanual asociada con los ciclos ENOS que lo conectan directamente con los fenómenos originados

en el Pacífico Central Tropical (e.g. Strub et al., 1998). Esta variabilidad en el ambiente físico no es ajena a los recursos pesqueros que en el sistema de la Corriente Perú-Chile desde mediados del siglo XX han sustentado algunas de las pesquerías más grandes de la tierra (e.g. Serra, 1983; FAO, 1997; Zuzunaga, 2002). Por lo tanto, la idea de realizar reconstrucciones basadas en el registro sedimentario del margen Perú-Chile resulta de interés para la ciencia. No obstante, los estudios realizados en el margen peruano durante el final de los años 1970 y el comienzo de los años 1980 parecieran haber desalentado las iniciativas para este tipo de investigaciones. Esto posiblemente se debió a la observación de problemas en la preservación de los restos de peces en sedimentos que no siempre están perfectamente laminados y que además suelen presentar discontinuidades, probablemente asociadas con la alta actividad sísmica típica de esta zona (e.g. DeVries & Percy, 1982; Schwartzlose et al., 1999). Con todo, el interés por las reconstrucciones paleoceanográficas ha sido retomado en la actualidad, tal como se evidencia por la reciente creación del proyecto PALEOPECES del Instituto del Mar del Perú, el cual involucra importantes instituciones internacionales con recolección de múltiples testigos en Perú central. Con el presente trabajo se espera contribuir a incentivar la realización de más investigaciones basadas en el registro de restos de peces como una herramienta para reconstruir su abundancia pasada, así como también sobre su importancia e implicaciones para la remoción de fósforo reactivo dentro de una de las principales ZMO del océano mundial.

En esta tesis se presentan los resultados de recuentos de escamas en muestras de sedimento recolectadas en localidades dentro del núcleo de la ZMO del sistema de la Corriente Perú-Chile en Perú central, frente a Callao (Manuscrito 1) y frente a Iquique y Mejillones, en el norte de Chile (Manuscrito 2). Además, se analizan muestras provenientes del límite sur de dicho sistema, frente a Concepción, Chile centro-sur

(Manuscrito 2), un área contrastante con las otras en cuanto que se caracteriza por presentar una clara estacionalidad en el proceso de surgencia costera, que tiene lugar durante la primavera y el verano australes (e.g. Rutllant et al., 2004).

5.1. Preservación de escamas en función de la oxigenación

5.1.1 Escamas

Una perspectiva regional puede derivarse de la relación escamas de anchoveta vs. Mo/Al para Concepción, Iquique y Mejillones (Manuscrito 2). El hecho que ambas variables estén correlacionadas positivamente en estas localidades ubicadas dentro de la ZMO apoya la hipótesis de que la magnitud con que la señal de abundancia de peces en la columna de agua es preservada en los sedimentos depende de las condiciones reductoras (oxigenación) existentes al momento de su depositación (Hipótesis 1). Dada la naturaleza no lineal de la mencionada relación, el contenido de escamas de anchoveta cambia substancialmente cuando la razón Mo/Al disminuye por debajo de 1 mg g^{-1} (Fig. 1). Este umbral corresponde aproximadamente al límite inferior del núcleo de la ZMO frente a Perú central en el presente (Fig. 7 en Böning et al., 2004). Si la razón Mo/Al disminuye aún más, por debajo de 0.3 mg g^{-1} , el contenido de escamas se reduce en más del 70% (Fig. 1).

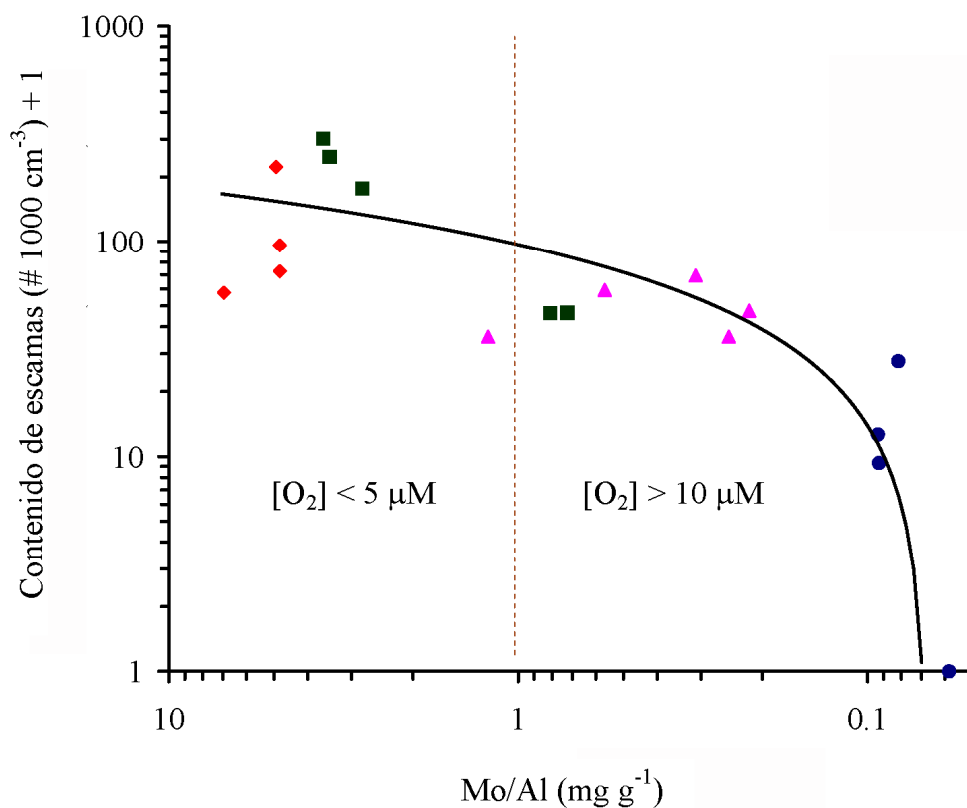


Figura 1. Relación entre el contenido de escamas de anchoveta (escala logarítmica) y la razón Mo/Al (eje invertido) integrados en intervalos de profundidad de 6 cm para testigos de sedimento recolectados a lo largo de la plataforma continental frente a Callao (cuadrados), Iquique (triángulos), Bahía Mejillones (rombos) y Concepción (círculos). La línea continua corresponde a un modelo de regresión logarítmica ajustado por mínimos cuadrados. Las concentraciones de oxígeno de referencia corresponden a los niveles observados dentro (a la izquierda de la línea vertical punteada) y afuera (a la derecha de la misma línea) de la actual ZMO frente a Perú central (Los niveles de concentración de O_2 fueron tomados de Lückge & Reinhardt, 2000 y Böning et al., 2004).

En consecuencia, utilizando como base el modelo derivado de los datos de contenido de escamas de anchoveta y la razón Mo/Al en los diferentes testigos recolectados a lo largo del margen Perú-Chile, es posible establecer, por ejemplo, que el aumento de $\sim 1 \text{ mg g}^{-1}$ en la razón Mo/Al ocurrido en la transición entre sedimentos homogéneos en profundidad de

testigo > 17 cm y sedimentos laminados ≤ 16 cm de profundidad frente a Callao (Manuscrito 1), posiblemente estuvo acompañado por un incremento de $\sim 70\%$ en la preservación de escamas (Fig. 1). En forma similar a lo establecido previamente para restos de peces recolectados en sedimentos del Mar Arábigo noreste (Schenau & De Lange, 2000), en el margen Perú-Chile la variabilidad espacial en la acumulación de escamas pareciera ser afectada importantemente por las variaciones de intensidad de la ZMO. En consecuencia, la abundancia de escamas frente a Chile y Perú tiene dos señales superpuestas, una relacionada con la abundancia de peces en la columna de agua y otra asociada con su preservación en el sedimento (Manuscrito 1). Es probable, además, que las variaciones latitudinales en el contenido de escamas en los sedimentos asociadas a su vez con cambios en la razón Mo/Al, sean un reflejo de la conformación presente de la ZMO, la cual es más gruesa y somera frente a Perú y norte de Chile que frente a Concepción (e.g. Morales et al. 1999; Helly & Levin, 2004; Paulmier et al. 2006; Fig. 1).

5.1.2 Fósforo total y fósforo asociado con restos de peces

Los contenidos de fósforo total en Callao (2500 ± 400 ppm) y Mejillones (1600 ± 600 ppm), así como los de P_{fish} (1100 ± 500 ppm y 1050 ± 300 ppm, respectivamente), no son muy diferentes entre sí. Aunque las concentraciones de P_{total} y P_{fish} en cada una de estas localidades están correlacionadas significativamente, es notable que esta relación tiene mayor dispersión en Callao que en Mejillones (Fig. 2). Se infiere que en los sedimentos recolectados frente a Callao y Mejillones, el P producido por las poblaciones de peces en la columna de agua es, en promedio, la fase sólida predominante en el registro sedimentario ($41 \pm 9\%$ y $69 \pm 13\%$, respectivamente). De acuerdo con el conocimiento acerca de la

influencia de las condiciones de oxigenación sobre la partición de las fases sólidas del fósforo sedimentario (e.g. Slomp et al., 1996; Slomp & Van Cappellen, 2007), se espera que en condiciones de baja oxigenación predomine el P_{fish} y, por consiguiente, que haya mejor preservación de escamas.

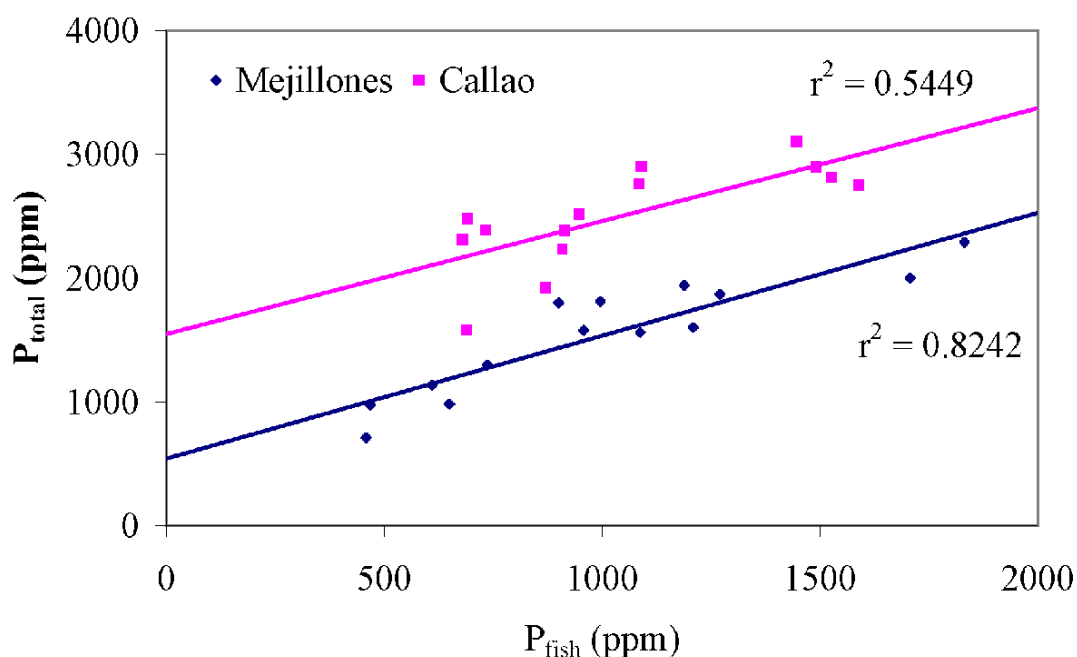


Figura 2. Correlación P_{fish} vs. P_{total} en dos testigos de sedimento recolectados frente a Callao y Bahía de Mejillones (ambas regresiones son significativas con $p < 0.05$).

La relación entre la razón $P_{\text{fish}}/P_{\text{total}}$ y el indicador de condiciones reductoras Mo/Al revela, que en forma semejante a lo observado para el contenido de escamas totales en Callao, es posible determinar un modelo logarítmico entre ambas variables, sugiriendo también una disminución importante del contenido de P_{fish} con respecto al P_{total} para valores de la razón $\text{Mo/Al} < 1$ (Fig. 3A). Precisamente las razones Mo/Al más bajas fueron

encontradas en los sedimentos parcialmente laminados en profundidades de testigo > 17 cm (Manuscrito 1). En claro contraste con lo observado para Callao, en la Bahía de Mejillones no fue posible establecer una correlación significativa entre las razones $P_{\text{fish}}/P_{\text{total}}$ y Mo/Al (Fig. 3B). Al observar detenidamente el rango de variación de la razón Mo/Al en las muestras de la Bahía de Mejillones, resulta evidente que en este sistema los niveles de molibdeno han permanecido considerablemente altos a lo largo del registro y prácticamente siempre estuvieron por encima del umbral de 1 mg g^{-1} considerado en este trabajo como el límite inferior de la razón Mo/Al para sedimentos dentro de la ZMO. Al parecer en Mejillones siempre existieron condiciones apropiadas para la preservación de escamas y otros restos de peces. Por consiguiente, las fluctuaciones de oxigenación (i.e. en la razón Mo/Al) en Mejillones prácticamente no se relacionaron con los cambios exhibidos por la razón $P_{\text{fish}}/P_{\text{total}}$. Se concluye entonces, que el registro de escamas de peces en los sedimentos recolectados en Mejillones está dominado por la señal de abundancia de peces en la columna de agua, estando prácticamente libre de sesgos de preservación (Fig. 3B).

Las anteriores evidencias apoyan el enunciado presentado en la hipótesis 2, en el sentido que condiciones más reductoras en los sedimentos efectivamente estuvieron asociadas con mayor acumulación de P_{fish} .

5.2 ¿Una historia de los peces pelágicos en el margen Perú-Chile?

En los testigos recolectados en la plataforma continental frente a Callao, Iquique y Mejillones las escamas de anchoveta fueron las más abundantes (69%, 43% y 56%, respectivamente), mientras que frente a Concepción las escamas de jurel fueron las mejor representadas (34%) seguidas por las de merluza (11%). Las escamas no identificadas (debido a su alto grado de fragmentación o abrasión) variaron entre 17% y 24% en todas las

localidades a excepción de Concepción, en donde la proporción de este ítem fue > 40%, estando en concordancia con el menor grado de preservación determinado para esta zona (Manuscrito 2).

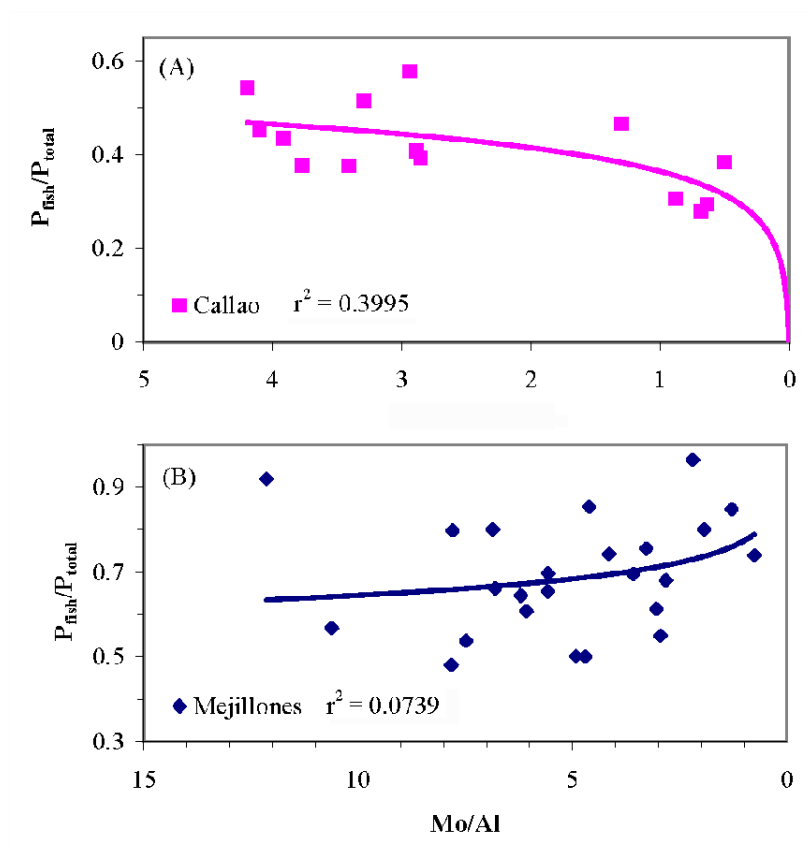


Figura 3. Relaciones entre las razones P_{fish}/P_{total} y Mo/Al en testigos recolectados sobre la plataforma continental frente a Callao (A) y en la Bahía de Mejillones (B) (solamente la regresión en (A) es significativa, con $p < 0.05$).

Desde una perspectiva histórica, las estadísticas de desembarque más largas disponibles tanto para Perú como para Chile, están referidas principalmente a especies pelágicas como la anchoveta, la sardina y el jurel (Fig. 4), mientras la información disponible para otros recursos como la merluza cubre rangos temporales considerablemente más reducidos (e.g. para Chile Sernapesca proporciona estadísticas de merluza sólo a partir de 1989).

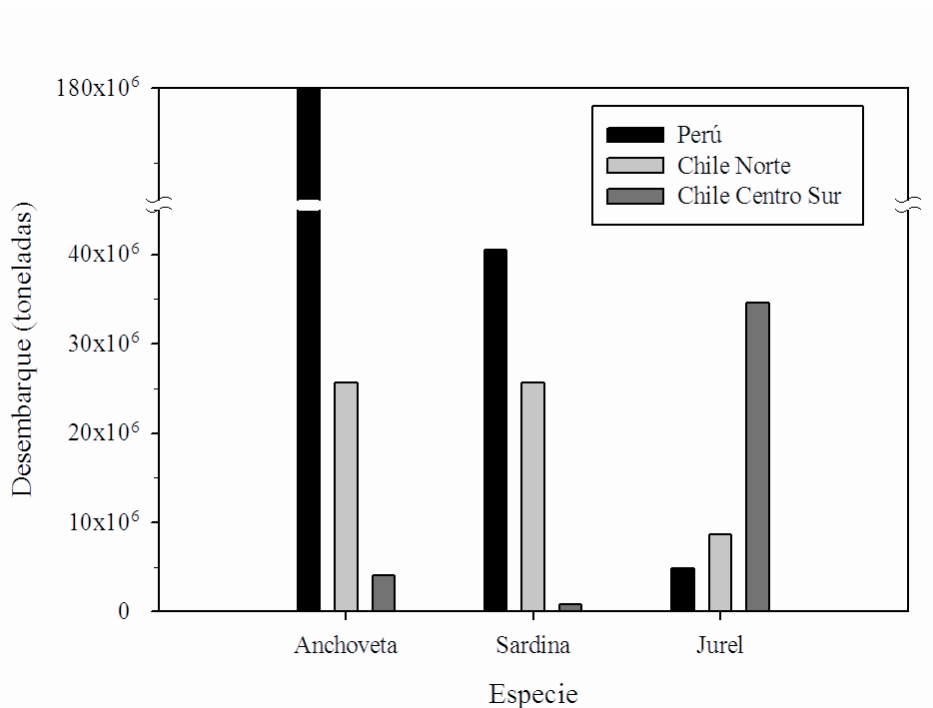


Figura 4. Desembarques acumulados de las especies de peces pelágicos más abundantes en el sistema de la Corriente Perú-Chile entre AD 1950 y 2000 (basado en información suministrada por E. Yáñez, Com. Pers., Universidad Católica de Valparaíso).

La información de desembarques disponible resulta útil como referencia para verificar algunas características generales de los recursos, tal como han sido observadas durante la segunda mitad del siglo XX a través de la historia de las pesquerías pelágicas en la región. En primer lugar, resulta obvio que la especie que mayores desembarques ha producido a lo largo de la costa Peruana es la anchoveta. En segundo lugar, este recurso también ha sido importante en el norte de Chile, aunque los volúmenes comparados con Perú son ~ 7 veces más bajos, en tanto que frente a Talcahuano los desembarques han sido comparativamente mucho más bajos (< 10⁶ toneladas, Fig. 4).

En cifras muy aproximadas, el patrón de abundancia inferido de la historia de desembarques de anchoveta en el margen Perú-Chile ha quedado bien registrado en los

sedimentos, tal como se desprende del análisis de los primeros 24 cm de profundidad de testigo en las localidades frente a Callao, Iquique, Bahía de Mejillones y Concepción (Fig. 5A; Manuscrito 2). Igualmente, para Chile centro-sur, sin duda el recurso pesquero más importante ha sido el jurel (Fig. 4), lo cual también aparece correctamente reflejado en los sedimentos (Fig. 5C). Es de anotar sin embargo, que este análisis cualitativo no podrá ser llevado a una escala cuantitativa hasta no realizar una calibración del indicador de abundancia de escamas en sedimentos, de forma que sea posible expresar flujos de escamas como abundancias, bien sea en número o biomasa, para lo cual se requerirá en el futuro la obtención de muestras grandes de sedimento que permitan reconstruir la composición por tamaños de la población de la cual se originaron las escamas (e.g. aplicando métodos como los propuestos por Soutar & Isaacs, 1974). Como parte de la calibración, la interpretación de los patrones espaciales inferidos del registro sedimentario requiere está en gran parte limitado por la información sobre la distribución en el tiempo presente de las poblaciones de peces en el ecosistema de la Corriente Perú-Chile. En este sentido adquieren especial relevancia los avances logrados sobre la diferenciación de stocks de la anchoveta con tres stocks uno frente a Perú centro-norte, otro frente al sur de Perú-norte de Chile y otro centro-sur de Chile (e.g. Serra, 1983; Alheit & Ñiquen, 2004; Cubillos et al., 2007). Igualmente puede decirse para la merluza común con un stock principal en Chile centro-sur (e.g. Oyarzún et al., 1997; Galleguillos et al. 2000) y otro al sur frente a puerto Montt (Oliva & Ballón 2002). Mientras que estudios genéticos sugieren que las poblaciones del jurel frente a Chile, así como en océano abierto hasta Nueva Zelandia, no difieren significativamente entre sí (Sepúlveda et al., 1998). Recientemente para las poblaciones de jurel se ha propuesto la existencia de dos unidades de stock, una frente a Perú y otra frente a Chile (Serra 2004 fide LGA: www.laboratorigenetica.cl/propuestafip-ficha-jurel.htm).

Por otra parte, en el presente trabajo, a excepción del testigo recolectado en Callao, los diferentes análisis se realizaron en función de la profundidad de testigo, sin avanzar en la determinación de modelos de edad explícitos. No obstante, el conocimiento acumulado en años recientes sobre geocronología en la estación 26 frente a Concepción (e.g. Muñoz et al., 2004) y en la Bahía de Mejillones (e.g. Vargas et al., 2004, 2007b; Tabla 1), sugieren que es posible al menos considerar una cronología preliminar basada en tasas de sedimentación lineales. Entonces, suponiendo condiciones estacionarias en la acumulación de sedimentos frente a Concepción y Mejillones, se pueden calcular los flujos de escamas de las especies dominantes en cada una de las localidades analizadas y también hacer algunas comparaciones latitudinales.

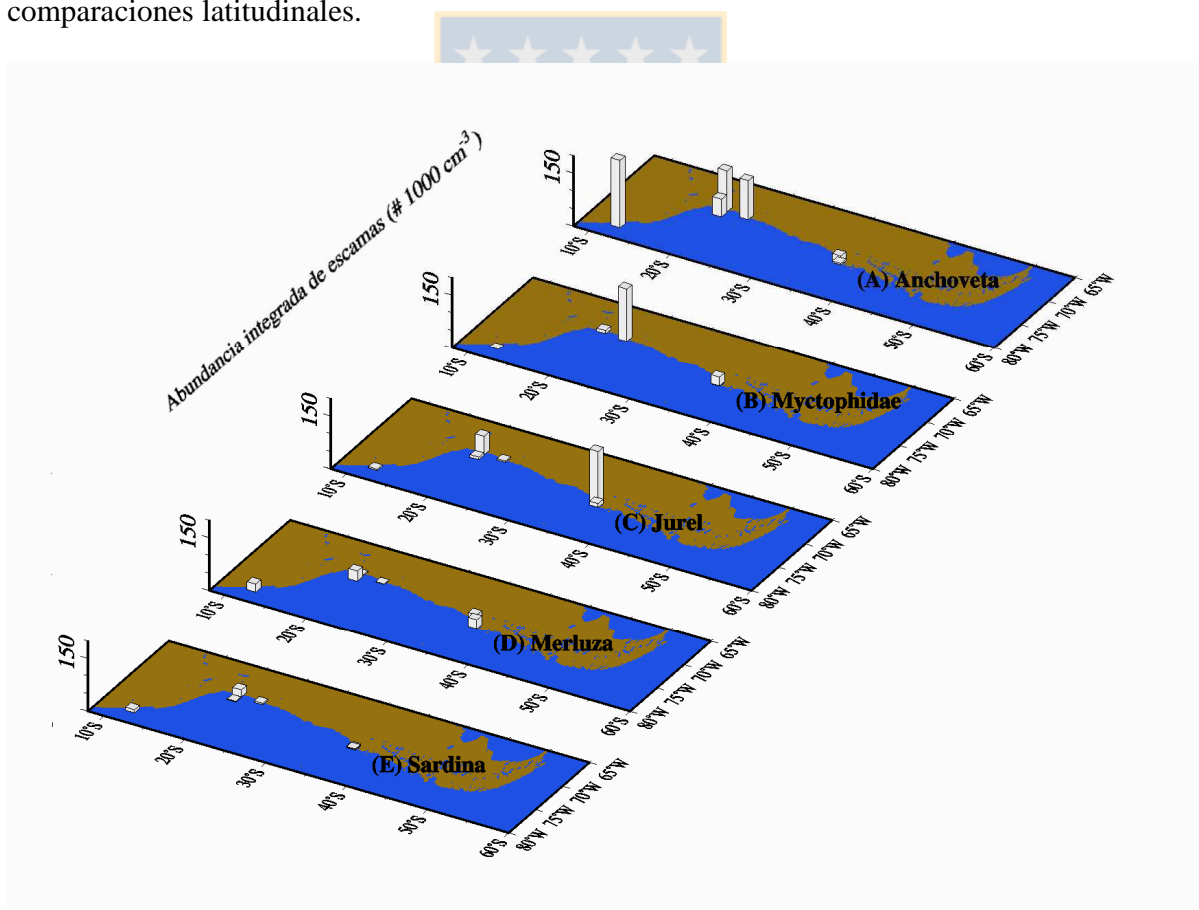


Figura 5. Contenido integrado en 24 cm de profundidad de testigo, expresado en número de escamas por 1000 centímetros cúbicos, para muestras recolectadas a lo largo del margen Perú-Chile.

Es interesante notar, que a pesar de la gran incertidumbre asociada con las cronologías empleadas, evidentemente los flujos de escamas de anchoveta en Callao y en la Bahía de Mejillones dentro del lapso en el que hay intersección con las series históricas de desembarque desde AD 1950 presentan tendencias similares, con un período de máximos flujos y capturas frente a Perú entre AD 1960 y 1970, seguido por otro período de declinación en ~ AD 1975-1990 (Fig. 6A). Estas tendencias fueron replicadas en el caso del desembarque en el norte de Chile y el registro sedimentario en la Bahía de Mejillones (Fig. 6B). A diferencia de Callao, donde el testigo extraído perdió la parte superior (i.e. el intervalo más joven que AD 1990), en el testigo de Mejillones fue posible recrear también el período de recuperación de la anchoveta de AD 1990-2000, el cual superó en magnitud el máximo de capturas observado entre AD 1960-1970, magnitud ésta que también quedó reflejada correctamente en los flujos de escamas en el sedimento (Fig. 6B). Nótese además, que los flujos de escamas en la Bahía de Mejillones son más bajos que los de Callao, lo cual es consistente con los niveles de captura ~ 5 veces más altos en Perú central que en el norte de Chile (e.g. Fig. 4). Solamente para el período AD 1970-2005, correspondiente a los primeros 5 cm del testigo de Mejillones, los flujos de escamas de anchoveta se equiparan con los de Callao. Es posible que estos flujos tan altos correspondan en parte a un artefacto asociado con las alteraciones producidas en los sedimentos de la Bahía de Mejillones por el inicio de las obras de construcción del Megapuerto desde ~ AD 2000. En este sentido, la perturbación del sedimento superficial podría haber generado la resuspensión de escamas concentrándolas por encima de sus niveles originales en el sedimento superficial y homogenizando el contenido de elementos traza tales como el Mo (Fig. 6B).

Como fue sugerido en la sección 5.1, el umbral de preservación de escamas se alcanzaría cuando las razones Mo/Al son $> 1 \text{ mg g}^{-1}$, por lo que para los sedimentos de Callao los sesgos por preservación de las escamas deben haber sido considerablemente más importantes antes de AD 1830 que después de esta fecha (Fig. 6A). En contraste, en Mejillones a pesar de las relativamente altas fluctuaciones en la razón Mo/Al, la misma raramente estuvo por debajo del umbral, sugiriéndose que el registro de escamas en esta área prácticamente estuvo libre de sesgos por preservación (Fig. 6B).

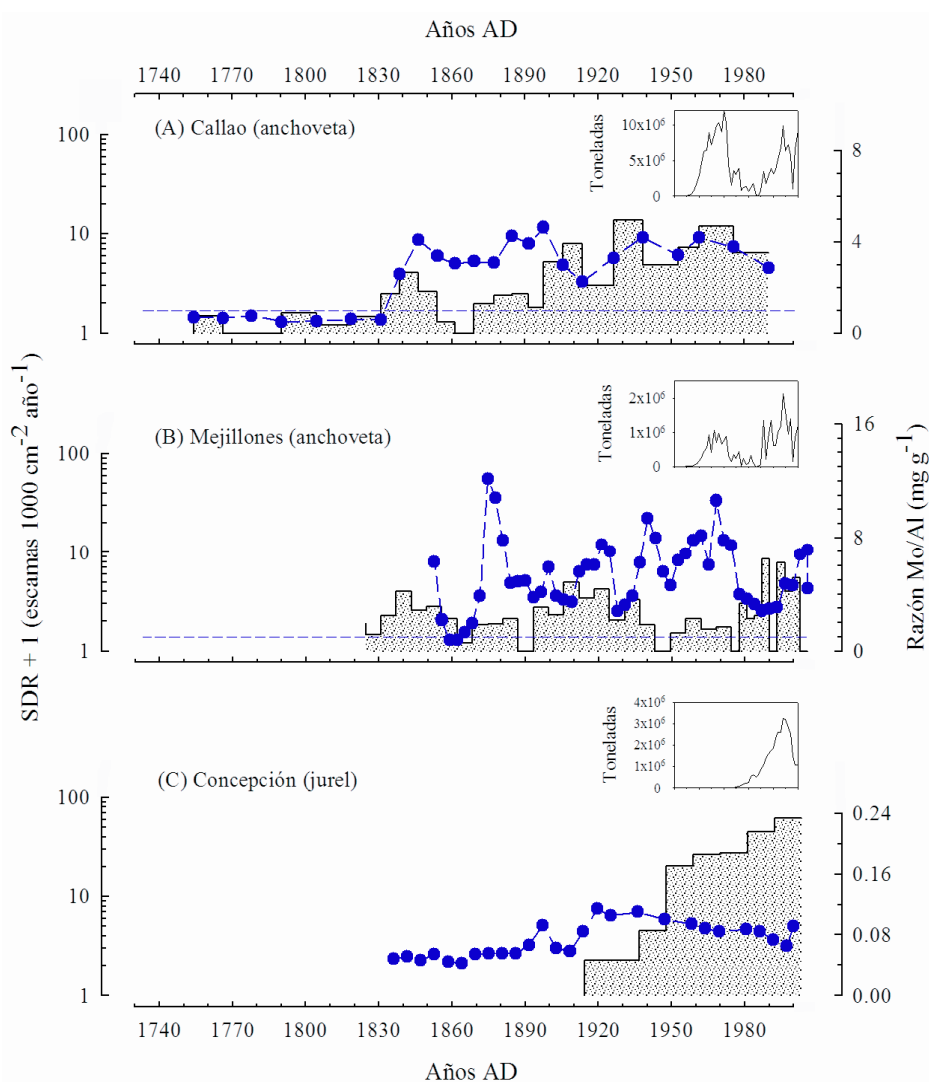


Figura 6. Tasas de acumulación de escamas (SDR, en número de escamas $1000 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$, en escala logarítmica) en sedimentos de la plataforma continental frente a A) Callao, B) Bahía de Mejillones y

(viene pág. 151) C) Concepción. Se ha superpuesto a cada gráfico las correspondientes mediciones de la razón Mo/Al (línea azul con círculos rellenos) en el mismo testigo utilizado para el recuento de escamas (Callao), en un testigo diferente al de los recuentos pero correspondiente al mismo lance (Bahía de Mejillones) o valores promedio para dos testigos de la misma área, pero recolectados en fechas distintas (Estación 26, Concepción). La línea horizontal discontinua señala el umbral de 1 mg g^{-1} de la razón Mo/Al que delimita la ZMO frente a Perú en el presente (Böning et al. 2004). Además, en la parte superior derecha de cada recuadro se presentan series históricas de desembarque de la especie más abundante en cada sitio (anchoveta para Perú y norte de Chile, jurel para Talcahuano, Chile centro-sur) (datos de desembarque de E. Yáñez, Universidad Católica de Valparaíso, Com. Pers.). Las edades para el testigo de Callao se basan en mediciones directas de ^{210}Pb y ^{14}C (Manuscrito 1) y para las otras áreas en las tasas de sedimentación lineal presentadas en la Tabla 1 y el manuscrito 2.

En cambio, los sedimentos de Concepción presentan concentraciones aproximadamente un orden de magnitud por debajo del umbral de la razón Mo/Al, por lo que los altos recuentos de escamas de jurel resultan más bien sorprendentes en condiciones tan desfavorables para la preservación. Si se tiene en cuenta que la preservación de escamas es modulada por las tasas de acumulación de sedimento, la bioperturbación dependiente del estado redox del sedimento, las concentraciones de fosfatos en el agua intersticial y la abundancia de peces en la columna de agua (e.g. Schenau & De Lange, 2000), existen por lo menos dos posibilidades para explicar el alto contenido de escamas de jurel dadas las bajas razones Mo/Al encontradas en el sedimento de Concepción (e.g. Böning et al., 2005; Fig. 6C). Una explicación probable es que desde mediados del siglo XX las poblaciones de jurel frente a las costas de Chile centro-sur se volvieron mucho más abundantes con el consiguiente aumento en la tasa de acumulación de escamas, hecho que habría compensado la tasa de degradación asociada con las condiciones menos reductoras de Concepción comparadas con el norte de Chile o Perú central. Esta posibilidad es apoyada por las observaciones que sobre el recurso jurel llevaron a cabo investigadores de la ex Unión Soviética durante los años 1970, en las cuales notaron un desplazamiento de las

poblaciones de jurel desde el área oceánica hacia la zona costera frente a Chile central (e.g. Elizarov et al., 1993; Grechina, 1998). Otra posibilidad es que el sistema frente a Chile central haya experimentado un cambio pronunciado hacia mayores tasas de sedimentación favorecido un enterramiento más eficiente del material exportado desde la columna de agua. Aun podría considerarse un escenario en que se combinen las dos hipótesis antes mencionadas. Sin embargo, por el momento, no se cuenta con evidencias que permitan poner a prueba dichas hipótesis.

5.3 Indicadores de abundancia de peces y productividad en el sistema Perú-Chile

El análisis de correlación para los diferentes indicadores biogénicos estudiados en los sedimentos de Perú central permitió determinar que el ópalo biogénico tuvo un comportamiento independiente del resto (Manuscrito 1). En efecto, indicadores diferentes al ópalo biogénico como el contenido de carbonatos, el carbono orgánico, el nitrógeno total o las propias escamas (de anchoveta y totales), tendieron a covariar de forma que en la sección más reductora del testigo (17 cm superficiales) éstos fueron más altos que en el intervalo menos reductor ubicado a mayor profundidad (Manuscrito 1).

Debido a que los elementos traza tienen como uno de sus principales medios de precipitación hacia el sedimento las partículas de materia orgánica, una explicación obvia para el marcado incremento de los mismos por encima del cambio de densidad en profundidades de testigo < 17 cm es la ocurrencia de un marcado incremento de productividad desde el principio de los años 1830 (Manuscrito 1).

Sin embargo, los análisis de preservación presentados en esta tesis indican que el cambio abrupto en la acumulación de elementos traza coincidió con un marcado cambio en

la acumulación de Mo, elemento que solamente está en cantidades apreciables en el sedimento dependiendo de las condiciones redox y no está relacionado directamente con los cambios en el suministro de carbono orgánico (e.g. Böning et al., 2004; Nameroff et al., 2004; Meyers et al. 2005; Dean et al., 2006). Por su parte, tal como es discutido por Dean et al. (2006) para la acumulación de Mo en la Corriente de California, no es posible descartar un efecto indirecto de los cambios de productividad sobre el contenido de Mo en el sedimento, dado que este elemento se produce principalmente como resultado de las reacciones de sulfato reducción, la cual a su vez podría aumentar junto con los aportes de materia orgánica hacia el fondo. A este respecto, para sedimentos del Sistema de la Corriente Perú-Chile, algunos estudios han sugerido cambios en el flujo de materiales biogénicos hacia el sedimento en el pasado reciente (e.g. últimos dos siglos). Así por ejemplo, un testigo de sedimento laminado recolectado sobre el talud continental frente a Pisco (Perú central) mostró períodos con mayor acumulación de material detrítico y terrígeno (bandas claras) y otros con mayor acumulación de sílice amorfo (bandas oscuras) (Gutiérrez et al. 2006). Interesantemente, dichos cambios en el testigo frente a Perú central estuvieron acompañados por considerable variabilidad multidecadal en el contenido de carbono orgánico total (Gutiérrez et al. 2006). Asimismo, frente a Concepción los flujos de carbono inferidos a partir del contenido de clorofila *a* en testigos recolectados sobre la plataforma continental evidencian importantes variaciones estacionales del afloramiento costero así como también en función de la ocurrencia de los ciclos El Niño Oscilación del Sur (e.g. Farías et al. 2004, Graco et al. 2006).

Debido a la interacción entre ventilación del sistema bentónico y las elevadas tasas de acumulación de materia orgánica, ambas capaces de afectar las condiciones de oxigenación, se plantea un problema estadístico de naturaleza compleja que impide discriminar

claramente cuál de estos dos mecanismos (o alternativamente si ambos) fue el responsable de los cambios inferidos en las condiciones redox frente a Callao desde comienzos del siglo XIX (Manuscrito 1). Por un lado puede argumentarse que la mayor acumulación de indicadores biogénicos en el sedimento frente a Callao en los primeros 17 cm del testigo es consecuencia de una mejor preservación en un ambiente más reductor, pero también podría pensarse que precisamente han sido los mayores niveles de productividad desde los años 1830 los que han inducido mayores tasas de sulfato reducción y la disminución de la oxigenación en el sistema bentónico (Hipótesis 3).

Es interesante aquí mencionar además, que resultados recientes obtenidos en la Bahía de Mejillones (Vargas et al., 2007b) indican que este sistema habría presentado una intensificación de los vientos del sur (inferido a partir del incremento de material lítico hacia el sedimento superficial), concomitante con un aumento del contenido de carbono orgánico y la intensificación de la surgencia costera entre AD 1820 y 1870 (inferido a partir de edades “envejecidas” de radio carbono, presumiblemente causadas por el ascenso de aguas frías “viejas” desde debajo de la termoclina). Sin embargo, al parecer estos aumentos de productividad e intensificación de la surgencia en el norte de Chile (Vargas et al., 2007b) no estuvieron acompañados de un cambio drástico en el comportamiento de la razón Mo/Al (Fig. 6B; Manuscrito 2). La variabilidad de la curva de la razón Mo/Al en la Bahía de Mejillones si bien pareciera manifestar una ligera tendencia al aumento desde 1820 AD, está más bien dominada por una fuerte señal de más alta frecuencia que la hace oscilar alrededor de un punto de equilibrio. En consecuencia el aumento de ~ 2.5 a ~ 3 mg C cm⁻² año⁻¹ documentado por Vargas et al. (2007b, su Fig. 2B) no parece haber provocado grandes desequilibrios en las condiciones redox del sedimento, tal como sí se ha determinado en esta tesis para el área frente a Callao desde AD 1830. Estos cambios son

consistentes con los cambios de oxigenación inferidos a partir de la preservación de conchas de foraminíferos en la vecina área de Pisco (Morales et al., 2006).

Por otra parte, cuando se analiza la relación Ti/Al resulta evidente que el cambio en las condiciones redox frente a Callao estuvo sincronizado con un cambio en la acumulación de Ti a partir de AD 1830. Teniendo en cuenta la propiedad del titanio a acumularse en las partículas más grandes de sedimento (e.g. Shimmiel 1992 y referencias citadas allí), es posible que su disminución frente a Callao (Fig. 7A) tenga que ver con la acción erosiva de las corrientes (Manuscrito 1). Dado que sobre la plataforma continental frente a Perú la circulación está dominada por la Corriente Subsuperficial Perú-Chile y que se ha observado que ésta se fortalece durante eventos oceanográficos como El Niño coincidiendo con un aumento en la oxigenación del sistema (e.g. Strub et al., 1998; Hipótesis 4), la evidencia que se presenta en esta tesis sugiere un debilitamiento de la mencionada corriente desde los años 1830, el cual es consistente con una disminución de la ventilación tal como es inferido a partir del contenido de elementos redox-sensibles frente a Perú central. Estas consideraciones, si bien no permiten rechazar la hipótesis 3, sí llevan a pensar en escenarios donde es más probable que se cumpla la hipótesis 4.

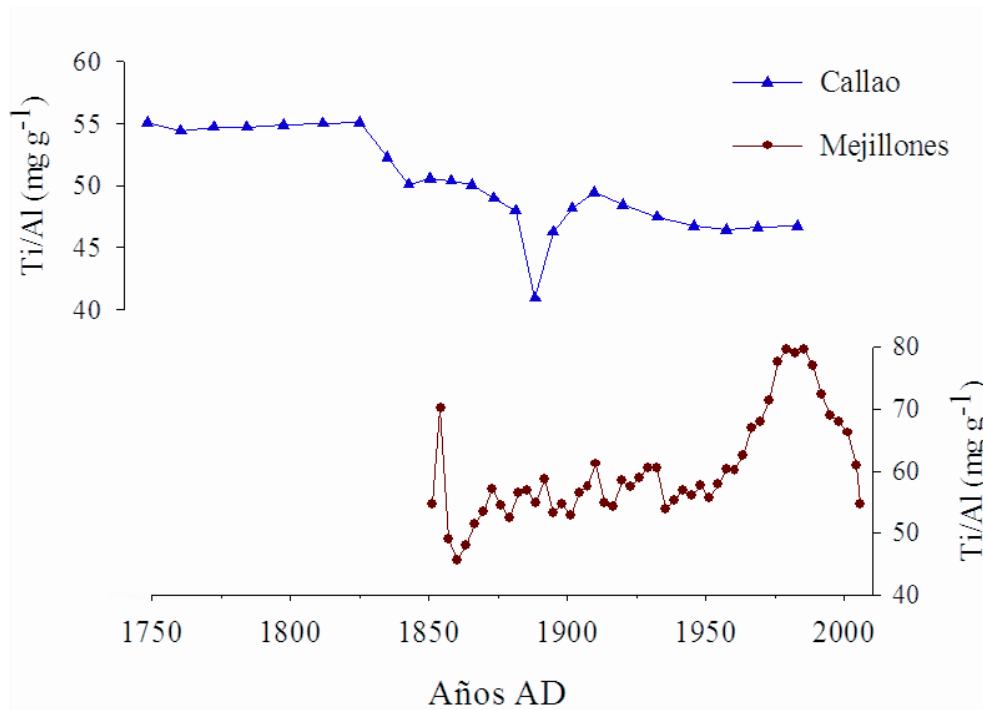


Figura 7. Relación Ti/Al en los testigos recolectados frente a Callao (A) y Bahía de Mejillones (B).

Finalmente, los cambios documentados para Perú en cuanto a las condiciones reductoras no parecen estar relacionados directamente con los observados en la Bahía de Mejillones, esto puede deberse al predominio en este último lugar de condiciones locales (compárense las Figs. 7A y 7B), dado que se trata de un sistema más bien encerrado y con características de circulación muy específicas (e.g. Vargas et al., 2004). Además, los cambios en la relación Ti/Al observados en Mejillones son consistentes con los datos de material lítico presentados por Vargas et al. (2007b), por lo que estarían indicando cambios en la fuente del sedimento posiblemente relacionados con el incremento de los vientos favorables para la surgencia en esta parte de Chile (Vargas et al., 2007b).

Capítulo 6.- Conclusiones y proyecciones futuras

El estudio de escamas de peces en sedimentos del margen Perú-Chile realizado en esta tesis permite comprobar el potencial de éstos como indicadores de la abundancia pasada de peces en la columna de agua, siempre y cuando en las reconstrucciones se tengan en cuenta los posibles cambios de preservación en los sedimentos. Los sesgos de preservación documentados en este trabajo, están íntimamente relacionados con la variabilidad espacial (latitudinal) y temporal (profundidad en la columna de sedimentos) en las condiciones redox del sistema inferidas a partir de la razón Mo/Al. Concretamente, reconstrucciones basadas en restos de peces estarán considerablemente menos afectadas por la preservación en localidades dentro del núcleo de la ZMO como frente a Callao y la Bahía de Mejillones que frente a Chile centro-sur. Sin embargo, como resulta también evidente, aún en localidades ubicadas en el corazón de la ZMO sobre la plataforma continental, son posibles sesgos de preservación debidos a cambios en el pasado de las condiciones reductoras. No obstante, aún en zonas donde las condiciones de oxigenación parecieran desfavorables como en Chile centro-sur, ha sido posible encontrar alta acumulación de escamas de jurel sin que parezcan haber existido grandes fluctuaciones en las condiciones redox en el registro analizado. Evidentemente, el tema de la preservación de restos de peces parece ser más complejo que su relación directa con la oxigenación de los sedimentos, siendo posiblemente necesario considerar otros aspectos como por ejemplo la eficiencia de enterramiento asociada con las altas tasas de sedimentación de la plataforma continental, así como también el efecto de los aparentemente enormes aumentos de abundancia experimentados por especies como el jurel durante el siglo XX.

De forma interesante, es notable que los cambios en las condiciones reductoras y la preservación de restos de peces estén ligados con cambios ambientales drásticos, como el debilitamiento de la Corriente Subsuperficial Perú-Chile desde la primera mitad del siglo XIX. Es más, los cambios de oxigenación en este sistema de límite oriental aparecen no sólo afectando los restos de peces acumulados en los sedimentos, sino también a otros indicadores biogénicos como el carbono orgánico, el nitrógeno total o el carbonato de calcio. Estos hallazgos ponen de relieve un importante problema, aún no resuelto, y que está íntimamente ligado con la dinámica de la ZMO de la corriente Perú-Chile: ¿está la oxigenación del sistema determinada simultáneamente por los niveles de productividad exportada y por la ventilación asociada con la dinámica de las corrientes? La evidencia con que contamos, por lo menos para el centro del Perú, sugiere un papel muy importante de la variabilidad oceanográfica física con lo que el sistema sería más susceptible de responder a cambios como el calentamiento global.

Las perspectivas abiertas con esta tesis son amplias, ya que en la actualidad apenas se están retomando las investigaciones que buscan reconstruir la abundancia pasada de peces en el sistema de la Corriente Perú-Chile. Hacen falta estudios que analicen los procesos de preservación en función de otras variables además de la oxigenación, como por ejemplo la preservación de las escamas dependiendo de la especie. En el caso del jurel por ejemplo, los resultados presentados aquí son los primeros conocidos, ya que la mayoría de los estudios disponibles se han basado en sardina y anchoveta. En este mismo sentido, parece particularmente interesante intensificar los estudios en Chile centro-sur, en donde a pesar de las aparentemente desfavorables condiciones para la preservación asociadas con una menor intensidad de la ZMO, es posible encontrar en buenas condiciones de preservación escamas de especies como el jurel o la merluza.

Referencias

- Abdi, H. 2007. The Bonferonni and Šidák corrections for multiple comparisons. En: Salkind, N. (Ed.). Encyclopedia of Measurements and Statistics, Thousand Oaks (CA).
- Alheit, J. & Ñiquen, M. 2004. Regime shifts in the Humboldt Current ecosystem. Progress in Oceanography 60, 201-222.
- Appleby, P.G. & Oldfield, F. 1978. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. Catena 5, 1-8.
- Arcos, D., Cubillos, L. & Núñez, S. 2001. The jack mackerel fishery and El Niño 1997-98 effects off Chile. Progress in Oceanography 49: 597-617.
- Bakun, A. & Broad, K. 2003. Environmental 'loopholes' and fish population dynamics: comparative pattern recognition with focus on El Niño effects in the Pacific. Fisheries Oceanography 12: 458-473.
- Bakun, A & Cury, P. 1999. The "school trap": a mechanism promoting large-amplitude out-of-phase population oscillations of small pelagic fish species. Ecology Letters 2: 349-351.
- Bakun, A. 1996. Patterns in the ocean. California Sea Grant/CIB: pp. 323.
- Baumgartner, T., Soutar, A. & Ferreira-Batrina, V. 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. Reports of California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations 33: 24-40.

- Blanco J, Thomas, A., Carr, M-E & Strub, T. 2001. Seasonal climatology of hydrographic conditions in the upwelling region off northern Chile. *Journal of Geophysical Research* 106: 11,451-11,467.
- Böning, P., Brumsack, H., Böttcher, M., Schnetger, B., Kriete, C., Kallmeyer, J. & Borchers, S. 2004. Geochemistry of Peruvian near-surface sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68: 4429-4451.
- Böning, P., Cuypers, S., Grunwald, M., Schnetger, B. & Brumsack, H. 2005. Geochemical characteristics of Chilean upwelling sediments at ~30°S. *Marine Geology* 220: 1-21.
- Calvert, S., Bustin, R. & Ingall, E. 1996. Influence of water column anoxia and sediment supply on the burial and preservation of organic carbon in marine shales. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60: 1577-1593.
- Castro, L. & Hernández, E. 2000. Early like survival of the anchoveta *Engraulis ringens* off central Chile during the 1995 and 1996 winter spawning season. *Transactions of the American Fisheries Society* 129: 1107-1117.
- Caviedes, C. & Fik, T. 1992. The Peru-Chile eastern Pacific fisheries and climate oscillation. En: Glantz, M. (Ed.), *Climate variability, climate change and fisheries*. Cambridge University Press, Cambridge UK, pp. 355-376.
- Chavez, F., Ryan, J., Lluch-Cota, S. & Ñiquen, M. 2003. Climate, fish, ocean productivity, and atmospheric carbon dioxide. *Science* 299: 217-221.
- Clarke, A. & Lebedev, A. 1999. Remotely driven decadal and longer changes in the coastal Pacific waters of Americas. *Journal of Physical Oceanography* 29: 828-835.
- Cubillos, L. & Arcos, D. 2002. Recruitment of common sardine (*Strangomera bentincki*) and anchovy (*Engraulis ringens*) off central-south Chile in the 1990s and the impact of the 1997-1998 El Niño. *Aquatic Living Resources* 15: 87-94.

- Cubillos, L., Serra, R. & Freón, P. 2007. Synchronous pattern of fluctuation in three anchovy fisheries in the Humboldt Current System. *Aquatic Living Resources* 20: 69-75.
- Cuevas, L. & Morales, C. 2006. Nano-heterotroph grazing on bacteria and cyanobacteria in oxic and suboxic waters in coastal upwelling areas off northern Chile. *Journal of Plankton Research* 28: 385-397.
- Cury, P. & Roy, C. 1989. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 46: 670-680.
- Dean, W., Gardner, J. & Piper, D. 1997. Inorganic geochemical indicators of glacial-interglacial changes in productivity and anoxia on the California continental margin. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61: 4507-4518.
- Dean, W., Zheng, Y., Ortiz, J. & Van Geen, A. 2006. Sediment Cd and Mo accumulation in the oxygen-minimum zone off western Baja California linked to global climate. *Paleoceanography* 21 doi: 10.1029/2005PA001239.
- DeVries, T. & Percy, W., 1982. Fish debris in sediments of the upwelling zone off central Peru: a late Quaternary record. *Deep-Sea Research* 28: 87-109.
- Elizarov, A., Grechina, A., Kotenev, B. & Kuzetsov, A. 1993. Peruvian jack mackerel, *Trachurus symmetricus murphyi*, in the open waters of the south Pacific. *Journal of Ichthyology* 33: 86-104.
- Emery, W & Thompson, R. 2004. *Data analysis methods in physical oceanography*, 2nd edition. Elsevier, Amsterdam.
- FAO, 1997. *Review of the state of world fishery resources: marine fisheries*. FAO Fisheries Circular 920, Rome.

- Farías, L., Graco, M. & Ulloa, O. 2004. Temporal variability of nitrogen cycling in continental-shelf sediments of the upwelling ecosystem off central Chile. *Deep-Sea Research II* 51: 2491-2505.
- Finney, B., Gregory-Eaves, I., Douglas, M. & Smol, J. 2002. Fisheries productivity in the northeastern Pacific Ocean over the past 2,200 years. *Nature* 416: 729-733.
- Flynn, W. 1968. The determination of low levels of polonium-210 in environmental materials. *Analytica Chimica Acta* 43: 221-227.
- Fonseca, T. & Farías, M. 1987. Estudio del proceso de surgencia en la costa chilena utilizando percepción remota. *Investigación Pesquera (Chile)* 34: 33-46.
- Freón, P., Mullon, C. & Voisin, B. 2003. Investigating remote synchronous patterns in fisheries. *Fisheries Oceanography* 12: 443-457.
- Froelich, P., Kim, K., Jahnke, R., Burnett, W., Soutar, A. & Deakin, M. 1983. Pore water fluoride in Peru continental margin sediments: uptake from seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 47: 1605-1612.
- Galleguillos, R., Troncoso, L., Oyarzun, C., Astorga, M. & Peñalosa, M. 2000. Genetic differentiation in Chilean hake *Merluccius gayi gayi* (Pises: Merlucciidae). *Hydrobiologia* 420: 49-54.
- González, H., Giesecke, R., Vargas, C.A., Pavez M., Iriarte, J., Santibáñez, P., Castro, L., Escribano, R. & Pagès, F. 2004. Carbon cycling through the pelagic foodweb in the northern Humboldt Current off Chile (23°S). *ICES Journal of Marine Science* 61: 572-584.
- González, H., Sobrazo, M., Figueroa, D. & Nöthing, E. 2000. Composition, biomasa and potential grazing impact of the crustacean and pelagic tunicates in the northern

- Humboldt Current area off Chile: Differences between El Niño and non-El Niño years. *Marine Ecology Progress Series* 195: 201-220.
- Graco, M., Gutiérrez, D. & Farías, L. 2006. Inter.-annual variability of the pelagic-benthic coupling in the upwelling system off central Chile. *Advances in Geosciences* 6: 127-132.
- Grechina 1998. Historia de investigaciones y aspectos básicos de la ecología del jurel (*Trachurus symmetricus murphyi* (Nichols)) en alta mar del Pacífico sur. En: D. Arcos (Ed.). *Biología y ecología del jurel en aguas chilenas*. Editorial Anibal Pinto, Concepción, Chile, pp.11-34.
- Gutiérrez, D., Siffedine, A., Reyss, J., Vargas, G., Velazco, F., Salvattecí, R., Ferreira, V., Ortlieb, L., Field, D., Baumgartner, T., Boussafir, M., Boucher, H., Valdés, J., Marinovic, L., Soler, P. & Tapia, P. 2006. Anoxic sediments off Central Peru record interannual to multidecadal changes of climate and upwelling ecosystem during the last two centuries. *Advances in Geosciences* 6: 119-125.
- Halpin, P., Strub, T., Paterson, W. & Baumgartner, T. 2004. An overview of interactions among oceanography, marine ecosystems, climatic and human disruptions along the eastern margins of the Pacific Ocean. *Revista Chilena de Historia Natural* 77: 371-409.
- Helly, J. & Levin, L. 2004. Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins. *Deep-Sea Research* 51: 1159-1168.
- Hill, K., Lo, N., Macewicz, B. & Felix-Urraga, R. 2006. Assessment of the Pacific sardine (*Sardinops sagax caerulea*) population for the U.S. management in 2007. NOAA Technical Memorandum NMFS, pp 79.

- Holmgren-Urba, D. & Baumgartner, T. 1993. A 250-year history of pelagic fish abundances from the anaerobic sediments of the central Gulf of California. *Reports of California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations* 34: 60-68.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Pachauri, R.K & Reisinger, A. (eds.). Geneva, Switzerland.
- Jahncke, J., Checkley, D. & Hunt, G. 2004. trends in carbon flux to seabirds in the peruvian upwelling system: effects of wind and fisheries on population regulation. *Fisheries Oceanography* 13: 208-223.
- Johnson, R.A. & Wichern, D.W. 1998. *Applied multivariate statistical analysis*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J.
- Kawasaki, T. & Omori, M. 1995. Possible mechanisms underlying fluctuations in the Far Eastern sardine population inferred from time series of two biological traits. *Fisheries Oceanography* 4: 238-242.
- Kim, K. & Burnett, W. 1988. Accumulation and biological mixing of Peru margin sediments. *Marine Geology* 80: 181-194.
- Klyashtorin, L. 2001. Climate change and long-term fluctuations of commercial catches: the possibility of forecasting. *FAO Fisheries Technical Paper* 410, Rome. 86 p.
- Kudrass H.R. et al. 2002. Peru upwelling, final report, SONNE Cruise SO 147. BGR, Hannover.
- Laboratorio de Genética & Acuicultura (LGA). Base de datos, ficha por especie, jurel proyecto FIP 2006-52, Base de datos sobre recursos genéticos pesqueros, acuícolas

- y nativos). www.laboratoriogenetica.cl/propuestafip-ficha-jurel.htm. Consultado el 9 de abril de 2008.
- Lluch-Belda, D., Crawford, R., Kawasaki, T., MacCall, A., Parrish, R., Schwartzlose, R. & Smith, P. 1989. World-wide fluctuations of sardine and anchovy stocks: The regime problem. *South African Journal of Marine Science* 8: 195-205.
- Meyers, S., Sageman, B., Lyons, T. 2005. Organic carbon burial rate and the molybdenum proxy: Theoretical framework and application to Cenomanian-Turonian oceanic anoxic event 2. *Paleoceanography* 20, doi:10.1029/2004PA001068.
- Milessi, A., Sellanes, J., Gallardo, V. & Lange, C. 2005. Osseous skeletal material and fish scales in marine sediments under the oxygen minimum zone off northern and central Chile. *Estuarine and coastal shelf science* 64: 185-190.
- Montecinos, A., Purca, S. & Pizarro, O. 2003. Interannual-to-interdecadal sea surface temperature variability along the western coast of South America. *Geophysical Research Letters* 30 doi: 10.1029/2033GL017345.
- Morales, M., Field, D., Mayor, S., Gutierrez, D., Sifeddine, A., Ortlieb, L., Ferreira, V., Salvatecci, R. & Velasco, F., 2006. Variaciones de foraminíferos de los últimos 460 años en sedimentos laminados de la plataforma continental peruana. *Boletín Sociedad Geológica del Perú* 101: 5-18.
- Mortlock, A. & Froelich, P., 1989. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep-Sea Research* 36: 1415-1426.
- Muñoz P, Lange, C., Gutiérrez, D., Hebbeln, D., Salamanca, M., Dezileau, L., Reyss, J. & Benninger, L. 2004. Recent sedimentation and mass accumulation rates based on ^{210}Pb along the Peru-Chile continental margin. *Deep-Sea Research II* 51: 2523-2541.

- Nameroff, T., Calvert, E. & Murray, W., 2004. Glacial-interglacial variability in the eastern tropical North Pacific oxygen minimum zone recorded by redox-sensitive trace metals. *Paleoceanography* 19 doi: 10.1029/2003PA000912.
- North, G., Bell, T. & Cahalan, R. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Monthly Weather Review* 10: 699-706.
- O'Connell, J. & Tunnicliffe, V., 2001. The use of sedimentary fish remains for interpretation of long-term fish population fluctuations. *Marine Geology* 174: 177-195.
- Oliva, M. & Ballón, I. 2002. Metazoan parasites of the Chilean hake *Merluccius gayi gayi* as a tool for stock discrimination. *Fisheries Research* 56: 313-320.
- Ortlieb, L., Zuñiga, O., Follegati, R., Escribano, R., Kong, I., Mourguiart, P., Valdés, J. & Iratchet, P., 1994. Paleoceanografía de Bahía de Mejillones del sur (Antofagasta, Chile): resultados preliminares para el último milenio. *Estudios Oceanológicos* 13: 45-55.
- Ortlieb, L., Escribano, R., Follegati, R., Zuñiga, O., Kong, I., Rodríguez, L., Valdés, J., Guzmán, N. & Iratchet, P. 2000. Recording ocean-climate changes during the last 2,000 years in a hypoxic marine environment off northern Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 73: 221-242.
- Oyarzun, C., Paya, I., Galleguillos, R. & Oliva, M. 1997. Unidades de stock en el recurso merluza común de la zona centro-sur. Informe Técnico Instituto de Fomento Pesquero, proyecto FIP 94-18. 72 p.
- Patterson, R., Wright, C., Chang, A., Taylor, L., Lyons, P., Dallimore, A. & Kumar, A., 2002. Atlas of common squamatological (fish scale) material in coastal British

- Columbia and an assessment of the utility of various scale types in paleofisheries reconstruction. *Palaeontologia Electronica* 4. <http://palaeo-electronica.org>.
- Patterson, R., Prokoph, A., Wright, C., Chang, A., Thompson, R. & Ware, D. 2004. Holocene solar variability and pelagic fish productivity in the NE Pacific. *Palaeontologia Electronica* 7. <http://palaeo-electronica.org>.
- Patterson, R., Prokoph, A., Kumar, A., Chang, A. & Roe, H., 2005. Late Holocene variability in fish scales and dinoflagellate cysts along the west coast of Vancouver Island, NE Pacific Ocean. *Marine Micropaleontology* 55: 183-204
- Paulmier, A., Ruiz-Pino, D., Garçon, V. & Farías, L. 2006. Maintaining of the Eastern South Pacific Oxygen Minimum Zone (OMZ) off Chile. *Geophysical Research Letters* 33 doi: 10.1029/2006GL026801.
- Ruttenberg, K., 1992. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. *Limnology and Oceanography* 37: 1460-1482.
- Rutllant, J., Masotti, I., Calderón, J. & Vega, S. 2004. A comparison of spring coastal upwelling off central Chile at the extremes of the 1996-1997 ENSO cycle. *Continental Shelf Research* 24: 773-787.
- Schenau, S. & De Lange, G.J., 2000. A novel chemical method to quantify fish debris in marine sediments. *Limnology and Oceanography* 45: 963-971.
- Schenau, S., Slomp, C. & De Lange, G., 2000. Phosphogenesis and phosphorite formation in sediments located within the Arabian Sea Oxygen Minimum Zone. *Marine Geology* 169: 1-20.
- Schwartzlose, R., Alheit, J., Bakun, A., Baumgartner, T., Cloete, R., Crawford, R., Fletcher, W., Green-Ruiz, Y., Hagen, E., Kawasaki, T., Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, S., MacCall, A., Matsuura, Y., Narvaéz-Martínez, M., Parrish, R., Roy, C.,

- Serra, R., Shust, K., Ward, M. & Zuzunaga, J., 1999. Worldwide large-scale fluctuations of sardine and anchovy populations. *South African Journal of Marine Science* 21: 289-335.
- Sepúlveda, A., Cubillos, L., Grechina, H., Peña, H., Villugron, L., Hernández, A., Miranda, L., Sobrazo, P., Serra, R., Braun, M., Bohm, G., Valenzuela, V., Galleguillos, R., Montoya, R. & Quiñones, R. 1998. Migración del jurel desde y hacia la ZEE de Chile. Informe Técnico Instituto de Fomento Pesquero, Proyecto FIP 96-15. 273 p.
- Sepúlveda, A., Nuñez, S., Peña, H., Cubillos, L., Hernandez, A., Mariela, T., Bucary, D., Rojas, A., Vejar, F., Gonzalez, C., Barbieri, M. A., Cordova, J., Espejo, M. & Lillo, S. 2001. Informe Técnico Instituto de Fomento Pesquero, Proyecto FIP 99-14. 147 p.
- Serra, R., 1983. Changes in the abundance of pelagic resources along the Chilean coast. *FAO Fisheries Report* 291: 255-284.
- Serra, R., Cury, P. & Roy, C. 1998. The recruitment of the Chilean sardine (*Sardinops sagax*) and the “optimal environmental window”. En: Durand, M., Cury, P., Mendelssohn, R., Roy, C., Bakun, A. & Pauly, D. (Eds.). *From local to global changes in upwelling systems*. Editions de l’institut de Recherche pour le Développement, Paris. pp. 409-422.
- Shaffer, G., Pizarro, O., Djurfeldt, L., Salinas, S. & Rutllant, J., 1997. Circulation and low-frequency variability near the Chilean coast: remotely forced fluctuations during the 1991-92 El Niño. *Journal of Physical Oceanography* 27: 217-235.
- Sharp, G. 2004. Cambio climático y pesquerías regionales en el futuro: análisis en colaboracion. *FAO Documento Técnico de Pesca* 452, Roma, 84 p.

- Shimmield, G. 1992. Can sediment geochemistry record changes in coastal upwelling palaeoproductivity? Evidence from northwest Africa and the Arabian Sea. En: Summerhayes, C., Prell, W. & Emeis, K. (Eds.). *Upwelling Systems: Evolution Since the Early Miocene*. Geological Society Publication 64: 29-46.
- Skilbeck, C. & Fink, D. 2006. Data report: Radiocarbon dating and sedimentation rates for Holocene–upper Pleistocene sediments, eastern equatorial Pacific and Peru continental margin. In: Jørgensen, B., D’Hondt, S., and Miller, D. (Eds.), *Proc. ODP, Sci. Results 201*, pp. 1–15 [Online].
- Slomp, C. & Van Cappellen, P. 2007. The global marine phosphorus cycle: sensitivity to oceanic circulation. *Biogeosciences* 4: 155-171.
- Slomp, C., Epping, E., Helder, W. & Van Raaphorst, W. 1996. A key role for iron-bound phosphorus in authigenic apatite formation in North Atlantic continental platform sediment. *Journal of Marine Research* 54: 1179–1205.
- Soutar, A. & Isaacs, J. 1969. History of fish populations inferred from fish scales in anaerobic sediments off California. *Reports of California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations* 13: 63-70.
- Soutar, A. & Isaacs, J. 1974. Abundance of pelagic fish during the 19th and 20th centuries as recorded in anaerobic sediment off the Californias. *Fishery Bulletin* 72: 257-273.
- Soutar, A. 1966. The accumulation of fish debris in certain California coastal sediments. *California Cooperative Fisheries Investigations Reports* 11: 136-139.
- StatSoft, Inc. 2001. *STATISTICA* (data analysis software system), version 6, www.statsoft.com.

- Strub, T., Mesias, J., Montecino, V., Rutllant, J. & Salinas, S. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. Coastal segment (6,E). In: Robinson, A., Brink, K. (Eds.), *The Sea*, Volume 11, pp. 273-310.
- Stuiver, M., Reimer, P.J. & Reimer, R.W. 2005. CALIB 5.0. [WWW program and documentation].
- Suess, E. 1981. Phosphate regeneration from sediments of the Peru continental margin by dissolution of fish debris. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 45: 577-588.
- Thomas, A., Carr, M. & Strub, T. 2001. Chlorophyll variability in eastern boundary currents. *Geophysical Research Letters* 28: 3421-3424.
- Valdés, J. & Ortlieb, L. 2001. Paleoxigenación subsuperficial de la columna de agua en la bahía Mejillones del sur (23°S): Indicadores geoquímicos en testigos de sedimento marino. *Investigaciones Marinas, Valparaíso*, 29: 25-35.
- Vargas G., Ortlieb, L., Pichon, J., Bertaux, J. & Pujos, M. 2004. Sedimentary facies and high resolution primary production inferences from laminated diatomaceous sediments off northern Chile (23°S). *Marine Geology* 211: 79-99.
- Vargas, C., Martínez, R., Cuevas, L.A., Pavez, M., Cartes, C., González, H., Escribano, R. & Daneri, G. 2007a. The relative importance of microbial and classical food webs in a highly productive coastal upwelling area. *Limnology and Oceanography* 52: 1495-1590.
- Vargas, G., Pantoja, S., Rutllant, J., Lange, C.B., & Ortlieb, L. 2007b. Enhancement of coastal upwelling and interdecadal Enso-like variability in the Per-Chile Current since late 19th century. *Geophysical Research Letters* 34 doi: 10.1029/2006GL028812.

Yáñez, E., Barbieri, M.A., Silva, C., Nieto, K & Espíndola, F. 2001. Climate variability and pelagic fisheries in northern Chile. *Progress in Oceanography* 49: 581-596.

Zuzunaga, J. 2002. Some shared fish stocks of south eastern Pacific. *FAO Fisheries Report* 695: 1-240.

