

Variabilidad climática interdecadal en el Pacífico

El clima cambiante

Una de las características más notables del clima es que cambia continuamente. Todos tenemos la noción que el clima de invierno es diferente al clima de verano, no importa en qué región del planeta nos encontremos. Hay algo que podemos notar: las madrugadas son más heladas, desaparece el viento que proviene del norte, y la estación de lluvias o lloviznas empieza. El vivir en un lugar implica necesariamente el conocimiento de este cambio del clima local. Al cambio periódico del clima que va desde el verano al invierno, lo podemos considerar un ciclo o bien una oscilación. Este ciclo anual es particularmente intenso y se manifiesta como fluctuaciones en muchas variables físicas, tanto en la atmósfera como en el océano.

Por otra parte, no todos los veranos o inviernos son climáticamente iguales. Existen estaciones lluviosas más o menos intensas, periodos secos que se prolongan o acortan más de lo normal, veranos particularmente cálidos o primaveras particularmente frías. Estas variaciones del ciclo anual, que diferencian un año de otro, corresponden a fluctuaciones en la escala interanual (entre año y año). Uno de los fenómenos interanuales más importantes y conocidos es El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). De hecho, ENOS es la principal fuente o forzante de la variabilidad interanual en la cuenca del océano Pacífico y en muchas otras partes del planeta^{1,2,3}.

Hoy en día, sabemos que existen fluctuaciones climáticas de periodos más largos, que van desde escalas de tiempo de décadas hasta siglos y milenios. Es importante diferenciar aquellas fluctuaciones de largo plazo que son manifestaciones de la dinámica natural del sistema climático de aquellas producidas por forzantes antropogénicos (o cambio climático antropogénico). En particular, cuando se observan décadas con características climáticas diferentes de otras, podríamos considerarlas como fluctuaciones u oscilaciones interdecadales (entre décadas) naturales. Gracias a la mayor cobertura y largo de los registros instrumentales, la mayoría de los trabajos sobre variabilidad interdecadal en el Pacífico se han concentrado en el Hemisferio Norte^{4,5,6}.

Pesquerías y sucesión de especies

Como en otras regiones del planeta^{7,8}, las primeras descripciones de fluctuaciones interdecadales de variables oceanográficas, como la temperatura superficial del mar (TSM) y el nivel medio del mar (NMM), y atmosféricas, como el viento en superficie, fueron realizadas en relación a las fluctuaciones que experimentan las pesquerías pelágicas, incluyendo los casos de Perú⁹ y Chile¹⁰.

En las pesquerías de todo el planeta, se observan sucesiones de peces, las cuales pueden permanecer durante décadas en ciertos hábitats para luego desaparecer



Dr. Aldo Montecinos
Profesor asociado, Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción, Chile

Doctor en Oceanografía de la Universidad de Concepción (Chile), Magister en Ciencias Atmosféricas de la Universidad de Chile y Oceanógrafo de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (Chile). Actualmente es Profesor Asociado en el Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Concepción. Su principal interés de investigación es la variabilidad climática en la región oriental del Pacífico Sur y en Sudamérica, en distintas escalas de tiempo. En particular, le interesan los procesos de interacción entre el océano y la atmósfera, especialmente aquellos que involucran teleconexiones entre el trópico y el extratropical, y tiene varias publicaciones sobre los impactos de El Niño-Oscilación Sur y sobre la variabilidad climática a escala interdecadal en el Pacífico Sur.

y ser reemplazadas por especies diferentes. Estas fluctuaciones se han observado en todas las grandes pesquerías, incluyendo las que se desarrollan en las mayores zonas de surgencia costera en los océanos Pacífico y Atlántico. En Perú, se han observado alternancias entre sardina y anchoveta durante el siglo XX. A comienzos de la década de los setenta colapsó la gran pesquería de anchoveta, siendo reemplazada por sardina. Esta última pesquería fue muy importante a mediados de la década de los ochenta, colapsando hacia comienzos de la década de los noventa. A partir de entonces, la anchoveta recuperó nuevamente su importancia⁷. Esta sucesión entre anchoveta y sardina también se observa en el norte de Chile, aunque el reemplazo de anchoveta por sardina se observó a mediados de la década de los setenta¹⁰. Hacia latitudes medias de Chile, también se observan cambios en la presencia de peces, variando de anchoveta a sardina común y viceversa¹⁰. Si bien estas fluctuaciones se pueden explicar por la presión de pesca y las regulaciones al manejo de estas pesquerías, no se descarta el rol de las oscilaciones interdecadales en estas sucesiones^{11,12}.

Es importante destacar que, a pesar de la importancia que tienen en las economías locales las sucesiones de estas especies pelágicas, y en consideración que se conocen las anomalías o desviaciones oceanográficas y atmosféricas asociadas, no se han encontrado razones plausibles para explicar este comportamiento. Si bien se han podido asociar a oscilaciones interdecadales conocidas, en muchos casos resulta controversial debido a las diferencias en los momentos en que estas sucesiones ocurren¹³.

Cambios entre décadas

Uno de los aspectos más contrarios a la intuición de estas fluctuaciones interdecadales de peces, es que las anomalías o desviaciones de distintas variables oceanográficas son muy pequeñas, en relación a las desviaciones asociadas al ciclo anual o a la variabilidad interanual, especialmente en zonas

Variabilidad climática interdecadal en el Pacífico

Montecinos A.

tropicales. Una de las variables que siempre se utiliza para explicar las sucesiones de especies pelágicas es la TSM. La Figura 1 muestra la desviación estándar (en °C), es decir la dispersión promedio de los valores de TSM mensuales respecto al promedio climatológico, una vez que se han filtrado las series de tiempo de tal manera que solo queda la variabilidad interanual (entre 2 y 5 años, panel superior) y la interdecadal (entre 10 y 50 años, panel inferior). Se observa que la mayor variabilidad interanual se presenta a lo largo del Pacífico Ecuatorial Central y Oriental, especialmente en la zona comprendida entre las Islas Galápagos y las costas de Ecuador y norte de Perú, donde la desviación estándar alcanza valores cercanos a 1°C. El responsable de esta gran variabilidad es evidentemente ENOS. También se observa alta variabilidad interanual (por sobre 0,5°C) en otras regiones, aparentemente asociada a las corrientes cálidas de Kuroshio en el Pacífico Norte y del Golfo en el Atlántico Norte, así como en las costas de Baja California en Norteamérica y Angola en África.

La variabilidad interdecadal de la TSM (panel inferior de la Figura 1) presenta notablemente menores desviaciones estándar, especialmente en aquellas zonas que presentan una alta variabilidad interanual. De acuerdo a este análisis, la región que presenta la más alta variabilidad interdecadal es la costa de Perú central y sur, con desviaciones estándar por sobre 0,5°C. Es interesante destacar que desde aproximadamente 15°S hacia el sur, la variabilidad interdecadal presenta magnitudes similares a la interanual en la zona costera occidental de Sudamérica.

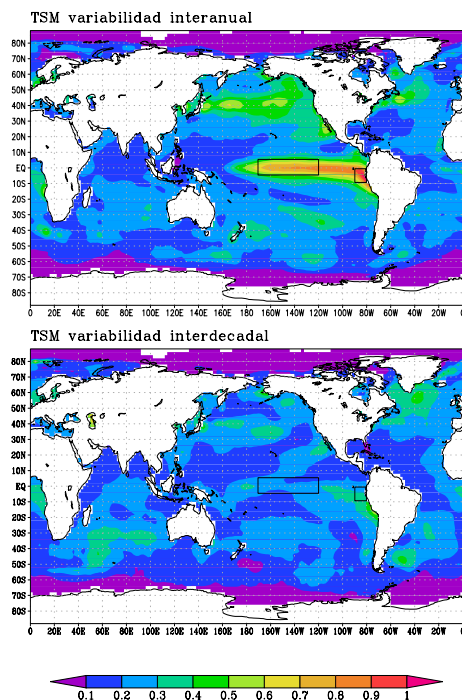


Figura 1. Desviación estándar (en °C) de la temperatura superficial del mar, de series mensuales filtradas en las escalas interanual (panel superior) e interdecadal (panel inferior). Fuente: Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST^{v4}), entre 1950 y 2013. A las series se les extrajo la tendencia lineal del periodo total analizado. Los rectángulos (línea negra) indican las regiones Niño 3.4 (5°S-5°N, 170-120°W) y Niño 1+2 (10°S-0°, 90-80°W).

Otra forma de visualizar las fluctuaciones en la escala interdecadal se muestra en la Figura 2. En este caso se observan las series de tiempo de la TSM promediada en dos regiones: Niño 3.4 en el Pacífico Ecuatorial Central (5°S-5°N, 170-120°W) y Niño 1+2 en el sector oriental (10°S-0°, 90-80°W). Para la variabilidad interanual, se observa que hay simultaneidad en ambas regiones, siendo notables los eventos extraordinarios de 1982-83 y 1997-98. Las desviaciones estándar confirman que la variabilidad interanual aumenta hacia la costa de Sudamérica, con valores de 0,68°C y 0,82°C en las regiones Niño 3.4 y 1+2, respectivamente. La gran mayoría de los eventos El Niño (La Niña) presentan anomalías positivas (negativas) de TSM que son superiores (inferiores) a 1°C (-1°C), superando la anomalía de 2°C solo durante los eventos El Niño extraordinarios.

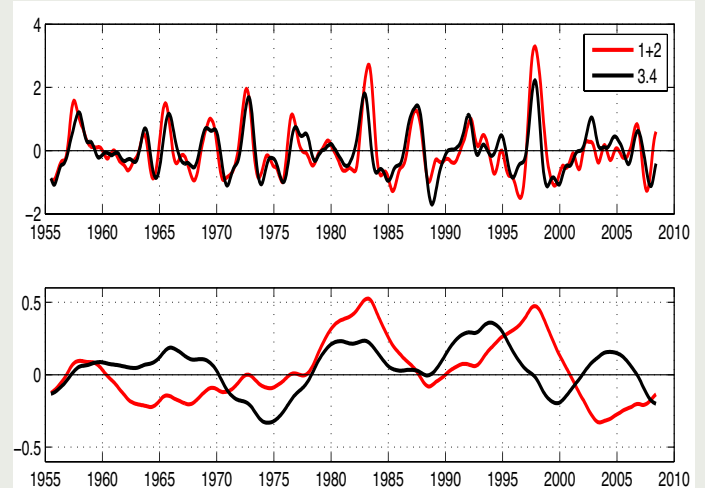


Figura 2. Series de tiempo de anomalías de la temperatura superficial del mar en las regiones Niño 3.4 (5°S-5°N, 170-120°W, línea negra) y Niño 1+2 (10°S-0°, 90-80°W, línea roja), filtradas en las escalas interanual (panel superior) e interdecadal (panel inferior). Fuente: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/Readme.index.shtml>.

En cambio, la variabilidad interdecadal no registra anomalías superiores a 0,5°C (en valor absoluto), con desviaciones estándar de 0,17°C en la región Niño 3.4 y 0,23°C en la región Niño 1+2, observándose además un evidente desfase entre las regiones del Pacífico Ecuatorial. El periodo frío más intenso se observa en la década de los setenta en la región Niño 3.4, mientras que en la región Niño 1+2 parece haber sido más extenso en el tiempo (entre las décadas de los sesenta y mediados de los setenta), apareciendo nuevamente y más intenso a partir de los primeros años del siglo XXI. En términos de fases cálidas y frías, se puede indicar que en el Pacífico Oriental Ecuatorial se presentaron anomalías negativas en general (fase fría) durante las décadas de los años sesenta y setenta, seguidas por un periodo cálido en las décadas de los ochenta y noventa, para luego cambiar nuevamente a una fase fría en lo que va del presente siglo. Estos cambios son simultáneos a lo largo de las costas de Ecuador, Perú y Chile¹⁵.

La Figura 3 muestra varias anomalías interdecadales observadas más al sur, en Antofagasta (~23°S). Mientras la TSM presenta una amplitud del orden de 0,8°C, similar a las descritas anteriormente, las anomalías de NMM tienen una amplitud de 6 cm, el viento meridional de 1 m/s, mientras que la amplitud de la profundidad de la termoclina es de solo 10

m. Claramente, las amplitudes de la variabilidad interdecadal de la profundidad de la termoclina y de la ANM son un orden de magnitud menor que las asociadas a la variabilidad interanual¹⁶.

La Oscilación Interdecadal del Pacífico (IPO)

El patrón espacial del IPO tiene similitudes a lo observado durante las fases extremas del ciclo ENOS. En la Figura 4 se observan mapas de correlación con los campos de TSM y presión a nivel del mar (PNM). Durante la fase cálida (fría) se notan anomalías positivas (negativas) de TSM en el Pacífico Tropical Central y Oriental, extendiéndose hacia latitudes altas a lo largo de las costas de Sudamérica y Norteamérica. Esta extensión es mayor que en el caso de ENOS. Otro rasgo distintivo es que las mayores anomalías no están localizadas en la banda ecuatorial como en ENOS. En latitudes medias del Pacífico Norte se observa una importante anomalía negativa (positiva) de TSM en el sector central y occidental. En cuanto al campo de PNM, al igual que con ENOS, se resaltan anomalías negativas (positivas) en el Pacífico Oriental durante la fase cálida (fría) del IPO, mientras sobre el sector occidental del Pacífico Tropical-Subtropical se registran anomalías positivas (negativas). Es decir, la Oscilación del Sur está igualmente involucrada en el patrón del IPO, con un anticiclón subtropical del Pacífico Sur debilitado (intensificado) durante las fases cálidas (frías) del IPO. Es notable que durante la fase cálida (fría) se observan anomalías negativas (positivas) de la PNM en el océano Austral, alrededor de la Antártica. Este patrón del campo de PNM indica que las fase cálidas (frías) del IPO se caracterizan por presentar vientos ecuatoriales del este debilitados (intensificados) en el sector occidental y vientos del oeste en latitudes altas debilitados (intensificados)^{30,31,22}. Es interesante destacar que junto con el debilitamiento (intensificación) de los vientos del oeste, se registra una disminución (aumento) de la actividad ciclónica en torno a 50°S³².

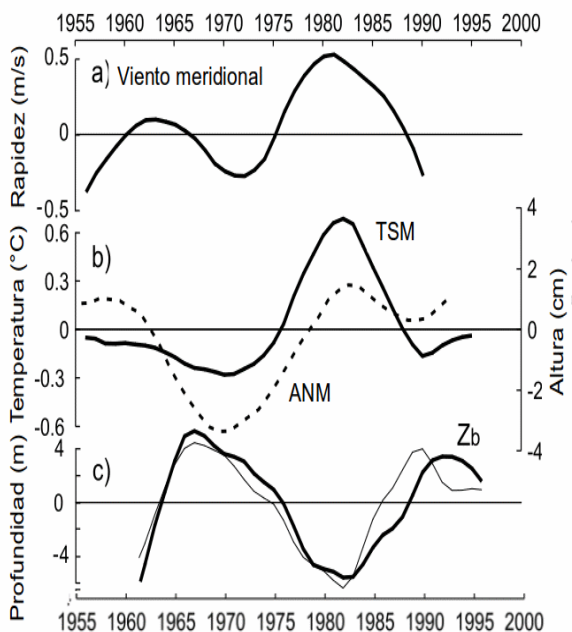


Figura 3. Series de tiempo de anomalías de (a) viento meridional (m/s), (b) temperatura superficial del mar (°C) y nivel medio del mar (cm), (c) profundidad observada de la termoclina (Zb en la figura, m) y (d) estimada a partir del viento ecuatorial (m) en Antofagasta (~23.5°S). Figura modificada de Pizarro y Montecinos (2004)¹⁶.

Oscilaciones interdecadales

Desde las primeras descripciones de las fluctuaciones climáticas en la escala interdecadal se han definido varios patrones o modos de variabilidad: Oscilación Decadal del Pacífico (PDO¹⁷), modo "ENSO-like"¹⁸, Oscilación del Pacífico Norte (NPO¹⁹), Oscilación Multidecadal del Pacífico (PMO²⁰). Todos ellos muestran que el Pacífico Norte es la región donde la variabilidad interdecadal se desarrolla con mayor intensidad. Sin embargo, evidencias recientes sugieren que la oscilación interdecadal muestra un patrón simétrico en la variabilidad del clima del Hemisferio Norte y Sur^{21,22,23,24}.

Estudios observacionales y de modelación han resaltado que estas oscilaciones interdecadales consisten de dos modos distintivos: un modo regional confinado al Pacífico Norte y otro que compromete toda la cuenca del océano Pacífico^{25,26,27,28}. Específicamente, se propone que el modo tropical del Pacífico o "ENSO-like" es esencialmente bidecadal, mientras que el Modo del Pacífico Norte (NPM) es multidecadal²⁸. De acuerdo al conocimiento actual de la variabilidad interdecadal en el Pacífico Tropical y Extratropical, lo más apropiado es utilizar la Oscilación Interdecadal del Pacífico (IPO²³), que corresponde a la oscilación interdecadal en ambos hemisferios del océano Pacífico. Entre la IPO y la PDO existe una alta correlación positiva.

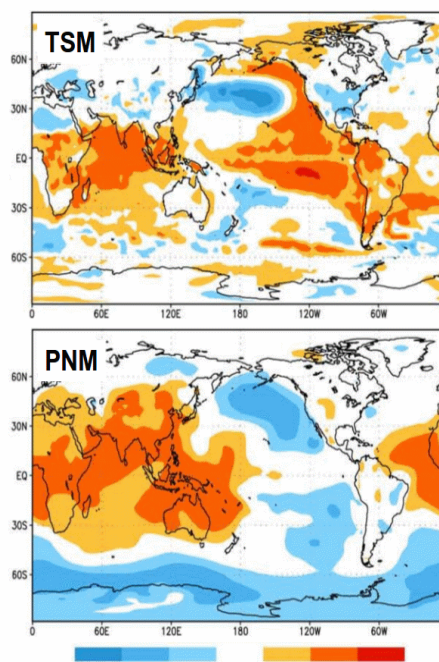


Figura 4. Mapas de correlación entre la PDO y la temperatura superficial del mar (panel superior) y la presión a nivel del mar (panel inferior). Figura modificada de Garreaud et al. (2008)²⁹.

Variabilidad climática interdecadal en el Pacífico

Montecinos A.

En el sector trófico-subtrófico del Pacífico Sur, la fase cálida del IPO se asocia con una Zona de Convergencia del Pacífico Sur (ZCPS) al norte de su posición climatológica, sin que se observe una alteración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), lo cual es característico de los eventos cálidos de escala interanual²². Este último rasgo es consistente con el hecho que las anomalías de TSM del Pacífico Tropical en la escala interdecadal son menos pronunciadas, en comparación con las de escala interanual. Respecto de las fluctuaciones de baja frecuencia de la ZCPS, se indica que su posición media tiende a presentarse sobre el sector frío de la región de máximo gradiente superficial de TSM del IPO³³. Luego la ZCPS, que se extiende desde 170°E hasta 120°W, se presenta al noreste (suroeste) de su posición normal cuando la IPO se encuentra en su fase cálida (fría).

(positivo) en la sierra y el sector amazónico. En Chile central aumenta (disminuye) la precipitación, mientras que en Brasil central y sur también aumenta (disminuye). Por otro lado, durante la fase cálida (fría) del IPO, se observa un aumento (disminución) de la temperatura superficial del aire especialmente en los sectores más influenciados por el océano en las costas de Perú y norte de Chile.

Mecanismos

Debido a que el patrón del IPO presenta anomalías en el sector tropical del Pacífico (Figura 4), se podría esperar alguna relación con el ciclo ENOS. De hecho, en el periodo cálido del IPO, entre las décadas de los ochenta y noventa, se observaron los eventos El Niño extraordinarios de 1982-83 y 1997-98. Durante la fase cálida, el desplazamiento hacia el este del gradiente zonal de TSM en el Pacífico Tropical y por lo tanto cambios en los vientos alisios y la inclinación de la termoclina ecuatorial, podrían influenciar el comportamiento del ENOS³⁴.

Por ahora no existe consenso sobre el funcionamiento del sistema climático del océano Pacífico y de los continentes adyacentes en la escala interdecadal. Sin embargo, debido a la escala temporal involucrada, se considera esencial el rol del océano y de los procesos de retroalimentación que sean capaces de mantener estados anómalos por varios años, así como la interacción que puede haber entre las zonas extratropicales y tropicales.

Referencias

1. Rasmusson, E. M., and T. H. Carpenter, 1982: Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño, *Monthly Weather Review*, 110, 354-384.
2. Ropelewski, C. F., and M. S. Halpert, 1987: Global and regional scale precipitation patterns associated with El Niño–Southern Oscillation, *Monthly Weather Review*, 115, 1606-1626.
3. Aceituno, P., 1988: On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate, *Monthly Weather Review*, 116, 505-524.
4. Nitta, T., and S. Yamada, 1989: Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 67, 375-382.
5. Trenberth, K. E., 1990: Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71, 988-993.
6. Graham, N. E., 1994: Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: observations and model results, *Climate Dynamics*, 10, 135-162.
7. Lluch-Belda, D., S. Hernández-Vázquez, D. B. Lluch-Cota, C. A. Salinas-Zavala, and R. A. Schwartzlose, 1992: The recovery of the California sardine as related to global change, *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 33: 50-59.
8. Chavez, F. P., J. Ryan, S. E. Lluch-Cota, and M. Niñen, 2003: From anchovies to sardines and back: Multidecadal change in the Pacific Ocean, *Science*, 299, 217-221.
9. Pauly, D., and I. Tsukayama (Eds.), 1987: *The Peruvian anchoveta and its upwelling ecosystem: Three decades of change*, ICLARM Studies

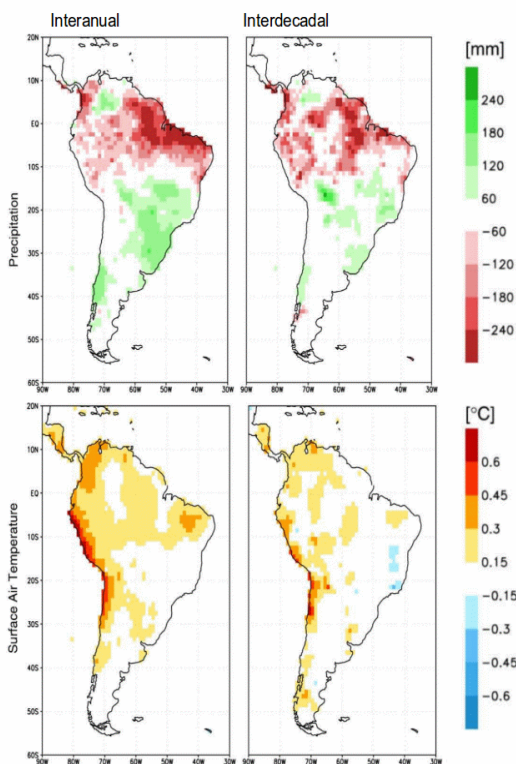


Figura 5. Mapas de regresión entre el índice MEI (Multivariate ENSO Index, paneles lado izquierdo) y PDO (paneles lado derecho) sobre la precipitación (paneles superiores) y la temperatura superficial del aire (paneles inferiores). Los datos de precipitación y de temperatura superficial del aire fueron tomados de la Universidad de Delaware. Figura modificada de Garreaud et al. (2008)²⁹.

En cuanto al impacto de las fases cálidas y frías del IPO, la Figura 5 muestra campos de los coeficientes de regresión lineal entre este índice y la precipitación y la temperatura superficial del aire en Sudamérica. Se observa además la regresión de estos campos con un índice del ciclo ENOS, con el fin de comparar los impactos. Al igual que durante El Niño y La Niña, aunque con intensidades inferiores, las fases cálidas (frías) del IPO se caracterizan por disminuir (aumentar) la precipitación en las zonas tropicales de Sudamérica, exceptuando Venezuela que presenta anomalías inversas. En el caso de Perú se observa un mayor impacto negativo

and Reviews, 351 pp.

10. Yañez, E., 1991: Relationships between environmental changes and fluctuating major pelagic resources exploited in Chile (1950-1988), in Long-term variability of pelagic fish populations and their environment, edited by T. Kawasaki, S. Tanaka, Y. Toba, and A. Taniguchi, pp. 301-309, Pergamon Press, Great Britain.

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

12. Alheit, J., and M. Niquen, 2004: Regime shifts in the Humboldt Current ecosystem, *Progress in Oceanography*, 60, 201-222.

13. Bertrand, A., M. Segura, M. Gutierrez, and L. Vasquez, 2004: From small-scale habitat loopholes to decadal cycles: a habitat-based hypothesis explaining fluctuation in pelagic fish populations off Peru, *Fish and Fisheries*, 5, 296-316.

14. Smith, T. M., R. W. Reynolds, T. C. Peterson, J. Lawrimore, 2008: Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880-2006), *Journal of Climate*, 21, 2283-2296.

15. Montecinos, A., S. Purca, and O. Pizarro, 2004: Interannual-to-interdecadal sea surface temperature variability along the western coast of South America, *Geophysical Research Letters*, 30(11), 1570, doi:10.1029/2003GL017345.

16. Pizarro, O., and A. Montecinos, 2004: Interdecadal variability of the thermocline along the west coast of South America, *Geophysical Research Letters*, 31, L20307, doi:10.1029/2004GL020998.

17. Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace, and R. C. Francis, 1997: A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 1069-1079.

18. Zhang, Y., J. M. Wallace, and D. S. Battisti, 1997: ENSO-like interdecadal variability: 1900-93, *Journal of Climate*, 10, 1004-1020.

19. Gershunov, A., and T. P. Barnett, 1998: Interdecadal modulation of ENSO teleconnections, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 2715-2725.

20. Enfield, D. B., and A. M. Mestas-Nuñez, 1999: Multiscale variabilities in global sea surface temperatures and their relationship with tropospheric climate patterns, *Journal of Climate*, 12, 2719-2733.

21. Dettinger, M. D., D. S. Battisti, R. D. Garreaud, G. J. McCabe, and C. Bitz, 2001: Inter-hemispheric effects of interannual and interdecadal ENSO-like climate variations on the Americas, *Capítulo 1, En Present and Past Inter-hemispheric climate linkages in the Americas and their societal effects.*, V. Markgraf Ed., Academic Press, pp. 1-16.

22. Garreaud, R. D., and D. S. Battisti, 1999: Interannual and interdecadal variability of the tropospheric circulation in the Southern Hemisphere, *Journal of Climate*, 12, 2113-2123.

23. Power, S., T. Casey, C. Folland, A. Colman, and V. M. Mehta, 1999: Interdecadal modulation of the impact of ENSO on Australia, *Climate Dynamics*, 15, 319-324.

24. White, W. B., and D. R. Cayan, 1998: Quasi-periodicity and global symmetries in interdecadal upper ocean temperature variability, *Journal of Geophysical Research*, 103, 21335-21354.

25. Nakamura, H., G. Lin, and Y. Yamagata, 1997: Decadal climate

variability in the North Pacific during the recent decades, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2215-2225.

26. Barlow, M., S. Nigan, and E. H. Berbery, 2001: ENSO, Pacific decadal variability, and U.S. summertime precipitation, drought, and stream flow, *Journal of Climate*, 14, 2105-2128.

27. Solomon, A., J. P. McCreary Jr., R. Kleeman, and B. A. Klinger, 2003: Interannual and decadal variability in an intermediate coupled model of the Pacific region, *Journal of Climate*, 16, 383-405.

28. Wu, L., Z. Liu, R. Gallimore, R. Jacob, D. Lee, and Y. Zhong, 2003: Pacific decadal variability: The tropical Pacific mode and the North Pacific mode, *Journal of Climate*, 16, 1101-1120.

29. Garreaud, R., M. Vuille, R. Compagnucci, and J. Marengo, 2008: Present-day South American Climate, *PALAEO3 Special Issue (LOTRED South America)*, 281, 180-195, doi:10.1016/j.paleo.2007.10.032.

30. van Loon, H., J. W. Kidson, and A. B. Mullan, 1993: Decadal variation of the annual cycle in the Australian dataset, *Journal of Climate*, 6, 1227-1231.

31. Chen, T., and M. Yen, 1997: Interdecadal variation of the Southern Hemisphere circulation, *Journal of Climate*, 10, 805-812.

32. Vera, C., 2003: Interannual and interdecadal variability of atmospheric synoptic-scale activity in the Southern Hemisphere, *Journal of Geophysical Research*, 108, 8077-8086.

33. Folland, C. K., J. A. Renwick, M. J. Salinger, and A. B. Mullan, 2002: Relative influences of the Interdecadal Pacific Oscillation and ENSO on the South Pacific Convergence Zone, *Geophysical Research Letter*, 29, 1643-1646.

34. Wang, B., and S. I. An, 2002: A mechanism for decadal changes of ENSO behaviour: roles of background wind changes, *Climate Dynamics*, 18, 475-486.