

UN MODELO DE ESTIMACION DE VIENTO PARA BAHIA COLIUMO, CHILE CENTRAL

A WIND ESTIMATION MODEL FOR COLIUMO BAY, CENTRAL CHILE

Danilo Calliari^{1,2} & Eric Alfaro^{1,3}

RESUMEN

Las surgencias costeras en la costa de Chile central son causadas por la interacción entre el patrón de vientos dominante y la topografía local. En consecuencia, para interpretar los procesos oceanográficos costeros es sumamente útil contar con una buena medida o estimación de las componentes del viento local. Partiendo de series horarias, se construyó un modelo para estimar las componentes meridional (norte-sur) y zonal (este-oeste) del viento en Bahía Coliumo (36°32' S; 72°57' W), a partir del viento medido en la estación Bellavista (36°47' S; 73°07' W, Concepción) como variable independiente. Los modelos propuestos son: $Uc(i) = 0.280 + 0.200U_{bv}(i) + 0.156V_{bv}(i) + \epsilon_1(i)$, $Vc(i) = -0.460 + 0.253U_{bv}(i) + 0.839V_{bv}(i) + \epsilon_2(i)$, para las componentes meridional y zonal, respectivamente. Estos modelos bivariados produjeron mejores estimaciones que los modelos con una sola de las componentes como variable independiente. La componente meridional fue con la cual se obtuvo la mejor correlación entre las series originales y la que presentó menor error en la estimación. Ello es de particular interés ya que dicha componente es la causante de las surgencias costeras.

PALABRAS CLAVES: Viento, oceanografía, surgencias, Chile central.

ABSTRACT

Coastal upwellings off Central Chile are caused by the combined effect of the predominating wind pattern and local topography. Consequently, a fair measure or estimation of local wind components is very useful for a correct interpretation of coastal oceanographic processes. From hourly data series, a model was build to estimate the meridional (North - South) and zonal (East - West) wind components in Bahía Coliumo (36°32' S; 72°57' W), from wind data measured in Bella Vista meteorological station (36°47' S; 73°07' W, Concepción) as independent variable. The proposed models are: $Uc(i) = 0.280 + 0.200U_{bv}(i) + 0.156V_{bv}(i) + \epsilon_1(i)$, $Vc(i) = -0.460 + 0.253U_{bv}(i) + 0.839V_{bv}(i) + \epsilon_2(i)$, for the meridional and zonal components, respectively. These bivariate models yielded better estimates than models with only one wind component as independent variables. The meridional component was the best correlated between the original series, and the one which was best predicted by the model. That is of particular interest since the meridional wind component is the causing agent of coastal upwellings.

KEYWORDS: Wind, oceanography, upwellings, Central Chile.

INTRODUCCION

El viento es el principal factor que explica la circulación oceánica superficial. A un nivel de meoescala es responsable de los procesos de surgen-

cia costera, típicos de los márgenes orientales de los océanos. Estos procesos son forzados por la componente del viento paralela a la costa y pueden producir cambios físico-químicos y biológicos notables (Margalef, 1987; Pond & Pickard, 1989; Mann & Lazier, 1991). Las surgencias costeras son muy variables a escala local (kilómetros) por influencia de factores tales como: la estructura vertical de la columna de agua, la topografía local submarina (cañones, etc.) y la subaérea (cerros costeros). Los cerros o elevaciones costeras, en particular, pueden afectar el componente del viento paralelo a la costa (responsable del transporte de Ekman) y por lo tanto la intensidad local de la surgencia.

¹Programa de Doctorado en Oceanografía, Universidad de Concepción, Casilla 2407, Concepción, Chile.

²Dirección permanente: Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Tristán Narvaja 1674, Montevideo, Uruguay.

³Dirección permanente: Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, 2060-Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San José, Costa Rica.

En la costa de Chile central, los procesos de surgencia siguen un patrón estacional, siendo más importantes durante el período estival (Bakun & Parrish, 1982). Por fuera de la boca de Bahía Coliumo (36°32' S; 72°57' W) existe un foco de surgencia bien documentado por Peterson *et al.* (1988), quienes realizaron un estudio físico-biológico del mismo durante enero de 1986. Encontraron que la variabilidad físico-química y biológica (abundancia y tipo de fitoplancton) ocurrió en fase con tres eventos de surgencia registrados durante el estudio. Dentro de la bahía la circulación es influida por la marea además del viento (Sobarzo, 1984). La topografía local presenta elevaciones por el S y SW que la protegerían parcialmente de los vientos provenientes de dichas direcciones.

Según Saavedra & Foppiano (1992), el clima en la región de Chile central (30°- 40° S), puede ser caracterizado por las interacciones de los sistemas meteorológicos sinópticos que actúan sobre la región, es decir: i) el anticiclón del Pacífico Sur, ii) los sistemas ciclónicos de origen polar o "frentes fríos", iii) las bajas costeras, asociadas al calentamiento desigual entre el continente y el océano y iv) las bajas costeras reforzadas, las cuales son un reforzamiento localizado de los sistemas descritos en iii). Estos sistemas interactúan a su vez con subsistemas locales de menor escala temporal y espacial (e.g. brisa marina). Según Aceituno (1988) la lluvia en esta región está asociada principalmente a los sistemas frontales descritos en ii), que ocasionalmente alcanzan el área durante el invierno austral, por lo que la lluvia anual se concentra en unas pocas tormentas, usualmente de corta duración, con viento norte asociado. Por el contrario, cuando existe predominancia del sistema anticiclónico descrito en i), se tiene por lo general "buen tiempo" sobre la región con el viento fluyendo del sur, cielos despejados y poca precipitación (Saavedra & Foppiano, 1992).

La presencia de una Estación de Biología Marina (Universidad de Concepción) en Dichato, sobre la Bahía Coliumo, la convierte en un sitio muy favorable para el estudio de organismos o procesos oceanográficos costeros (Sobarzo, 1984; Peterson *et al.*, 1988; Sepúlveda, 1990). Sin embargo, al no contarse con una estación meteorológica permanente, no existe una serie histórica de datos de viento local para caracterizar este componente de la dinámica temporal del ecosistema.

El objetivo de este trabajo es construir un modelo de estimación de las componentes zonal (norte-sur) y meridional (este-oeste) del viento en la Bahía Coliumo a partir de los datos de viento obtenidos por la estación meteorológica de Bellavista, utilizando análisis de regresión multivariable. Esta técnica se considera apropiada debido a que el viento medido en la Bahía Coliumo y la estación de Bellavista está determinado principalmente por sistemas de escala sinóptica que influyen en forma simultánea sobre las dos estaciones.

MATERIALES Y METODOS

DATOS. En este estudio se analizaron y contrastaron dos conjuntos de datos de viento, medidos tanto en la Estación Bellavista (36° 47' S; 73° 07' W, Concepción) y en Bahía Coliumo (36°32' S; 72°57' W, Dichato) en el período comprendido entre las 00:00 h del 15 de abril de 1997 y las 07:00 h del 23 de abril del mismo año. La ubicación geográfica de ambas estaciones se muestra en la Fig. 1. Los datos de viento en Bahía Coliumo se registraron cada minuto con una estación automática tipo Heathkit 5000-C, en la cual sus sensores se ubicaron a 7 m sobre el suelo. Los datos de la estación Bellavista fueron leídos cada 10 minutos del registro de la estación meteorológica tipo A (según la Organización Meteorológica Mundial, OMM), dotada con sensores Fuess Berin Steglitz (anemómetro tipo G 2772, veleta tipo D 2849) ubicados a 6 m sobre el suelo.

METODOLOGIA. Para ambos conjuntos de datos se calcularon sus componentes zonal (U) y meridional (V), las cuales fueron promediadas para producir cuatro series de tiempo horarias de $n = 199$ datos cada una (Fig. 2).

En el estudio de series de tiempo geofísicas, la técnica conocida como regresión multivariable o regresión canónica es usada para hallar relaciones ortogonales entre dos conjuntos de variables (Gabriel, 1985; Jones, 1985; Marquardt y Snee, 1985).

La regresión multivariable es una generalización del caso univariado, respecto a la variable dependiente, con una matriz respuesta de $n \times p$ (Cid, 1997). El modelo general es de la forma

$$y = X B + \epsilon$$

en donde,

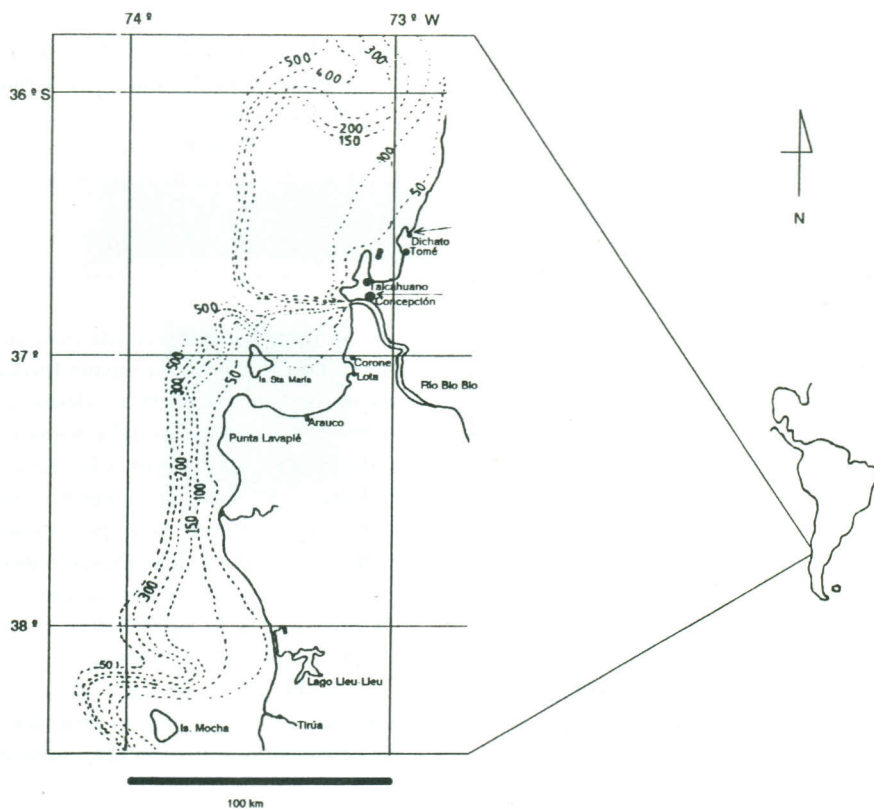


FIGURA 1. Mapa del área de estudio. Las flechas muestran la localización de las estaciones utilizadas en Dichato y Concepción.

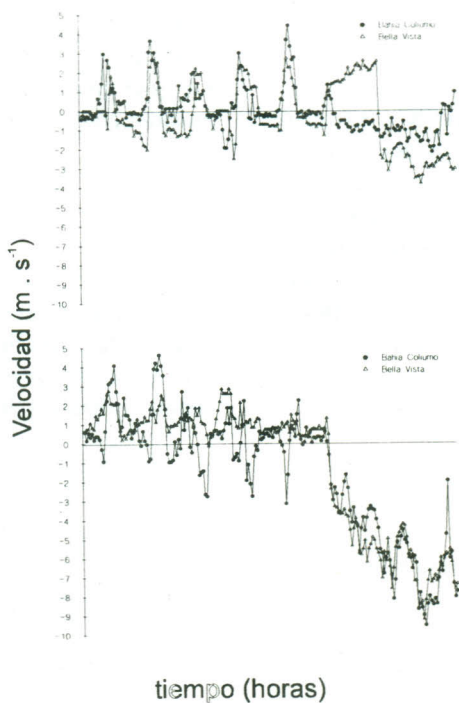


FIGURA 2. Componentes zonal (arriba) y meridional (abajo) del viento horario registrado en las estaciones de Bahía Coliumo ($36^{\circ}32' S$; $72^{\circ}57' W$, Dichato) y Bellavista ($36^{\circ}47' S$; $73^{\circ}07' W$). Las mediciones se realizaron entre las 00:00 h del 15/4/97 y las 07:00 h AM del 23/4/97.

$$y = \begin{bmatrix} y_{11} & \dots & y_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \dots & y_{np} \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & \dots & X_{1k-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & \dots & X_{nk-1} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} \beta_{01} & \dots & \beta_{0p} \\ \beta_{11} & \dots & \beta_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{k-11} & \dots & \beta_{k-1p} \end{bmatrix},$$

$$E = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

donde el estimador de $B = (X'X)^{-1} X'y$. El vector ε_i corresponde a los errores del vector de la observación y_i en las p -variables de respuesta. El método para formular la hipótesis consiste en comparar si un modelo reducido es mejor que un modelo completo, haciendo uso del estadístico Lambda de Wilks (Λ) basado en el principio de razón de verosimilitud, el cual es análogo al test F del caso univariado.

La hipótesis a contrastar en el análisis es la siguiente:

H_0 : Las componentes zonal (U_c) y meridional (V_c) del viento en Bahía Coliumo son explicadas por una combinación lineal de las componentes zonal (U_{bv}) y meridional (V_{bv}) del viento medido en la estación Bellavista (modelo completo).

H_1 : Las componentes zonal (U_c) y meridional (V_c) del viento en Bahía Coliumo resultan mejor explicadas a través de un modelo reducido en donde sólo se toma en cuenta la componente

zonal (U_{bv}) o meridional (V_{bv}) del viento medido en la estación Bellavista como variable predictora (modelo reducido).

Para evaluar esta hipótesis se construyeron modelos de regresión multivariable del tipo,

$$U_c(i) = \beta_{01} + \beta_{11}U_{bv}(i) + \beta_{21}V_{bv}(i) + \varepsilon_1(i),$$

$$V_c(i) = \beta_{02} + \beta_{12}U_{bv}(i) + \beta_{22}V_{bv}(i) + \varepsilon_2(i),$$

La prueba multivariada para la hipótesis nula (H_0) opera casi en la misma forma que la prueba univariada; es decir, se desea averiguar si la suma de los cuadrados del error del modelo reducido ($SCE(R)$) es mayor a la suma de cuadrados del error del modelo completo ($SCE(C)$) (suficientemente mayor como para concluir estadísticamente que el modelo reducido es inadecuado).

Como en el caso univariado se compara $H = SCE(R) - SCE(C)$ respecto de $E = SCE(C)$ ajustado por sus grados de libertad.

Si H_0 no se rechaza, es decir, el modelo completo es mejor que el reducido y los errores se distribuyen normalmente, entonces:

$$-m \ln(\Lambda) \sim \chi^2_{pg} \text{ y } m = (n - k) - \frac{(p+g+1)}{2}$$

donde n es el número de observaciones por serie de tiempo, k es el número de variables independientes, p es el número de variables dependientes y g es el número de variables independientes eliminadas en el modelo reducido, Λ está dado por:

$$\Lambda = \frac{|E|}{|H + E|} = \frac{|SCE(F)|}{|SCE(R)|}$$

Si la distribución es aproximadamente normal, la distribución χ^2 es razonable. No se debe usar χ^2 cuando p o g es ≤ 2 . Para estos casos se deben evaluar las distribuciones:

$$\frac{((n-k) - (p-1))(1-\Lambda)}{p\Lambda} \sim F_{(p, n-k-p+1)}, \text{ si } g=1$$

$$\frac{((n-k) - (p-1))(1-\sqrt{\Lambda})}{p\sqrt{\Lambda}} \sim F_{(p, n-k-p+1)}, \text{ si } g=2$$

$$\frac{((n-k-1)(1-\sqrt{\Lambda}))}{g\sqrt{\Lambda}} \sim F_{(2g, 2(n-k-1))}, \text{ si } g=2$$

En este trabajo se consideraron las pruebas para $g = 1$ y, alternativamente, $p = 2$ ya que ambos tienen igual pertinencia.

RESULTADOS Y DISCUSION

En el análisis exploratorio de los datos no se

encontraron puntos atípicos o irregularidades importantes, y sus estadísticos generales se muestran en la Tabla I.

A pesar de que el mejor coeficiente de correlación se encontró entre V_C y V_{bv} ($\sigma = 0,92$), los demás coeficientes de correlación se consideraron importantes para el análisis de regresión multivariable (Tabla II).

TABLA I. Estadísticos generales de las series.

	\bar{x}	σ	máx.	mín.
U_C	0.03	1.18	4.43	-2.19
V_C	-1.54	3.28	4.61	-9.54
U_{bv}	-0.30	1.70	2.72	-3.83
V_{bv}	-1.19	3.42	2.83	-9.24

TABLA II. Análisis de correlación cruzada entre las componentes del viento en Bahía Coliumo y Bellavista.

	U_C	V_C
U_{bv}	0.45	0.44
V_{bv}	0.56	0.92

Como modelo completo se obtuvo que:

$$U_C(i) = 0.280 + 0.200U_{bv}(i) + 0.156V_{bv}(i) + \epsilon_1(i),$$

$$V_C(i) = -0.460 + 0.253U_{bv}(i) + 0.839V_{bv}(i) + \epsilon_2(i),$$

y la suma de cuadrados del error igual a:

$$SCE(C) = \begin{bmatrix} 169.7 & 35.3 \\ 35.3 & 284.8 \end{bmatrix}$$

Como modelos alternativos se obtuvieron:

a) Para V_{bv} como variable independiente,

$$U_C(i) = 0.263 + 0.193V_{bv}(i) + \epsilon_1(i),$$

$$V_C(i) = -0.481 + 0.885V_{bv}(i) + \epsilon_2(i),$$

$$\text{con, } SCE(R) = \begin{bmatrix} 189.6 & 60.4 \\ 60.4 & 316.6 \end{bmatrix}, \Lambda = 0.84,$$

con valores calculados de $F_c = 19,2$, para $g = 1$ y

$F_c = 18,4$, para $p = 2$.

b) Para U_{bv} como variable independiente,

$$U_C(i) = 0.128 + 0.315U_{bv}(i) + \epsilon_1(i),$$

$$V_C(i) = -1.28 + 0.868U_{bv}(i) + \epsilon_2(i),$$

$$\text{con, } SCE(R) = \begin{bmatrix} 219.1 & 299.8 \\ 299.8 & 1702.5 \end{bmatrix}, \Lambda = 0.17,$$

con valores calculados de $F_c = 488.4$ para $g = 1$ y $F_c = 283,0$ para $p = 2$.

Para ambos modelos reducidos con valor de $F_{(2,195)} = 4,71$, para $g = 1$ y $F_{(2,390)} = 4,66$, para $p = 2$, $\alpha = 0,01$, se mantiene la hipótesis nula pues el valor de F_c es mayor que el F tabulado en todos los casos.

La combinación lineal de las componentes del viento en Bellavista (modelo completo) produjo mejores resultados que la estimación de los componentes por separado. Sin embargo es de hacer notar que el uso de la componente meridio-

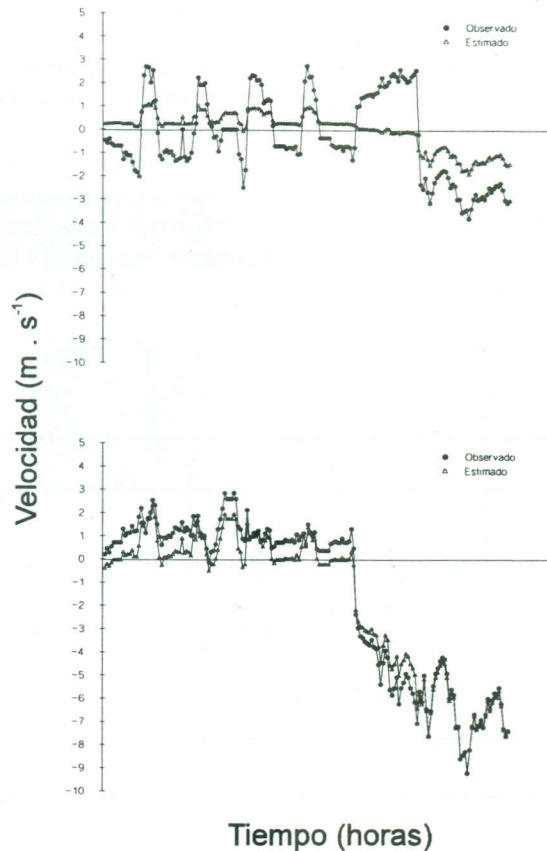


FIGURA 3. Figura 3. Componentes zonal (arriba) y meridional (abajo) del viento horario registrado en la estación de Bahía Coliumo (36°32' S; 72°57' W, Dichato) y el estimado por el modelo a partir del viento registrado en la estación de Bellavista (36°47' S; 73°07' W). Las mediciones se realizaron entre las 00:00 h del 15/4/97 y las 7:00 h AM del 23/4/97.

nal (V_{bv}) como predictora (modelo reducido) dio resultados similares al modelo completo ($r = 0,92$ para V_C y $r = 0,56$ para U_C), mientras que el modelo reducido utilizando U_{bv} como variable predictora explicó relativamente poco de la varianza del viento en Bahía Coliumo ($r = 0,45$ y $r = 0,45$ para V_C y U_C respectivamente). La aceptación del modelo completo podría estar influenciada por el mayor número de observaciones (grados de libertad) disponibles.

Los RMSE del modelo fueron 0,7 ($\sigma = 0,9$) y 0,9 ($\sigma = 1,2$) para U_C y V_C respectivamente. Los valores relativamente altos del coeficiente de variación del RMSE del modelo (aproximadamente 1,3 para ambas componentes) se explican por el mayor error en la predicción de los máximos y mínimos relativos. Ello se puede comprobar observando la Fig. 3 donde, en general, es notoria la subestimación de dichos valores extremos.

En varias estimaciones de índices de surgen-

cia realizadas para la costa de Chile central (Arcos & Wilson, 1984; Arcos & Navarro, 1986; Peterson *et al.*, 1988; Sepúlveda, 1990; Cáceres & Arcos, 1991), se han supuesto representativas las condiciones de viento de una estación meteorológica relativamente lejana (Carriel Sur, 36°46' S; 73°04' W, Concepción, ca. 40 km de Bahía Coliumo). Sin embargo, es sabido que la presencia de elevaciones (cordilleras costeras, cerros) cercanas a la costa pueden afectar localmente de manera significativa las condiciones de viento (Gill, 1982).

En este sentido es interesante notar que la componente meridional (responsable del transporte de Ekman forzante de la surgencia) fue, de ambas, la mejor estimada por el modelo completo y la que presentó mejor correlación con el viento en Bellavista.

A pesar de que este modelo resultaría apropiado, para estimar el viento horario en Bahía Coliumo, es recomendable tener precaución al

aplicarlo a series de datos en otras escalas de tiempo (e.g. cada minuto o mensuales) pues la variabilidad del sistema meteorológico en diferentes escalas impide extrapolar con seguridad la relación encontrada.

CONCLUSIONES

Mediante el análisis de regresión multivariable, fue posible la estimación del viento horario en la Bahía Coliumo a partir del viento horario en la estación Bellavista. Sin embargo, la estimación de la componente meridional ($r = 0,93$) fue mejor que la componente zonal ($r = 0,62$). La buena estimación de la componente meridional resulta de suma importancia, debido a que el efecto de ésta sobre la superficie del océano es la responsable del transporte de Ekman generador de las surgencias en las costas de Chile central.

Debido a que la mayoría de las estimaciones de índices de surgencia para áreas de la VIII Región de Chile se han realizado usando datos de viento de la estación de Carriel Sur ($36^{\circ}46' S$; $73^{\circ}04' W$), se recomienda en el futuro efectuar un análisis análogo al presente, utilizando datos de viento de dicha estación.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por la Dirección de Investigación (Universidad de Concepción) a través de los proyectos P.I. 97.112.041-6 y P.I. 96.112.039-6 y por el DAAD de Alemania (Becas de estudio de los autores). Deseamos expresar nuestro reconocimiento al Dr. Tarsicio Antezana y al personal de la Estación de Biología Marina (Universidad de Concepción) de Dichato, muy especialmente a José Marileo, por su apoyo logístico en las mediciones en Bahía Coliumo, así como al Depto. Física de la Atmósfera y el Océano (DEFAO), Universidad de Concepción, por proporcionar los datos de la estación meteorológica Bellavista.

Hacemos extensivo este reconocimiento a revisores anónimos por su lectura crítica del manuscrito.

BIBLIOGRAFIA

ACEITUNO, P. 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface Climate. *Mon. Weather Rev.* 116: 505-524.

- ARCOS, D.F. & R.E. WILSON. 1984. Upwelling and the distribution of chlorophyll a within the Bay of Concepción, Chile. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 18: 25-35.
- ARCOS, D.F. & NAVARRO. 1986. Análisis de un índice de surgencia para la zona de Talcahuano, Chile (Lat. $37^{\circ} S$). *Invest. Pesq. (Chile)* 33: 91-98.
- BAKUN, A. & R.H. PARRISH. 1982. Turbulence, transport, and pelagic fish in the California and Peru Current systems. *CalCOFI Rep.* 23: 99-112.
- CACERES, M.M. & D.F. ARCOS. 1991. Variabilidad en la estructura espacio-temporal de un área de surgencia frente a la costa de Concepción, Chile. *Invest. Pesq. (Chile)* 36: 27-38.
- CID, L. 1997. Análisis multivariado (borrador no publicado).
- GABRIEL, K. 1985. Exploratory multivariate analysis of a single batch of data. *In: MURPHY R. & R. KATZ (Eds.), Probability, Statistics and Decision Making in the Atmospheric Sciences.* Westview Press, Inc., pp.: 101-152.
- GILL, A.E. 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics.* International Geophysics Series 30. Academic Press, Nueva York.
- JONES, R. 1985. Time series analysis-time domain. *In: MURPHY R. & R. KATZ (Eds.), Probability, Statistics and Decision Making in the Atmospheric Sciences.* Westview Press, Inc., pp.: 223-260.
- MANN, K.H. & J.R.N. LAZIER. 1991. *Dynamics of Marine Ecosystems. Biological-Physical Interactions in the Sea.* Blackwell Sci. Publ., Inc. 466 págs.
- MARQUARDT, D. & R. SNEE. 1985. Developing empirical models with multiple regression: biased estimation techniques. *In: MURPHY, R & R. KATZ (Eds.), Probability, Statistics and Decision Making in the Atmospheric Sciences.* Westview Press, Inc., pp.: 45-100.
- MARGALEF, R. 1987. *Ecología.* 3ra. Edición. Editorial Omega. 971 págs.
- MUÑOZ, H. 1983. Catálogo ilustrado de las larvas de peces presentes en el zooplancton de la Bahía Coliumo ($36^{\circ} 32' S$; $72^{\circ} 57' W$), VIII Región, Chile. Tesis, Biología Marina, Universidad de Concepción.
- PETERSON, W.T., D.F. ARCOS, G.B. MACMANUS, H. DAM, T. JOHNSON & P. TISELIUS. 1988. The nearshore during coastal upwelling: Daily variability and coupling between primary and secondary production off Central Chile. *Progress in Oceanography* 20: 1-40.
- POND, S. & G.L. PICKARD. 1989. *Introductory Dynamical Oceanography.* 2nd Edition. Pergamon Press. 329 págs.
- SAAVEDRA, N. & J. FOPPIANO. 1992. Monthly mean pressure model for Chile. *Int. J. Climatol.* 12: 469-480.
- SOBARZO, M. 1984. Patrón general de circulación (en condiciones invernales) de Bahía Coliumo ($36^{\circ} 32' S$; $72^{\circ} 56' W$), Concepción, Chile. Unidad de Investigación, Licenciatura en Biología Marina, Universidad de Concepción.