

Interacción océano-atmósfera-tierra en la Región de Antofagasta (Chile, 23°S): Experimento DICLIMA

Land-air-sea interaction at the Antofagasta Region (Chile, 23°S):
The DICLIMA experiment

JOSE RUTLLANT¹, HUMBERTO FUENZALIDA¹,
RODRIGO TORRES² y DANTE FIGUEROA³

¹Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Casilla 2777, Santiago, Chile (e-mail : jrutllan@dgf.uchile.cl)

²Departamento de Química Analítica y Marina, Universidad de Gotemburgo, Suecia (e-mail: rodrigo@amc.chalmers.se)

³Departamento de Física de la Atmósfera y el Océano, Universidad de Concepción, Chile (e-mail: dfiguero@udec.cl)

RESUMEN

La extrema aridez del desierto a lo largo de la costa occidental de América del Sur entre los 30°S y el ecuador, ha dado origen a varias hipótesis sobre mecanismos físicos que explicarían la necesaria subsidencia adicional a la de gran escala asociada con el anticiclón subtropical del Pacífico Suroriental. El experimento DICLIMA fue diseñado para identificar y cuantificar los mecanismos responsables del aumento diurno de la subsidencia costera a la que contribuirían tanto la capa límite marina bajo la inversión térmica como la capa atmosférica sobre la ladera andina. Campañas de medición de diez días se realizaron a 23° S en enero de 1997, al término del evento de La Niña 1995-96, en julio de 1997 y en enero de 1998. La severidad del episodio de El Niño, que se desarrolló a partir de marzo de 1997, dominó las condiciones atmosféricas y oceánicas globales durante estos dos últimos experimentos. Resultados globales muestran significativas señales de ciclos diario en la temperatura, razón de mezcla de vapor de agua y viento hasta al menos los 4 000 m de altitud, revelando la influencia determinante del ciclo de insolación sobre la ladera andina occidental en esas señales y en la divergencia diurna sobre la faja costera. Las variaciones día a día en la altura de la base de la inversión de subsidencia mostraron oscilaciones similares a las que caracterizan el paso de depresiones costeras en latitudes más altas sobre Chile central. Estimaciones basadas en mediciones del balance de energía superficial en tierra entregan valores compatibles con la exportación neta media de calor mar afuera por las corrientes zonales medias, medidas simultáneamente en enero de 1997. En los valores de la fugacidad del CO₂ en la columna de agua (2 a 5 m) estimados a través de mediciones de pH y alcalinidad total se observaron extensas áreas sobresaturadas de CO₂, con una fuerte dependencia de los factores físicos derivados de la presencia de El Niño y una acción localizada de la bomba biológica sólo en enero de 1997. En el marco de la variabilidad climática global, el cambio de régimen (salto climático) observado a mediados de la década de los 70 se reflejó en las regiones norte y central de Chile en la temperatura superficial del mar y de la troposfera, humedad del aire y nubosidad. Estos cambios estarían asociados con un debilitamiento general de la inversión de subsidencia consistente con la caída en el valor medio del índice de la Oscilación del Sur.

Palabras clave: interacción océano-atmósfera-tierra, Pacífico Suroriental, clima desértico, subsidencia costera, bajas costeras, balance de energía superficial, intercambio aire-agua de CO₂, variabilidad climática interdecadal.

ABSTRACT

The extreme aridity of the desert along the west coast of South America from about 30°S to the equator, has originated several hypotheses about physical mechanisms explaining the necessary additional subsidence to the large-scale one associated with the subtropical anticyclone. The DICLIMA experiment was aimed at the identification and quantification of the mechanisms responsible for the diurnal increase in the coastal subsidence toward which both the marine and the inland sloping boundary layers would contribute. Ten-day field experiments were performed at 23° S in January 1997, at the end of the 1995-1996 La Niña event; in July 1997 and in January 1998. The severity of the El Niño event that began in March 1997 dominated the global ocean and atmosphere conditions during the last two experiments. Global results show significant daily-cycle signals in the temperature, water vapor mixing ratio and wind at least until 4 000 m altitude, revealing the conclusive influence of the insolation cycle at the western Andean slope over those signals and in the daytime divergence over the coastal strip. Day to day variations in the height of the base of the subsidence inversion showed oscillations similar to those characterizing the passage of coastal lows over higher latitudes in central Chile. Estimates

based on surface energy budget measurements over land yield figures compatible with average offshore net heat export by the mean zonal currents measured simultaneously in January 1997. In the estimates of the CO₂ fugacity over the water column (2 to 5 m) through pH and total alkalinity measurements, wide areas over-saturated in CO₂ were observed, with a strong dependence on physical factors derived from the El Niño presence and to a localized biological pump action only in January 1997. In the frame of the global climate variability, the regime shift (climatic jump) observed in the mid 70s was reflected in north and central Chile in the sea-surface and tropospheric temperatures, air moisture and cloudiness. Those changes would be associated with a general weakening of the subsidence inversion consistent with the fall in the average value of the Southern Oscillation index.

Key words: air-sea-land interaction, Southeastern Pacific, desert climate, coastal subsidence, coastal lows, surface energy budget, air-sea CO₂ exchange, interdecadal climate variability.

INTRODUCCION

Además de los factores climáticos clásicos que favorecen la aridez en las costas occidentales subtropicales de los continentes, la extrema sequedad de los desiertos costero e interior en la región de Antofagasta parece estar asociada con una dinámica atmosférica regional que refuerza el lento descenso de aire (subsistencia) costero en el período diurno (Trewartha 1961, Lettau 1967). El resultado de esta dinámica regional sería una divergencia neta de flujo de masa en la columna atmosférica costera después del mediodía que, al producir un descenso de la base de la capa de inversión térmica de subsistencia, inhibiría la advección de humedad por sobre la cordillera de la costa a las horas de máximo potencial de ascenso convectivo-orográfico. Los procesos dinámicos de carácter regional responsables de este fenómeno estarían asociados con las componentes de la circulación atmosférica de ciclo diario forzadas por el contraste térmico mar-tierra, el ciclo diario de insolación sobre la ladera andina y la convección de la tarde sobre el altiplano andino durante el verano austral (Rutllant 1990). Durante el período nocturno las fases inversas de los procesos mencionados permitirían el ascenso del aire sobre la faja costera, elevando y debilitando la capa de inversión térmica. Esto favorece la ocurrencia nocturna y matinal de la nubosidad costera (estratocúmulos) y densas nieblas a altitudes en torno a los 1 000 m (camanchacas). La variabilidad interdiaria de la subsistencia costera estaría asociada con fluctuaciones de escala

sinóptica y subsinóptica derivadas de perturbaciones frontales débiles que se desplazan desde el sur, debilitando el anticiclón subtropical, y con ondas atmosféricas atrapadas a la costa que se propagan desde el norte. Esta hipótesis, que implica oscilaciones de altura de la base de la inversión térmica de subsistencia en escalas de tiempo de 3 a 10 días, se apoya en la observación e interpretación de estos fenómenos al sur de los 27°S (Rutllant 1994b) y en evidencias observacionales al interior de Antofagasta (Rutllant & Ulriksen 1979) que indican la entrada ocasional de la nubosidad costera hasta una centena de kilómetros tierra adentro.

Además de estas escalas temporales de variabilidad y de los característicos ciclos anuales, existen fluctuaciones meteorológicas intraestacionales (Vergara & Fuenzalida 1993) ligadas a la acción directa de ondas en la atmósfera ecuatorial y de ondas oceánicas atrapadas a la costa que se propagan de norte a sur forzadas por las primeras (eventos de vientos del W) en la región ecuatorial del Pacífico central (Shaffer et al. 1997). En las escalas de tiempo mayores destaca la fuerte señal de variabilidad climática interanual asociada con El Niño/Oscilación del Sur y la interdecadal presumiblemente ligada a cambio de régimen en la circulación general de la atmósfera, como el ocurrido a mediados de la década de los 70.

El exceso de energía radiante que se acumula cada día sobre la superficie desértica (radiación neta diaria positiva) es transmitido a la atmósfera en forma de ca-

lor sensible. Bajo una condición de clima estable, la componente zonal de la circulación regional media debería transportar este excedente hacia el mar, desde donde debería ser exportado costa afuera en zonas en que la componente local del viento hacia el ecuador bombea aguas subsuperficiales frías (surgencia costera). La capa superficial de aguas frías resultante de este proceso de interacción con la atmósfera es arrasada mar afuera por efecto de la fricción y de la rotación terrestre (deriva de Ekman).

La surgencia costera en esta zona, además de su importancia biológica materializada en una alta productividad primaria y la consiguiente abundancia de pesca pelágica, juega un papel importante en el clima global. En efecto, durante la fase activa de la surgencia afloran aguas subsuperficiales ricas en nutrientes y dióxido de carbono y pobres en oxígeno. Esta condición se invierte durante la fase de relajación, cuando el florecimiento del fitoplancton pone en acción la bomba biológica. Desde el punto de vista del clima global resulta entonces importante conocer el aporte de esta región del Pacífico suroriental al flujo neto de CO₂ a través de la interfaz agua-aire.

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El experimento DICLIMA fue diseñado para validar y cuantificar los mecanismos identificados en las hipótesis de trabajo en cuanto al incremento diurno de la subsidencia costera, incluyendo su variabilidad interdiaria y en cuanto a la consistencia de la dinámica regional media de la atmósfera y del océano para la mantención de un clima estable. Asimismo.

En el ámbito de la variabilidad climática interdecadal se propuso estudiar, con las series temporales disponibles, el impacto regional del salto climático registrado a mediados de la década de los 70 y el papel de la surgencia costera regional en el intercambio del dióxido de carbono con la atmósfera adyacente, factor determinante en

el modelamiento del calentamiento climático a escala global.

Específicamente, este estudio tuvo los objetivos siguientes:

- Determinar la variabilidad intradiaria de la subsidencia costera y su relación con el forzamiento térmico regional y la circulación atmosférica transversal a la costa que resulta de ese forzamiento.

- Determinar la variabilidad interdiaria de la subsidencia costera y su relación con ondas atmosféricas atrapadas a la costa y con perturbaciones de escala sinóptica que se desplazan desde latitudes más altas.

- Determinar el balance de energía superficial sobre la faja costera árida y establecer la capacidad de la componente zonal de la circulación costera para transportar hacia el mar el exceso de energía radiante (radiación neta) sobre la tierra. En el mar, establecer la capacidad de las corrientes zonales medias asociadas con la surgencia para transportar el exceso de energía radiante media sobre la tierra más el resultado del balance radiativo sobre el mar.

- Determinar la dinámica del intercambio de CO₂ entre el mar y la atmósfera a través del campo superficial de vientos sobre las áreas afectadas por la surgencia frente a Antofagasta (península de Mejillones), a partir de estimaciones indirectas de la fugacidad del CO₂ (fCO₂) en la columna de agua.

- Cuantificar las modificaciones climáticas regionales derivadas del abrupto cambio en el funcionamiento del sistema océano-atmósfera en el Pacífico tropical ocurridas en 1975 con el objeto de determinar la sensibilidad del clima regional frente a alteraciones cuasi permanentes de los factores que gobiernan el clima de la Región.

MATERIALES Y METODOS

Para lograr los objetivos señalados se planificaron mediciones directas en tres campañas de 10 días de duración cada una: enero de 1997 (DICLIMA I), julio de 1997 (DICLIMA II) y enero de 1998 (DICLIMA III).

La campaña DICLIMA III, no contemplada inicialmente en el Proyecto, se organizó debido a la inusual intensidad que alcanzó el fenómeno de El Niño 1997-1998 durante el invierno austral de 1997 (DICLIMA II) y a la necesidad de establecer una comparación entre invierno y verano en igualdad de condiciones climáticas de gran escala respecto de los factores regionales que controlan el clima en esta zona. Por falta de financiamiento sólo se logró realizar en ella mediciones terrestres.

Todas las campañas incluyeron mediciones de la estructura vertical de la atmósfera (viento, temperatura, humedad, presión) en cortes perpendiculares a la costa frente a la península de Mejillones (Fig. 1), mediciones del balance de energía superficial en tierra y mediciones de temperatura, humedad, presión, viento y radiación solar mediante estaciones meteorológicas automáticas permanentes y temporales.

Los aspectos oceanográficos de este Proyecto contemplaron mediciones continuas de viento sobre el puente de mando, y mediciones de pH, alcalinidad, salinidad y temperatura en la columna de agua a bordo del buque de investigación (B/I) Abate Molina. Durante los cruceros se contó también con los datos provenientes de un correntómetro (temperatura y corriente) fondeado a 11 km de la costa y a 65 m de profundidad frente a la península de Mejillones.

La sección transversal para medir la estructura vertical de la atmósfera estuvo constituida, de W a E, por el B/I Abate Molina, caleta Michilla (base principal de observación) y Baquedano, a unos 80 km al interior de Antofagasta y a 1 200 msnm (Fig. 1). Las mediciones en el B/I Abate Molina se realizaron utilizando un globo cautivo con sonda digital durante estaciones oceanográficas en horas próximas a las de las observaciones terrestres. En Michilla se utilizó durante DICLIMA I un sistema mixto consistente en cuatro sondeos libres diarios con sondas AIR-GPS y cuatro sondeos cautivos diarios intercalados con los

anteriores. En las dos campañas siguientes se optó por utilizar sólo sondas libres (8 por día). En Baquedano se realizaron dos sondeos diarios en torno a las horas extremas del ciclo diario (9 a.m. y 6 p.m.) con sondas simples (presión, temperatura, humedad) que debieron ser complementadas con mediciones del perfil vertical de viento cada tres horas mediante globo piloto y teodolito óptico.

Adicionalmente se operó en forma continua estaciones meteorológicas automáticas Campbell a partir de enero de 1997 en caleta Constitución (península de Mejillones) y en Tres Amigas, a 1 000 m de altitud en la cordillera de la costa cerca de Michilla (Fig 1). Estaciones similares se instalaron en el B/I Abate Molina, en Michilla y Baquedano sólo durante las campañas de medición para caracterizar los ciclos diarios locales y dar apoyo a las mediciones en altura.

Las mediciones de balance de energía superficial se realizaron en Michilla, donde se instaló un radiómetro neto tipo Fritschen, un piranómetro para la radiación solar global, una placa y termocuplas para el flujo de calor hacia el suelo, y un sistema completo de medición de flujos turbulentos de calor sensible y latente consistente en un anemómetro acústico, microtermocupla e higrómetro de Krypton.

Para la determinación indirecta de la fugacidad del CO₂ en la columna de agua se midió el pH y la alcalinidad total en muestras de agua a diferentes niveles y se registró el viento cada 30 min sobre el puente de mando junto a la posición del buque (GPS).

RESULTADOS

1. Ciclos diarios

Una primera aproximación en la determinación del ciclo medio diario de la subsidencia costera durante los experimentos DICLIMA consistió en promediar para cada hora de observación la desviación de la al-

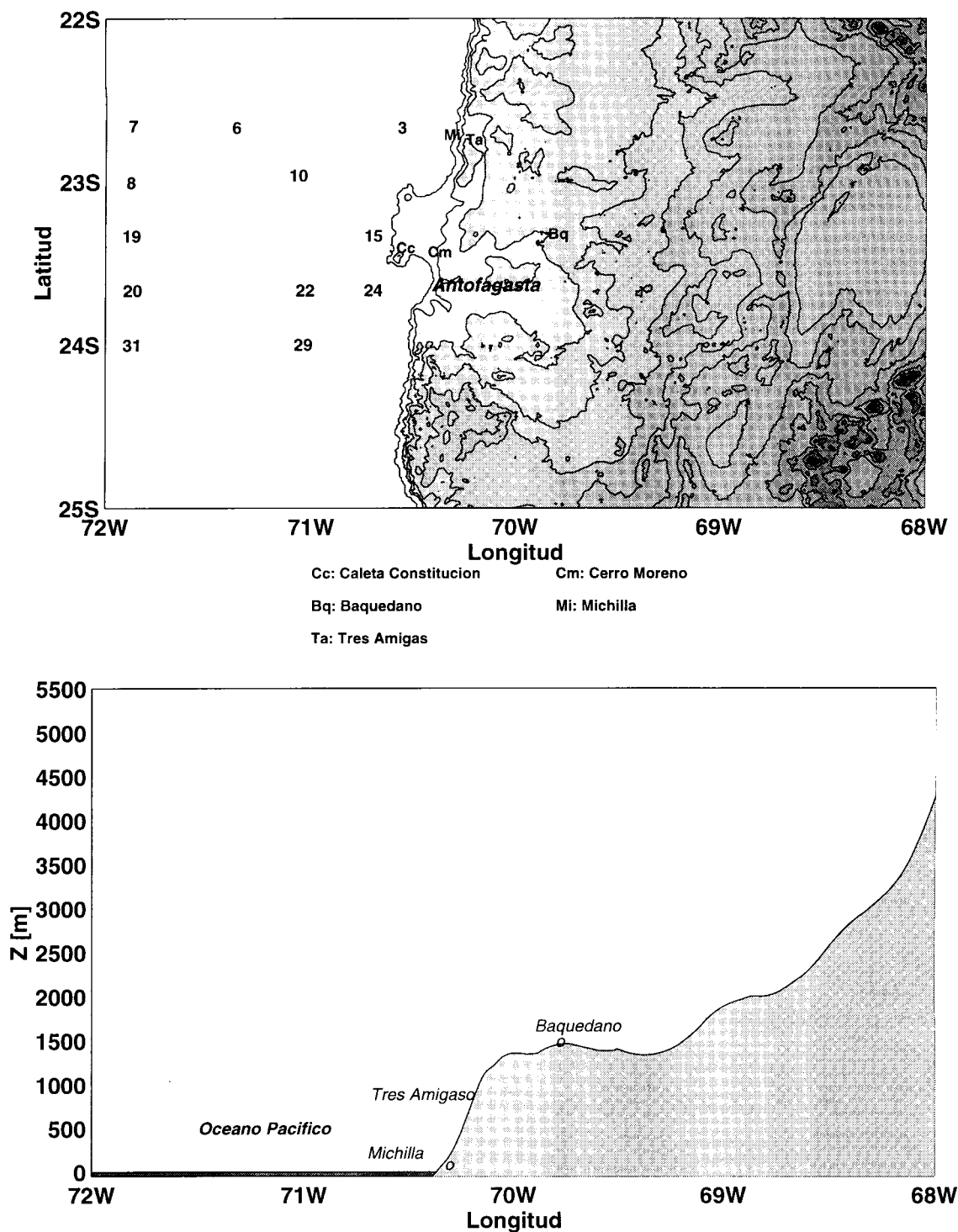


Fig. 1: Ubicación y topografía (planta y perfil transversal) de los lugares de observación. Se indican además con números las estaciones oceanográficas desde donde se obtuvieron perfiles verticales de presión, temperatura, humedad y viento en la capa límite atmosférica.

Location and topography (top view and cross-shore section) of the observing sites. The oceanographic stations from which vertical profiles of pressure, temperature, humidity and winds in the marine boundary layer were obtained are indicated in numbers.

tura de la base de la inversión térmica sobre Michilla con respecto a la media del día correspondiente para cada uno de los experimentos (Fig. 2). A pesar de observarse una tendencia al descenso de la base de la inversión en la tarde, la Fig. 2 ilustra una alta dispersión en torno a la media que podría explicarse por el hecho de que la posición de la inversión térmica resulta de la interacción de procesos de ciclo diario bajo y sobre ella. Así, bajo la inversión de subsidencia la capa límite tiende a expandirse durante el día, particularmente después de mediodía, cuando se intensifican los vientos del SW. En el mismo período, la divergencia de la componente zonal del flujo sobre la inversión tendería a hacerla descender. Estos procesos contrapuestos cambiarían de signo durante la noche. Además, a pesar de la gran estabilidad estática de la atmósfera en el seno de la capa de inversión térmica, ondas de gravedad pueden producir oscilaciones rápidas e intercambio vertical de aire a través de ella.

La estación automática de Tres Amigas se instaló cerca de la posición climatológica de la base de la inversión térmica con el objeto de poder seguir en forma continua fluctuaciones asociadas con los fuertes gradientes de temperatura, humedad y viento que definen esa base. La Fig. 3 muestra el ciclo diario medio de la temperatura en el trimestre de invierno de 1997, donde se puede observar un gradual calentamiento a medida que transcurre el día y que culmina (mínima altura de la base de la inversión) alrededor de las 20-21 HL (TUC-4).

Significativos ciclos diarios en la temperatura, humedad específica y viento que abarcan la troposfera media y baja revelan la influencia del ciclo diario de insolación sobre la vertiente andina occidental, con una eventual contribución de la convección altiplánica estival que se presentó al final de DICLIMA I y durante todo DICLIMA III.

Admitiendo que las variaciones climáticas y orográficas en una dirección paralela a la costa deberían ser de orden inferior

respecto de las variaciones perpendiculares a ella, el proceso de ciclo diario más significativo resultó ser la divergencia media del flujo zonal de masa en el sector comprendido entre Michilla y Baquedano en la columna de aire entre los 1 000 y los 4 000 m de altitud. Este fenómeno, que ocurrió en todas las campañas con independencia de los cambios en la altura media que experimentó la base de la inversión de subsidencia entre enero de 1997 (DICLIMA I) y enero de 1998 (DICLIMA III) (Fig. 4), constituye una evidencia concluyente de la magnitud del control del ciclo solar sobre la tierra frente a las perturbaciones asociadas con la presencia de un fenómeno de El Niño intenso como el de 1997-1998.

2. Variabilidad interdiaria

La variabilidad interdiaria de la subsidencia costera se reflejó en oscilaciones de la inversión térmica presentes en todas las campañas de medición, con rasgos similares a los que caracterizan el paso de depresiones costeras por Chile central. En efecto, en la región semiárida de Chile al sur de 27°S estas oscilaciones se propagan de norte a sur con características similares a una onda de Kelvin no lineal (Rutllant 1994b). Típicamente el paso de estas ondas va acompañado de un descenso en la presión atmosférica (depresión costera) seguido de un rápido aumento de la misma, una transición de cielos despejados a cubiertos y un refuerzo de los vientos del sur durante el descenso de la presión, seguido de una relajación de los mismos y un frecuente cambio en su dirección (NW) coincidiendo con la subida de la presión (Rutllant 1994a).

En DICLIMA I y III la amplitud de estas oscilaciones no superó los 500 m, mientras en DICLIMA II la máxima amplitud alcanzó casi a los 1 000 m, registrándose un par de descensos significativos de la base de la inversión térmica en cada período.

En DICLIMA I (enero de 1997) se destaca un descenso de la base de la capa de

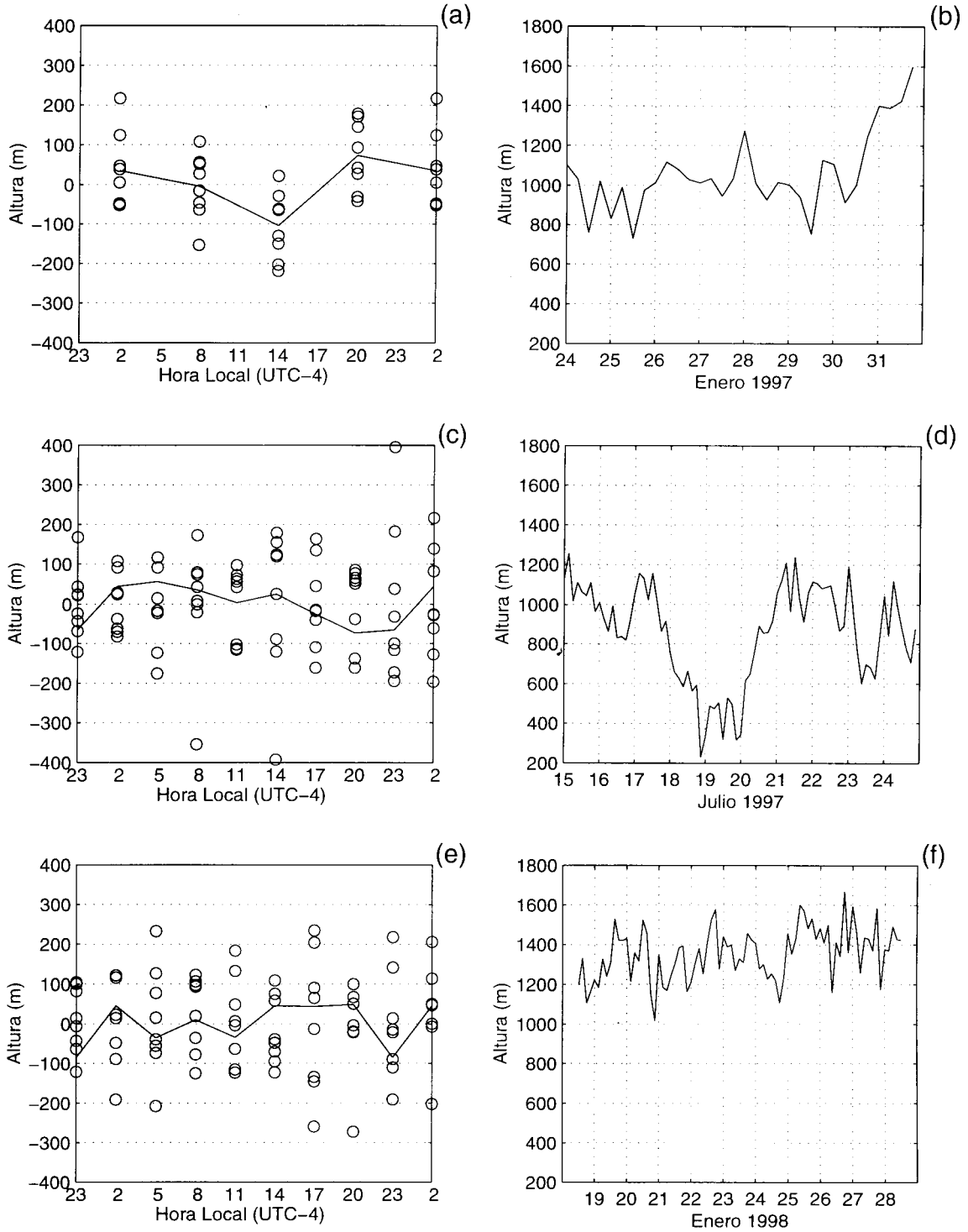


Fig. 2: Ciclos diarios normalizados de la altura de la base de la inversión de subsidencia durante los experimentos DICLIMA I (izquierda-superior), DICLIMA II (izquierda-media) y DICLIMA III (izquierda-inferior). A la derecha se ilustran las secuencias temporales de la altura de la base de la inversión para los correspondientes períodos de medición.

Normalized daily cycles of the subsidence inversion base height during the DICLIMA I (top-left), DICLIMA II (middle-left) and DICLIMA III (bottom-left) experiments. To the right, the time sequences of the inversion base height for the corresponding measuring periods are illustrated.

Tres Amigas 1997 Temperatura (Ciclo Diario - Invierno)

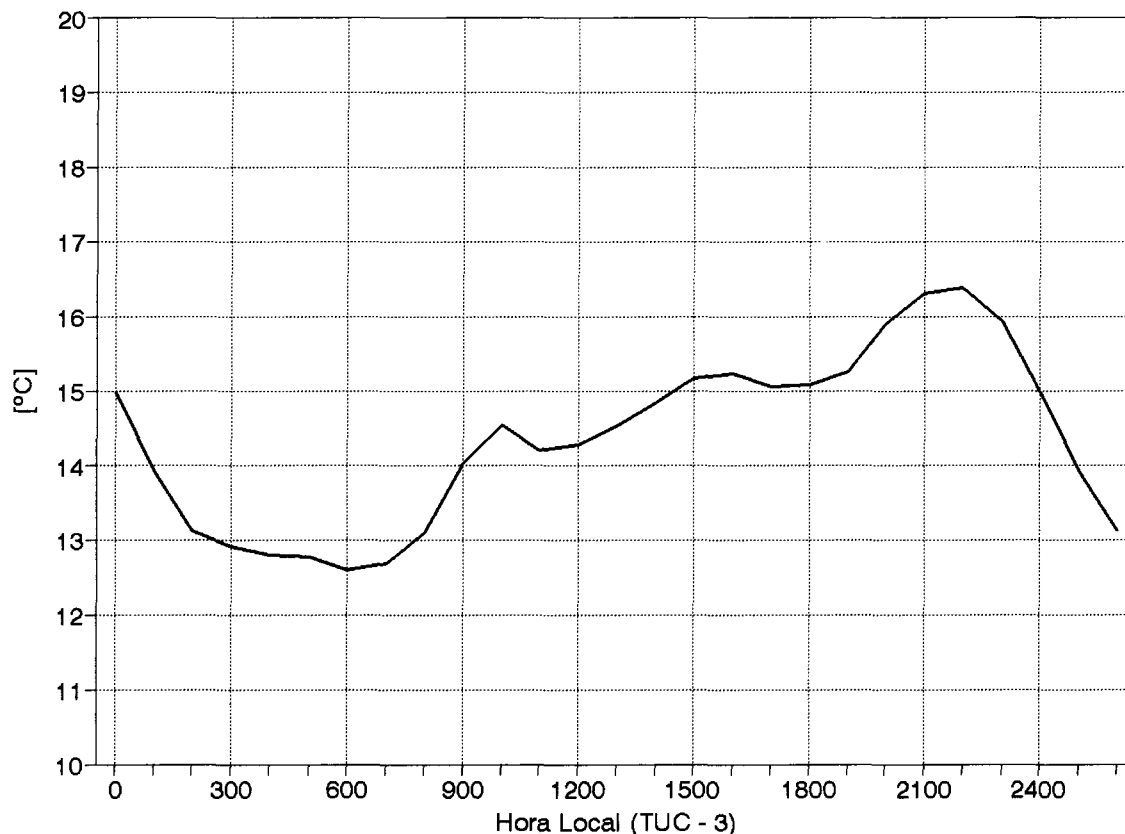


Fig. 3: Ciclo diario medio de la temperatura del aire en Tres Amigas para julio-agosto-septiembre de 1997.

Average daily cycle of the air temperature at Tres Amigas for July-August-September 1997.

inversión térmica entre los días 23 y 26 y entre el 28 y 29 como producto de sendas profundizaciones de la vaguada costera estival que se propagaron de norte a sur con velocidades de fase entre 25 y 40 m s⁻¹. Los vientos del sur aumentaron de intensidad antes de las respectivas ocurrencias de los mínimos de presión en superficie (Fig. 5), particularmente en el segundo período, durante el cual se produjo un evento de surgencia costera que se ilustra en la imagen satelital de la Fig. 6. La subsecuente relajación de los vientos coincidió con una brusca elevación de la inversión térmica el día 31.

En DICLIMA II se produjo una oscilación media de 700 m de amplitud en la base de la inversión de subsidencia, con una al-

tura mínima el día 19 y con dos mínimos secundarios los días 16 y 23. El día 19 la base de la inversión a las 12 TUC llega a los 460 m con un mínimo de la presión superficial al día siguiente.

La configuración meteorológica de escala sinóptica durante este período muestra un sistema cuasi estacionario con una vaguada sobre la costa centro-norte de Chile, una profunda alta fría sobre Argentina y un área de bajas presiones sobre el mar de Bellingshausen. La vaguada costera es modulada por una depresión costera que culmina sobre la zona de estudio entre los días 19 y 20. A pesar de los vientos intensos del SW que muestra Caleta Constitución previo a la culminación de la depresión costera el día 20, la temperatura del mar no mostró variaciones significativas debi-

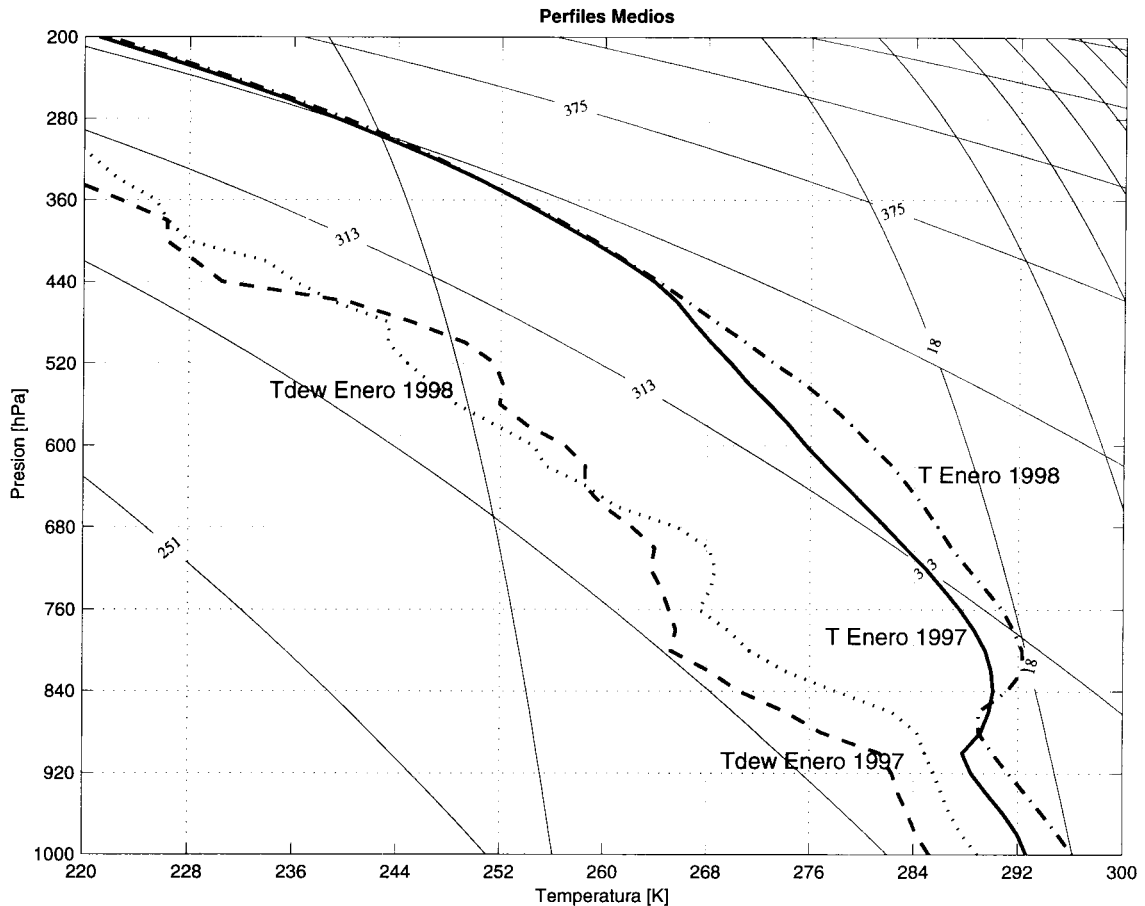


Fig. 4: Perfiles verticales medios de las temperaturas del aire (línea continua) y del punto de rocío (línea de segmentos) en Michilla durante los experimentos DICLIMA I (enero de 1997) y DICLIMA III (enero de 1998).

Average vertical profiles of air (solid) and dew-point (dashed) temperatures for Michilla during DICLIMA I (January 1997) and DICLIMA III (January 1998) experiments.

do a la profundización de la termoclina que se observa durante los eventos de El Niño.

El mínimo secundario en la altura de la base de la inversión del día 16 coincide con vientos superficiales del SE con 2 ms^{-1} , registrándose el mínimo de presión superficial al día siguiente.

El día 23 aparecen rasgos similares a los del 19, con vientos del E de 5 ms^{-1} en torno al tope de la inversión (850 hPa) y vientos del SE con 2 ms^{-1} en superficie a la hora de observación. Esta situación parece corresponder a una baja segregada en la troposfera alta.

En DICLIMA III la inversión de subsidencia descendió durante los días 23 y 24, ascendiendo rápidamente el día 25. La estratificación de la temperatura potencial y

razón de mezcla indican un aumento de la subsidencia los días 23 y 24 que culmina al final de este último día (baja costera) junto con el comienzo de la advección de humedad en superficie la noche siguiente. Sin embargo, la estación de Tres Amigas indica que el mayor descenso en la base de la inversión térmica se produjo el día 29, cuando las mediciones ya habían finalizado.

Durante este período la configuración sinóptica en la troposfera media y alta correspondió al paso de una vaguada los días 24 y 25 precedida de una dorsal el 22 y 23 y seguida por una dorsal más intensa el día 28. Esta actividad meteorológica en pleno verano austral, característica de latitudes más altas, se puede explicar por la presencia de una co-

Caleta Constitución (enero 1997)
Componente meridional del viento

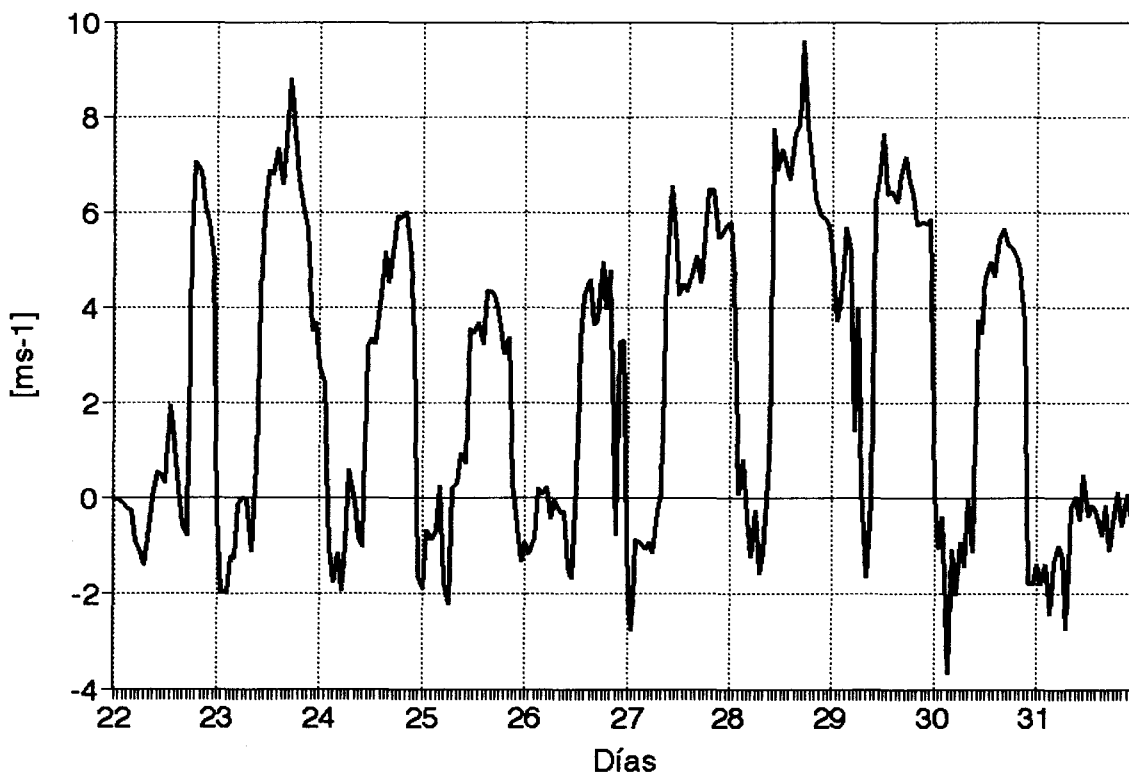


Fig. 5: Componente del viento a lo largo de la costa en Caleta Constitución durante el experimento DICLIMA I.

Alongshore wind component at Caleta Constitución during the DICLIMA I experiment.

riente en chorro subtropical intenso y desplazado hacia el norte, típica de los eventos intensos de El Niño.

Los rasgos de la variabilidad interdiaria de la altura de la base de la inversión térmica descritos para cada campaña de mediciones se reflejaron en las series de tiempo de Tres Amigas (Fig. 7). Sin embargo en DICLIMA III la amplitud de estas fluctuaciones resultó menor debido a la mayor altura de la inversión térmica asociada con el fenómeno de El Niño.

3. Balance de energía superficial en tierra y exportación oceánica de calor

Resultados preliminares de la medición de la radiación neta, conducción de calor en el subsuelo y flujos turbulentos de calor sensible y latente en Michilla indican promedios diarios de radiación neta en días despejados

de 110 y 180 $W m^{-2}$ en DICLIMA II (julio de 1997) y DICLIMA III (enero de 1998), respectivamente (Fig. 8). En ambos períodos de medición estos valores descienden a un 50% en días cubiertos con estratocúmulos.

Los flujos turbulentos de vapor de agua resultaron pequeños y negativos (condensación) tanto en días despejados como cubiertos, siendo relativamente más intensos en las mañanas de días despejados.

Considerando en primera aproximación un número igual de días despejados y cubiertos en un año promedio, se puede inferir un valor del orden de 100 $W m^{-2}$ como promedio anual de la radiación neta en la costa, valor que no difiere significativamente de los 75 $W m^{-2}$ que sugiere Lettau (1978) para toda la costa árida de América del Sur. Dado que sobre el mar se puede considerar una radiación neta media del mismo orden que la de tierra (Lettau 1978), la exportación media anual de

MEJILLONES: TEMPERATURA SUPERFICIAL
29 enero 1997 19:29 GMT

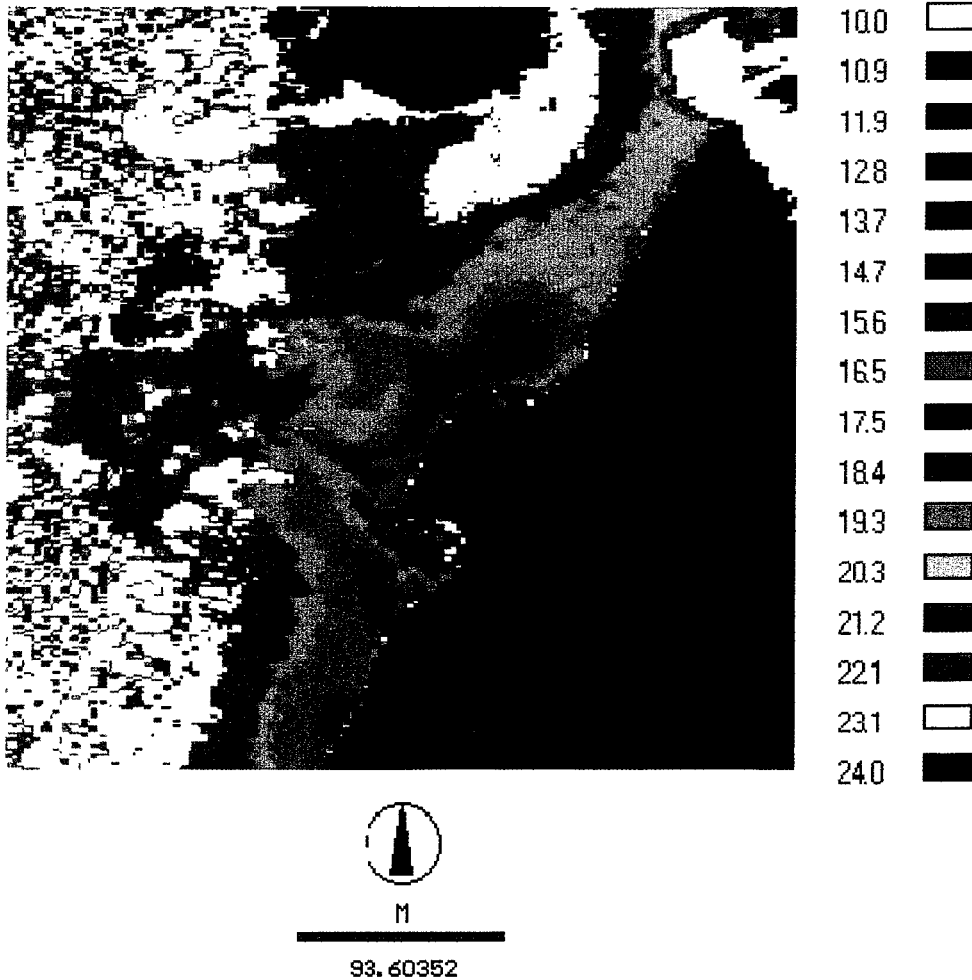


Fig. 6: Imagen satelital AVHRR (NOAA), donde se observan las aguas frías producto de la surgencia en torno a la península de Mejillones el 29 de enero de 1997.

AVHRR (NOAA) satellite image where the upwelled cold waters around the Mejillones peninsula are observed on January 29, 1997

calor asociada con la deriva de Ekman puede estimarse en torno a los 200 W m^{-2} .

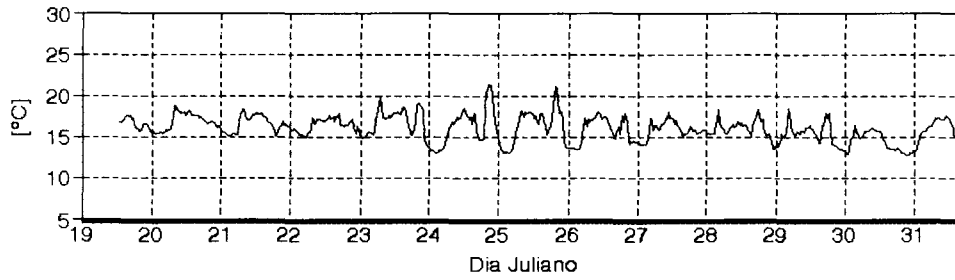
Mediciones de temperatura y corriente efectuadas con un correntómetro anclado a 65 m de profundidad y a 11 km de la costa frente a la península de Mejillones en enero de 1997, muestran la respuesta oceánica a dos eventos de vientos favorable a la surgencia, registrados en la estación meteorológica automática de Caleta Constitución (isla Santa María) (Fig. 5) en términos de un descenso de temperatura y una corriente neta hacia la costa (Fig. 9).

Si se observan los perfiles verticales de temperatura obtenidos mediante CTD (perfilador de conductividad y temperatura en función de la profundidad) en las estaciones oceanográficas cercanas (Fig. 9) se puede inferir que la termoclina estuvo muy cerca del nivel del correntómetro, por lo que una corriente hacia la costa que coincide con un descenso de temperatura en ese nivel representa la rama ascendente (surgencia) en un modelo de Ekman de una celda.

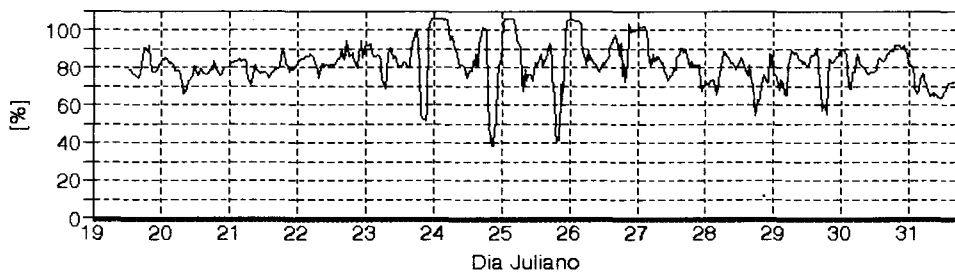
Durante el experimento de julio de 1997 no fue posible observar surgencia de aguas frías

DICLIMA I

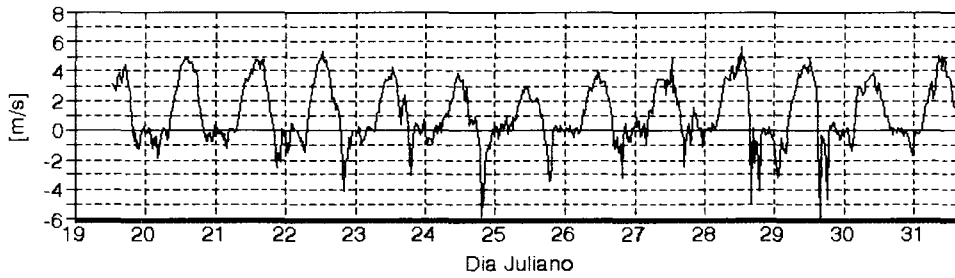
Tres Amigas
Temperatura (19 - 31/01/97)



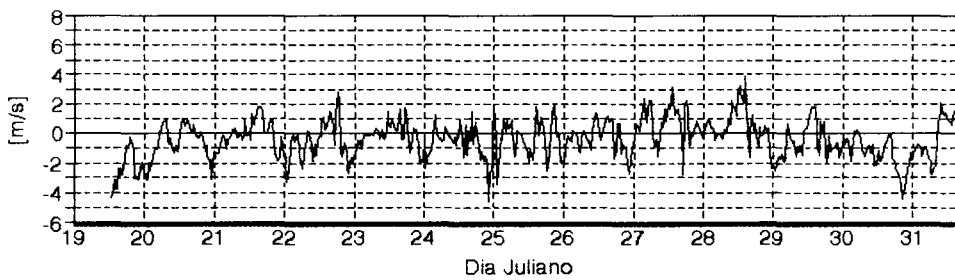
Tres Amigas
Humedad Relativa (19 - 31/01/97)



Tres Amigas
Comp. Zonal del viento (19 - 31/01/97)

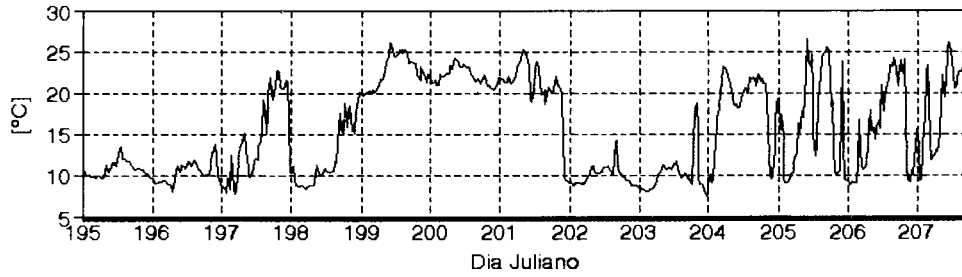


Tres Amigas
Comp. Meridional del vto. (19-31/01/97)

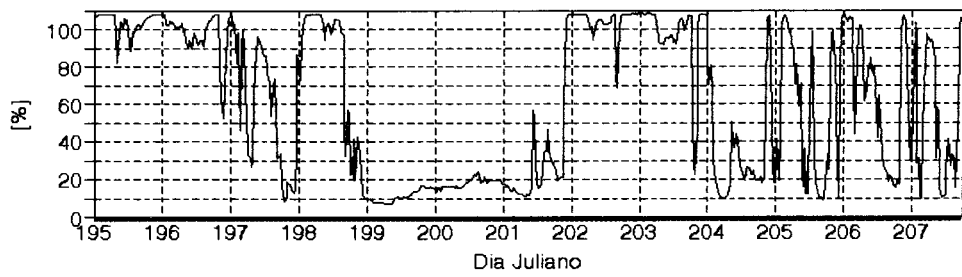


DICLIMA II

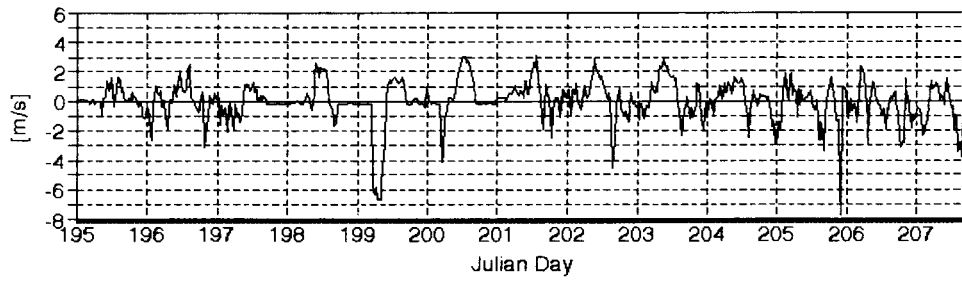
Tres Amigas
Temperatura (14 - 26/07/97)



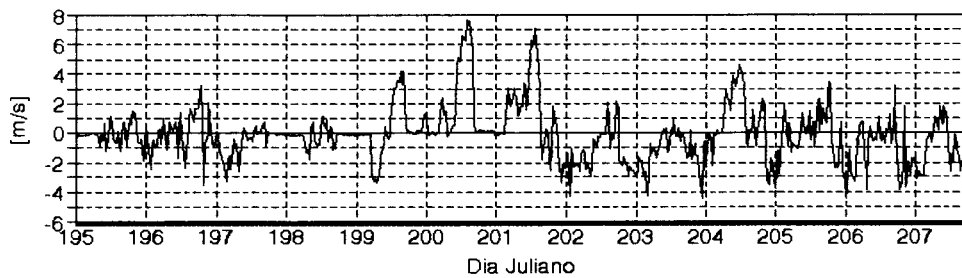
Tres Amigas
Humedad Relativa (14 - 26/07/97)



Tres Amigas
Comp. Zonal del viento (14-26/07/97)



Tres Amigas
Comp. Meridional del vto. (14-26/07/97)



DICLIMA III

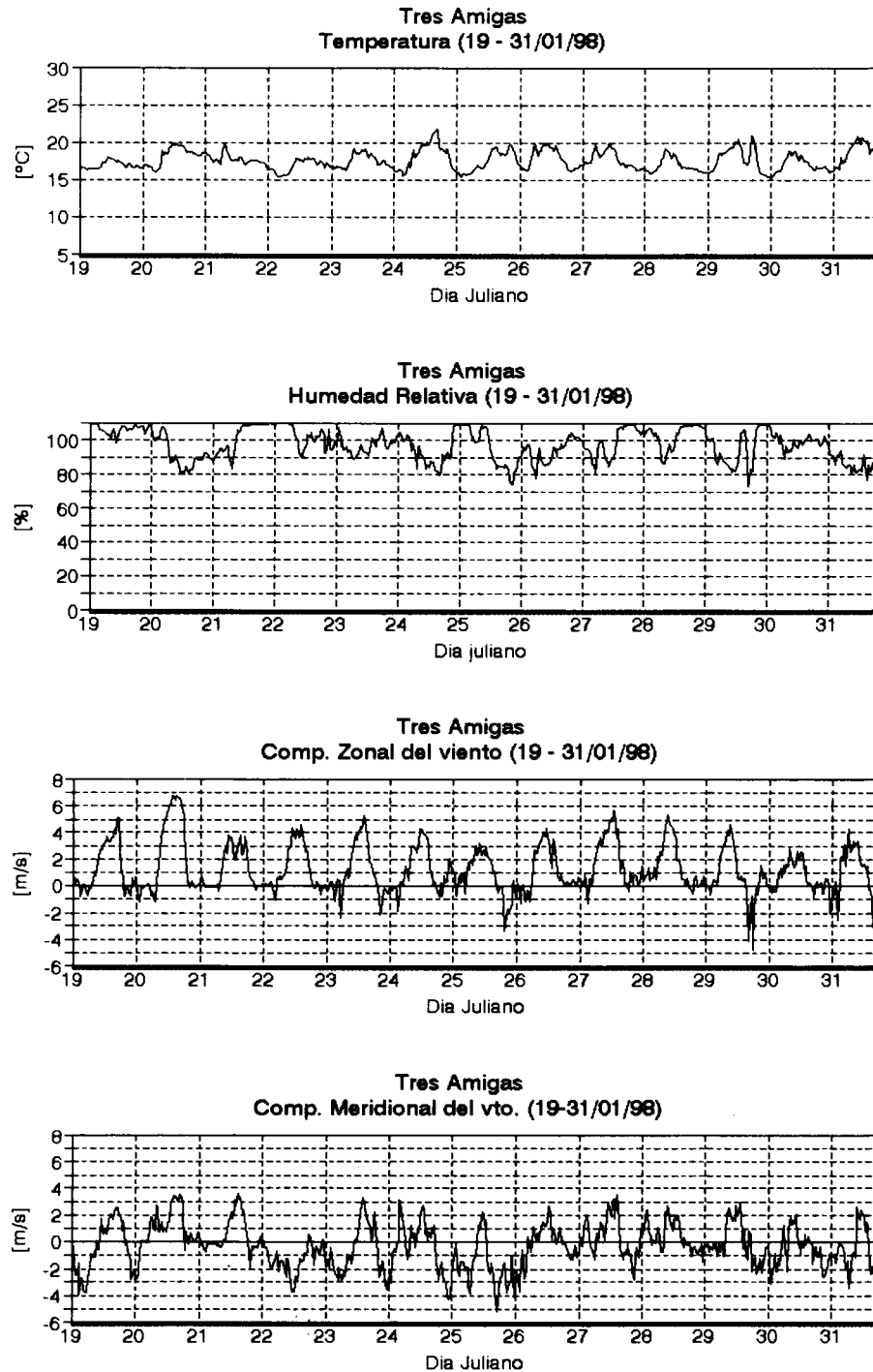


Fig. 7: Series temporales de temperatura, humedad relativa y de las componentes zonal y meridional del viento en Tres Amigas durante los experimentos DICLIMA: a) DICLIMA I, b) DICLIMA II, c) DICLIMA III.

Time series of temperature, relative humidity, zonal and meridional wind components at Tres Amigas during the DICLIMA experiments: a) DICLIMA I, b) DICLIMA II, c) DICLIMA III.

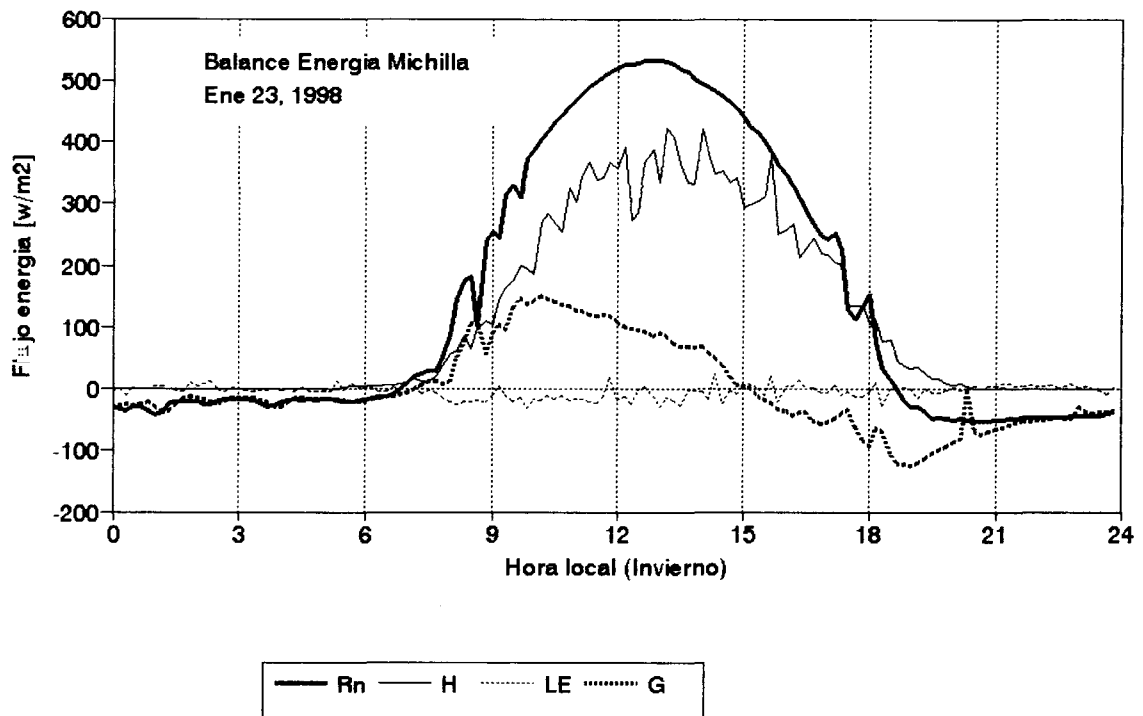
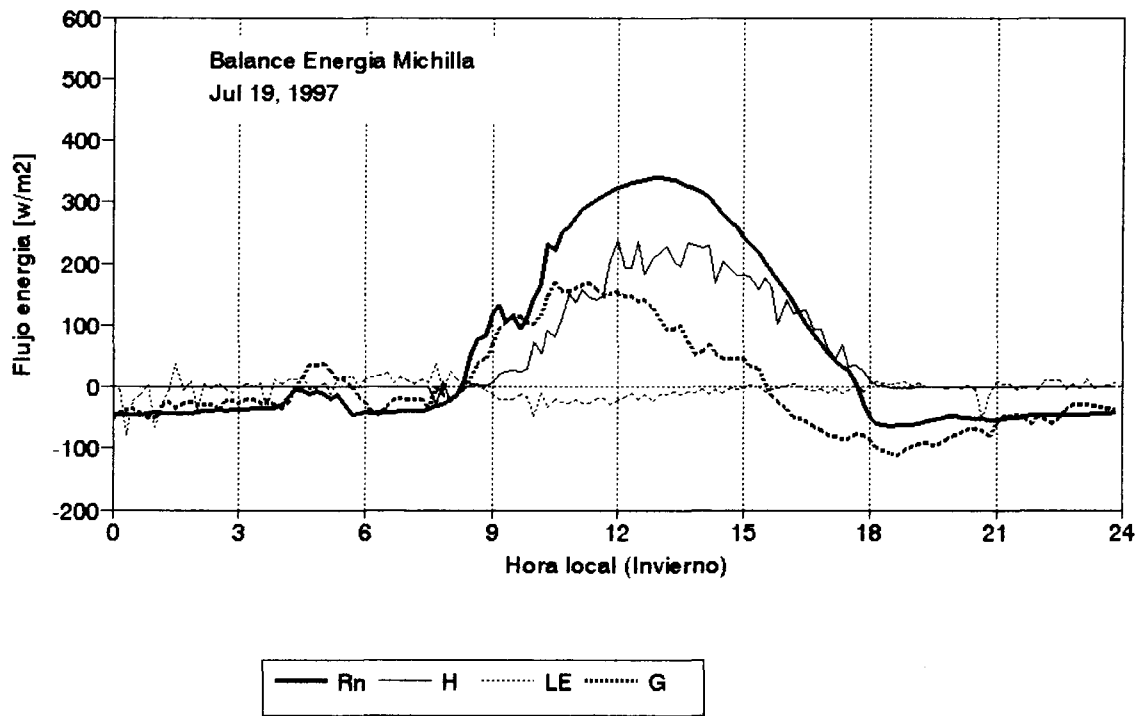


Fig. 8: Densidades de flujo componentes del balance de energía superficial para días despejados en DICLIMA II (a) y DICLIMA III (b) : radiación neta Rn, calor sensible H, calor latente LE y calor al submedio (suelo) G.

Surface energy budget flux density components for cloud-free days in DICLIMA II (a) and DICLIMA III (b) : net radiation Rn, sensible heat H, latent heat LE and heat into the submedium (ground) G.

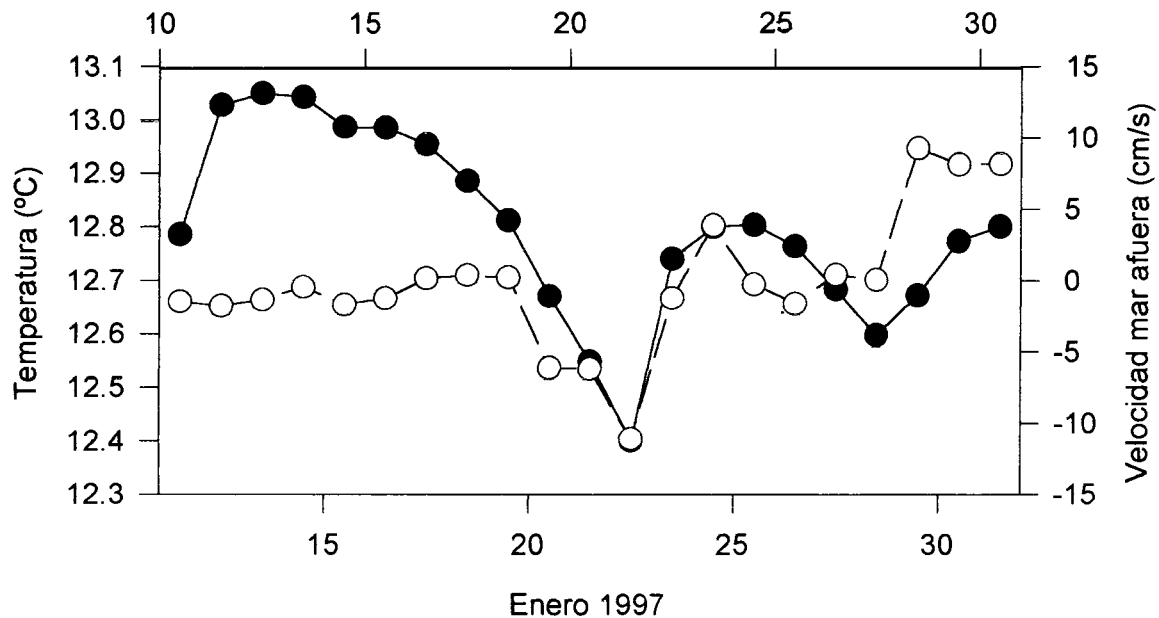


Fig. 9: Relación entre la temperatura del agua (círculos llenos, eje izquierdo e inferior) y la velocidad de la corriente zonal (círculos abiertos, eje derecho y superior) obtenidos mediante un correntómetro a 65 m de profundidad. El desfase entre la velocidad, positiva mar afuera, y la temperatura se ilustra desplazando el eje temporal (ejes superior e inferior, respectivamente).

Relationship between water temperature (full circles, left and bottom axes) and the zonal current speed (open circles, right and top axes) obtained with a recording current meter moored at 65 m depth. The phase shift between the speed, positive offshore, and the temperature is illustrated by shifting the temporal axes. (top and bottom axes, respectively).

debido a la mayor profundidad de la termoclina asociada con el fenómeno de El Niño.

El flujo neto de calor exportado se calculó utilizando un modelo de balance de caja con continuidad de masa y homogeneidad a lo largo de la costa, junto a valores locales de temperatura en la columna de agua (Fig. 10). Los valores resultantes para los dos ciclos de surgencia-relajamiento observados en DICLIMA I fueron de 24 y 796 $W m^{-2}$ cuyo promedio es, en primera aproximación, consistente con los valores medios de la radiación neta total esperados para verano (30% superiores a los anuales). La alta diferencia entre estos valores requiere de un mayor análisis, pudiendo explicarse en parte por la orografía irregular de la zona (península de Mejillones) y lo reducido del período de mediciones.

4. Intercambio de CO_2 entre el océano y la atmósfera

La transferencia de carbono en la interfaz océano-atmósfera depende del gradiente

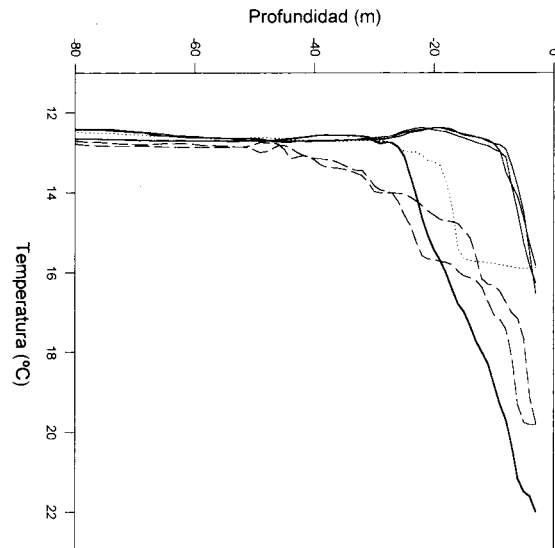


Fig. 10: Perfiles verticales de temperatura del mar obtenidos mediante CTD frente a la península de Mejillones para enero 14 (línea de segmentos), 18 (línea sólida gruesa), 24 (línea sólida delgada) y 28 (línea punteada).

Vertical CTD profiles of sea temperature off the Mejillones peninsula for January 14 (dashed), 18 (thick solid), 24 (thin solid), and 28 (dotted).

entre la presión parcial del CO₂ atmosférico (pCO₂) y la fugacidad del CO₂ en la superficie del mar (fCO₂), así como del esfuerzo del viento sobre el mar que controla tanto la ventilación del agua superficial y profunda como la velocidad de transferencia turbulenta de este gas a través de la interfaz.

En el área de estudio el campo superficial de fCO₂ se ve profundamente afectado por la surgencia de aguas de capas profundas. En efecto, el característico afloramiento de aguas relativamente frías y con déficit de oxígeno produce invariablemente un flujo de carbono desde el mar hacia la atmósfera en el área donde el agua emerge (centro o foco de surgencia). Sin embargo, la subsecuente floración de la biomasa fitoplanctónica en algunas áreas cerca de la costa disminuyó considerablemente la fCO₂ (consumo de carbono inorgánico) en torno al centro de surgencia en enero de 1997. Estas áreas, donde el flujo de carbono ocurrió desde la atmósfera hacia el océano, se caracterizaron por elevados niveles de fluorescencia superficial y sobresaturación de O₂.

En julio de 1997, el área comprendida entre la costa y 70 km mar afuera estuvo fuertemente sobresaturada de CO₂, con valores de la presión parcial entre 400 y 600 μ atm. En efecto, la menor estratificación de la columna de agua durante este período pudo redundar en una mayor ventilación de las aguas profundas invariablemente poco oxigenadas y sobresaturadas de CO₂, y en el bloqueo a la acumulación de una significativa biomasa fotosintetizadora cerca de la superficie.

El pH, la temperatura, la alcalinidad total (AT), el carbono total (CT) y la fugacidad del CO₂ (fCO₂) variaron significativamente en la columna de agua (e.g. Fig. 11). El efecto inicial de un evento de surgencia en la fCO₂ depende de la distribución de esos parámetros en la columna de agua, así como de la profundidad desde la cual el agua es mezclada o transportada hacia la superficie por efecto del viento. Consecuentemente, la distribución vertical de los parámetros del ácido carbónico es clave en la comprensión del efecto de la surgencia

en los flujos de CO₂. A su vez, la distribución de estos parámetros depende en parte de las características particulares de las masas de agua presentes en esta región (e.g. Fig. 12) que se originan en procesos físicos (e.g. historia de ventilación con la atmósfera) y en procesos químicos (e.g. descomposición aeróbica de la materia orgánica y la disolución de carbonatos) de gran escala como sugiere la Fig. 13.

Los cambios en la distribución de masas de agua en enero y julio de 1997, así como su repercusión en el contenido de CO₂ desde 0-700 m de profundidad, son tratados in extenso en *Changes in the vertical distribution of carbonate system parameters due to El Niño 1997-1998 in a Southeastern Pacific coastal upwelling area (23°S)*, de Torres R., J. Rutllant & D. Turner (manuscrito en preparación).

Del análisis general de estos resultados se puede concluir que: El proceso de surgencia frente a la península de Mejillones ventila agua profunda altamente enriquecida en carbono inorgánico, con presiones parciales de CO₂ por sobre el valor atmosférico que alcanzan a superar las 600 μ atm.

El campo superficial de CO₂ está determinado primariamente por la surgencia costera (cantidad y tipo de agua que emerge), pero puede ser modificado por la actividad biológica local en determinadas áreas y períodos, así como por la tendencia al equilibrio con la atmósfera.

Las distribuciones de AT, TC, fCO₂ y pH están relacionadas con las masas de agua descritas para esta región. Consecuentemente, el tipo de agua que emerge determina parcialmente el intercambio de carbono entre el océano y la atmósfera. En particular en el manuscrito citado se asocian fuertes cambios en la distribución vertical de los parámetros del sistema del ácido carbónico con El Niño 1997/1998.

5. Variabilidad climática interdecadal

La variación climática interdecadal en Antofagasta fue estudiada en un contexto geográfico, mayor incluyendo información hemis-

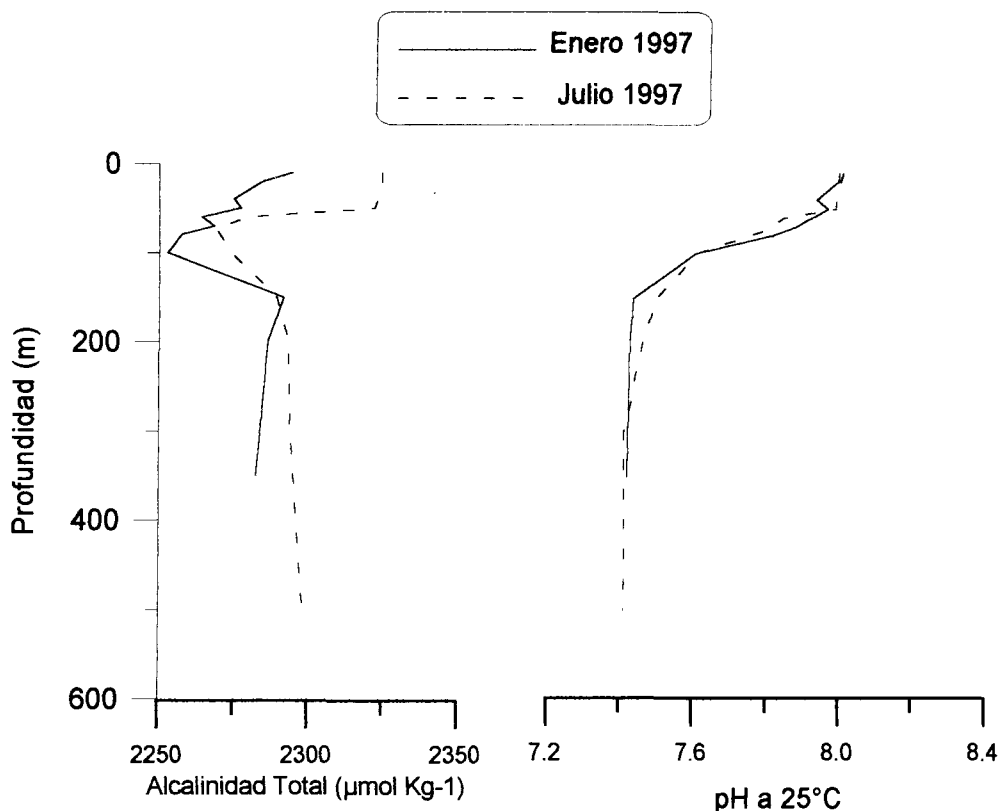


Fig. 11: Perfiles verticales de pH a 25°C y alcalinidad total (AT) en estaciones oceanográficas alejadas de la costa, ocupadas durante los cruceros de enero y julio de 1997.

Vertical profiles of pH (at 25°C) and total alkalinity (AT) in offshore oceanographic stations occupied during the January and July 1997 cruises.

férica contenida en los Reanálisis del NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research), en las temperaturas superficiales del mar (TSM) coleccionadas en el COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) y en datos troposféricos de los radiosondeos de Quintero y Puerto Montt, además de los de Antofagasta (Cerro Moreno). La variación durante las últimas décadas está manifiestamente influida por un repentino cambio ocurrido promediando la década de los setenta, que fue identificado por el método de Alexandersson (1986).

Las TSM en el litoral chileno presentan un calentamiento brusco hacia fines de 1976 (Fig. 14) con una magnitud que decrece desde 0,9 hasta 0,5°C entre las latitudes 19 y 40°S. Tal discontinuidad separa tramos, anterior y posterior, con tendencias

negativas al punto que la tendencia global del período 1950-1994 resulta positiva. Este calentamiento se refleja en la temperatura del aire de la capa límite atmosférica (CLA) en Antofagasta y Quintero con incrementos de 0,7°C, pero también en la troposfera media y alta. Así, puede observarse un calentamiento significativo sobre toda la troposfera en Puerto Montt, desde 600 hPa hacia arriba en Quintero y sólo a 200 hPa sobre Antofagasta.

El calentamiento superficial en Antofagasta se concentró en las temperaturas mínimas, cuyos valores se incrementan entre 1,2 y 1,5°C.

La humedad del aire, expresada como relación de mezcla (gramos de vapor de agua por kg de aire seco), manifiesta variaciones dependientes del lugar y la altitud que, además, no ocurren simultáneamente

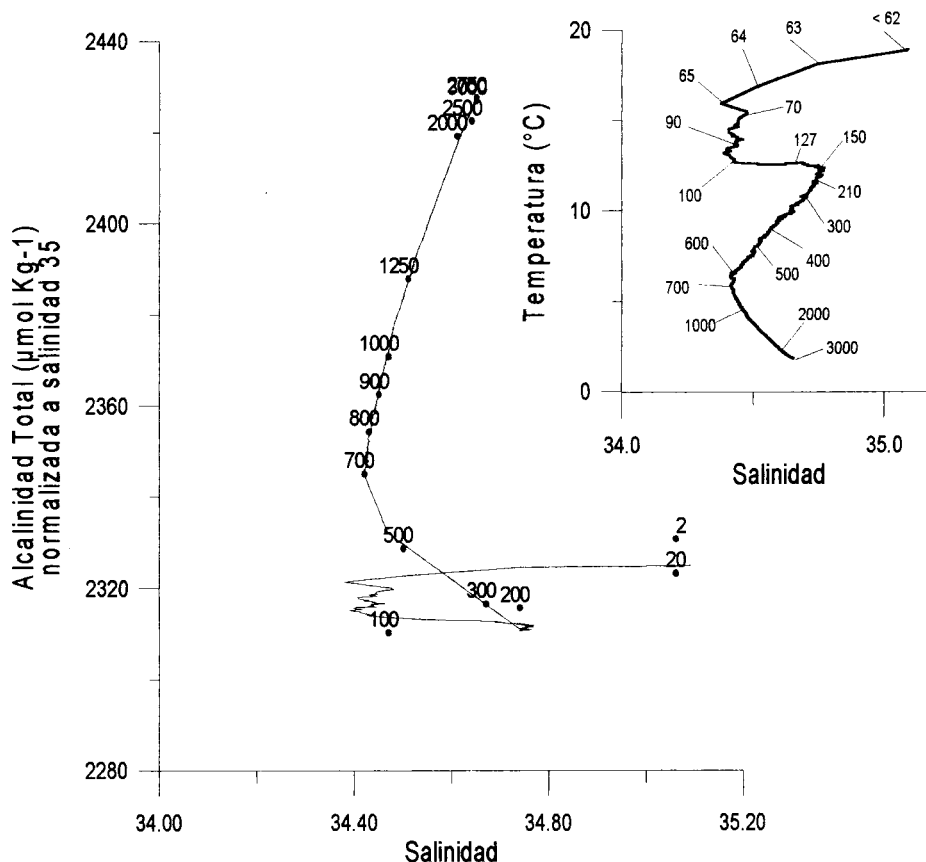


Fig. 12: Diagrama alcalinidad total vs. salinidad. La línea continua representa un modelo de relación entre la temperatura y salinidad con la AT específica. Nótese las tendencias en los tramos 2-100, 100-200, 200-700, y 700-3 000. m de profundidad.

Total alkalinity vs. salinity diagram. The continuous line represents a temperature and salinity model relating those variable with the specific AT. Note the tendency in the sections 2-100, 100-200, 200-700 and 700-3 000 m depth.

con las de temperatura. La prueba de Alexandersson indica que a comienzos de los setenta existe una disminución en la CLA sobre Antofagasta con un aumento por encima de la inversión de subsidencia que al nivel de 850 hPa alcanza a 1 g kg^{-1} . Sobre Quintero el aumento significativo de la relación de mezcla ocurre en 1976, pero sólo cerca de la superficie, en tanto que a otros niveles ocurre a comienzos de los años setenta, situación que se repite en todos los niveles sobre Puerto Montt.

La nubosidad observada a las 2 p.m. sobre Antofagasta disminuye alrededor de 1976, lo cual se asocia con un rápido incremento del viento (S) en $1,5 \text{ m s}$ (Fig.15). Esto, junto con los cambios de humedad opuestos a través de la inversión que ante-

ceden a los del viento, sugiere que en la década de los setenta empiezan debilitamientos esporádicos de la inversión de subsidencia que permiten un transporte de vapor de agua desde la CLA hacia estratos inmediatamente superiores, los que posteriormente debilitan la persistencia de la cobertura nubosa, dando origen a vientos más enérgicos a las horas de mayor insolación.

Tentativamente se puede concluir que los cambios observados a partir de mediados de la década de los 70 en la temperatura del mar y del aire, así como en el debilitamiento de la intensidad de la inversión de subsidencia que se infiere de los cambios en la humedad a través de ella y en la nubosidad estratocumuliforme, son coherentes con la caída en el valor medio del índice de

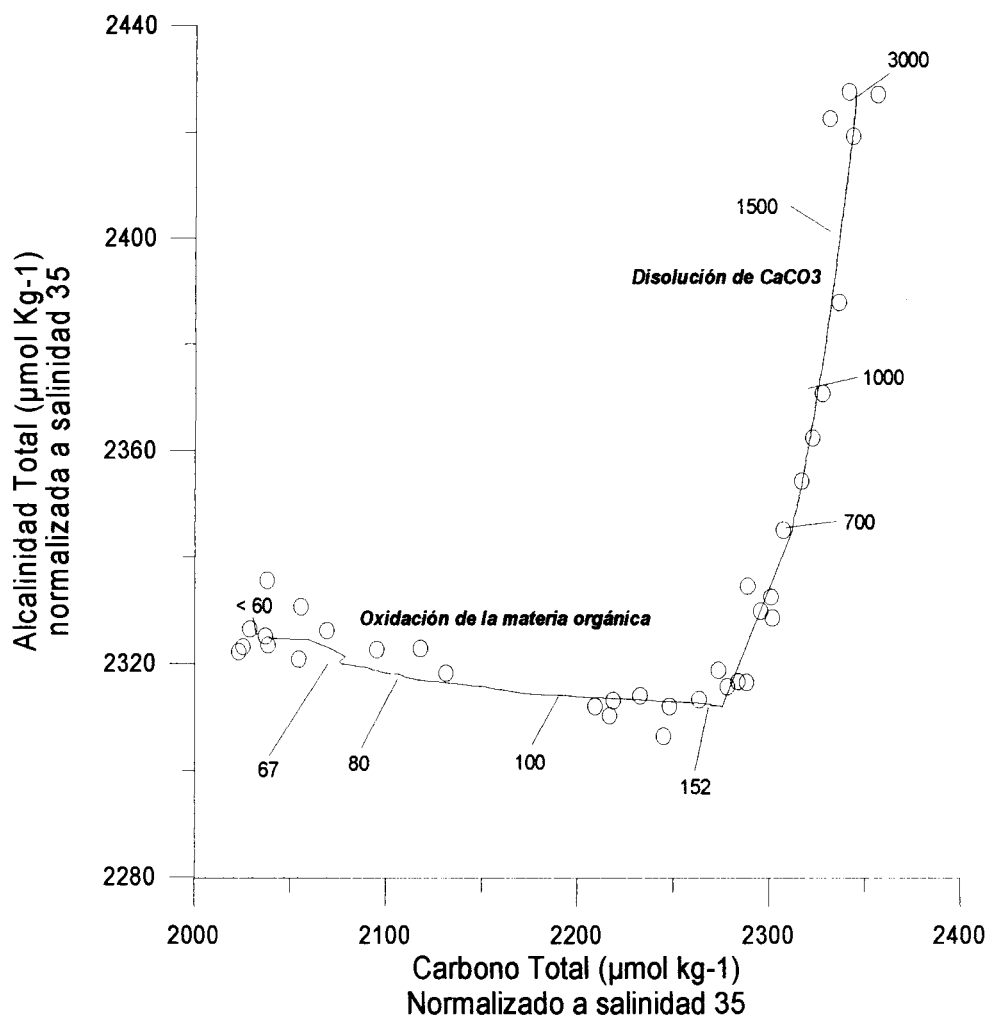


Fig. 13: Relación entre la alcalinidad total (AT) y el carbono total (CT). Cerca de la superficie (0 - 150 m) la pendiente estaría determinada por la oxidación de la materia orgánica. En muestras de aguas más profundas (700 - 3 000 m) la pendiente se explicaría por la disolución del CaCO_3 .

Relationship between total alkalinity (AT) and total carbon (CT). Near the surface (0 - 150 m) the slope would be determined by the oxidation of organic matter. In deeper water samples (700 - 3 000 m) the slope would be explained by the CaCO_3 solution.

la Oscilación del Sur (IOS) registrada a partir de 1976.

PROYECCIONES DE LA INVESTIGACION

Las proyecciones esperadas de los resultados de este trabajo incluyen la posibilidad de efectuar un experimento a nivel internacional en el marco de los monzones americanos (CLIVAR-VAMOS) donde se

utilicen masivamente equipos sofisticados como aviones y aerosondas para analizar en profundidad el efecto de la cordillera de los Andes y del Altiplano en la circulación atmosférica regional (sección transversal San Felix, Antofagasta, Altiplano, NW argentino), particularmente el efecto de la convección altiplánica estival sobre los estratocúmulos costeros y el desarrollo de la corriente en chorro de baja altitud al E de los Andes.

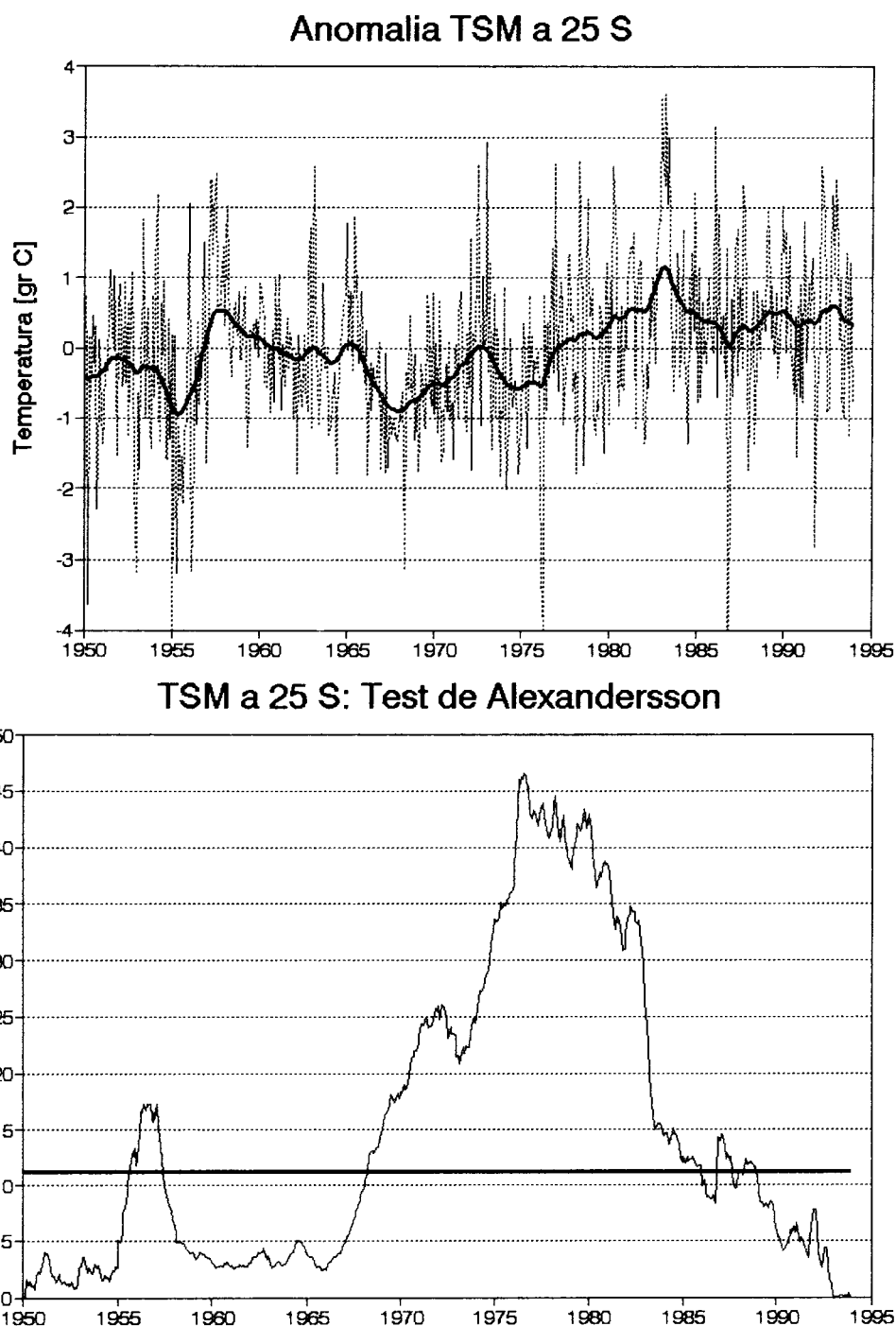


Fig. 14: Series mensuales de temperaturas superficiales del mar promediadas sobre un área de 2° de latitud por 2° de longitud centrada a 25°C (arriba). La línea de puntos corresponde a valores medios mensuales y la línea gruesa es una versión suavizada de la anterior. Test de Alexandersson para los mismos datos (abajo); la línea gruesa horizontal representa el nivel de 95% de significancia y el máximo de la línea punteada indica en momento en que existe una discontinuidad en la serie.

Time series of monthly sea-surface temperatures averaged over a 2° latitude by 2° longitude area centered at 25°S (top). The dashed line corresponds to monthly average values while the solid lines is a smoothed version of the former. Alexandersson test for the same data (bottom): the horizontal thick line represents the 95% significance level while the maximum in the dashed line indicates the discontinuity in the series exist.

Antofagasta (14:00 HL) Vto. merid. & Anom. nubosidad

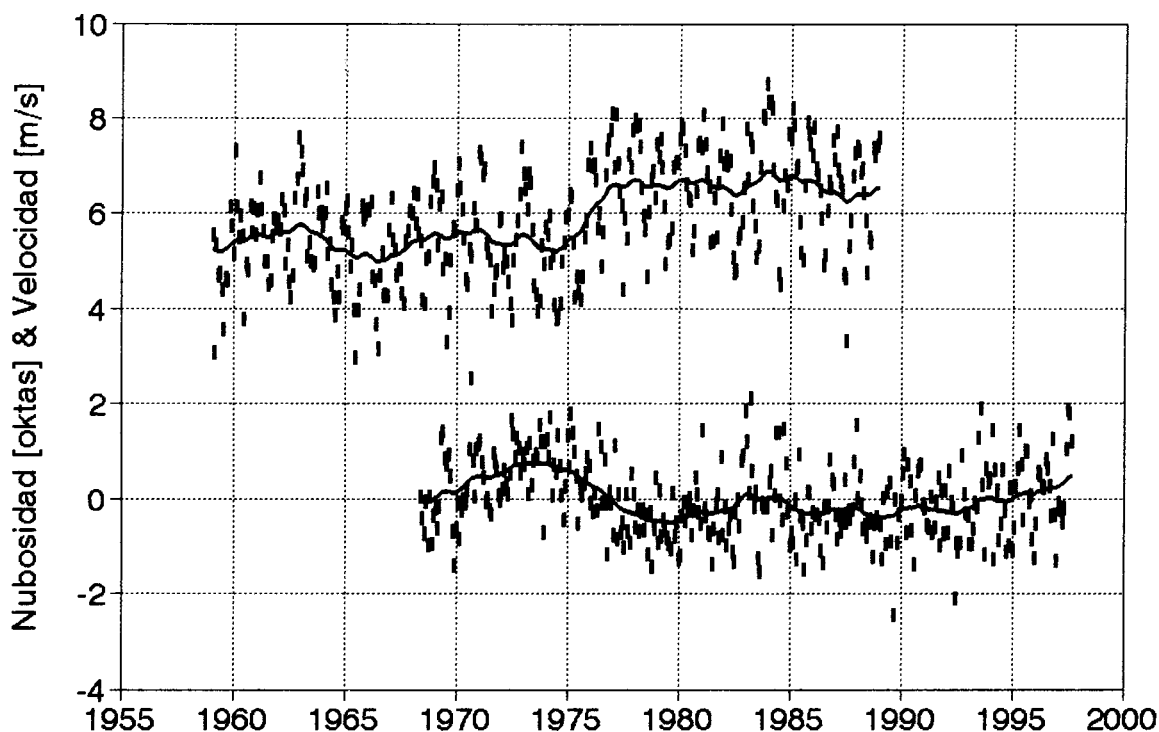


Fig. 15: Series de valores mensuales para la velocidad de la componente meridional del viento y de la anomalía de nubosidad en Antofagasta (Cerro Moreno). Los rectángulos corresponden a promedios mensuales y la línea gruesa es una versión suavizada de los anteriores.

Monthly time series for the meridional windspeed component and the cloudiness anomaly at Antofagasta (Cerro Moreno). Rectangles correspond to monthly averages while the thick line is a smoothed version of the former.

En lo que respecta a las depresiones costeras se espera determinar si su presencia en la zona de Antofagasta se detecta más al norte (Arica e Iquique) en condiciones de no Niño así como investigar otros posibles orígenes de su forzamiento más allá de las perturbaciones de escala sinóptica de latitudes medias. Estos aspectos, así como sus características dinámicas en cuanto a región de origen y propagación, se pretenden abordar con un modelo numérico que sería validado mediante observaciones in situ y mediante observaciones satelitales, particularmente con los datos de viento del NSCAT y QUIKSCAT en lo que se refiere a la influencia mar afuera de esas depresiones costeras.

En el ámbito oceánico se espera encontrar valores más representativos de la ex-

portación regional de calor mar afuera por las corrientes zonales medias cerca de la costa con los datos de un anclaje al S de Iquique, que mantiene desde hace poco el Proyecto FONDAP-OBM (SCH), complementados con las mediciones de temperatura en la columna de agua que efectúa regularmente el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) a bordo del B/I Carlos Porter. Una mejora en la resolución vertical de los flujos de agua en la capa de Ekman se podría obtener mediante un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), que se espera integrar próximamente a las mediciones del Proyecto FONDAP.

En el intertanto, y con el apoyo del Proyecto FONDAP, se mantendrán las estaciones automáticas costeras de Caleta Consti-

tución (Mejillones), Tres Amigas (Michilla Alto), Punta Caldereta (Caldera) y Punta Lengua de Vaca (Coquimbo-Tongoy).

Finalmente se espera financiamiento por parte del Ministerio de Hacienda para un proyecto presentado por el Comité Oceanográfico Nacional (CONA) con el apoyo de la Comisión Intersectorial para el Estudio del Fenómeno de El Niño (Ministerio del Interior), que permitirá fondear y mantener boyas meteorológicas frente a la costa norte y centro de Chile.

AGRADECIMIENTOS

Además de los autores, participaron en diferentes aspectos del experimento DICLIMA Patricio Aceituno, Manuel Aguayo, Carlos Figueroa, Alejandro Galleguillos, Juan Inzunza, Aldo Montecinos, Laura Reyes, Roberto Rondanelli, Zaida Salinas, Luis Sánchez, Rodrigo Sánchez, Gabriel Vargas, Patricio Zuleta, Ricardo Zuleta, así como el capitán y la tripulación del B/I Abate Molina. Todos ellos fueron determinantes en el éxito del trabajo de campo. Vayan también nuestros sinceros agradecimientos a las Municipalidades de Sierra Gorda y Mejillones por facilitarnos las escuelas públicas y su infraestructura como bases de operación. Datos adicionales fueron gentilmente proporcionados por la Dirección Meteorológica de Chile, el Servicio Meteorológico de la Armada y el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. Este trabajo fue financiado por el Proyecto FONDECYT 5960020 del Programa Sectorial "Biomás y Climas Terrestres y Marinos del Norte de Chile". Contribuyeron también con apoyo financie-

ro para la realización del DICLIMA III, Campaña de enero 1998, SAREC-CONICYT con el Proyecto Recursos Marinos Naturales y el FONDAP O & BM a través del Subproyecto Sistema de la Corriente de Humboldt y el Programa de Desarrollo en Ciencias del Mar y del Departamento de Investigación y Desarrollo (Proyecto I3667) ambos de la Universidad de Chile.

LITERATURA CITADA

- ALEXANDERSSON H (1986) A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climate* 6: 661-675
- LETTAU H (1967) Small to large scale features of boundary layer structure over mountain slopes. *Proceedings Symposium on Mountain Meteorology. Section 2. Fort Collins, Colorado (USA).*
- LETTAU H (1978) Explaining the world's driest climate. Chapter 12 in *Exploring the World's Driest Climate* (H. and K. Lettau, Eds.). IES Report 101. University of Wisconsin Press, Madison (USA).
- RUTLLANT J & P ULRIKSEN (1979) Boundary layer dynamics of the extremely arid northern part of Chile: The Antofagasta Field Experiment. *Boundary Layer Meteorology* 17: 41-55
- RUTLLANT J (1990) Natural desertification mechanisms along the arid west coast of South America. *Proceedings Conference on Sand Transport and Desertification in Arid Lands. Khartoum, Sudan, November 1985. World Scientific Press (F. El-Baz, I. El-Tayeb and M. Hassan, Eds): 235-252.*
- RUTLLANT J (1994a) Modeling the day to day wind variability off central Chile at about 30°S. *International Centre for Theoretical Physics. (Trieste-Italy). Internal Report IC/94/166: 21 pp*
- RUTLLANT J (1994b) On the generation of coastal lows in central Chile. *International Centre for Theoretical Physics. (Trieste-Italy). Internal Report IC/94/167: 20 pp*
- SHAFFER G, O PIZARRO, L DJURFELDT, S SALINAS & J RUTLLANT (1997) Circulation and low-frequency variability near the Chilean coast: remotely forced fluctuations during the 1991-92 El Niño. *Journal of Physical Oceanography* 21(2): 217-235.
- TREWARtha G (1961) *The Earth's Problem Climates.* The University of Wisconsin Press, Madison. (USA)
- VERGARA J A & H FUENZALIDA (1993) Intraseasonal oscillations in the subtropical subsidence of the eastern Pacific. *Contributions to Atmospheric Physics* 66 (1-2): 119-124