

VARIABILIDAD TERMICA EN LA BAHIA LAGUNA VERDE (33° 06'S; 71° 45'W)

THERMAL VARIATIONS IN THE LAGUNA VERDE BAY (33° 06'S; 71° 45'W)

*Julio P. Moraga**

RESUMEN

Durante los años 1979 a 1981 se tomaron registros de temperaturas con un termógrafo de arrastre y un batitermógrafo en el interior de la bahía Laguna Verde. Las observaciones, aunque esporádicas, incluyen un muestreo intensivo de dos días, con estaciones repetidas al mismo día después de cuatro horas.

En general, el invierno se caracteriza por gradientes térmicos verticales despreciables, los que empiezan a aumentar a fines de la primavera, llegan a ser máximos en el otoño. En verano, aunque la radiación solar es máxima, la entrada de aguas frías desde Curaumilla impide la formación de una termoclina estacional.

En mayo de 1981, en un lapso de 10 días y bajo condiciones de vientos intensos, provenientes del norte, se observó el hundimiento de la termoclina y por lo tanto el aumento de la capa de mezcla. Las variaciones en superficie responden al calentamiento solar y a la entrada de aguas oceánicas, mientras que los cambios en los niveles medios en el muestreo intensivo efectuado en invierno, podrían indicar la existencia de ondas internas. Estas variaciones mostraron la necesidad de programar las mediciones en bahías donde no es usual tener condiciones estacionarias ni estables.

Palabras claves: Balance térmico, Gradiente térmico, Inversión térmica, Onda interna.

ABSTRACT

Temperature records were taken in Laguna Verde Bay with a drag thermograph and a bathythermograph from 1979 to 1981. The data include three stations sampled twice, four hours apart, and a grid of twelve stations sampled every eight hours on August 14 and 15th 1981.

In general, the winter is characterized by a negligible temperature vertical gradient, being these gradients increased during late spring and fall when they reach to a maximum. During summer, even though the solar radiation is greater, the incoming cold water from the Curaumilla upwelling center prevented the development of a seasonal thermocline.

On May 1981, after ten days of predominantly northerly winds, a deepening of the thermocline and increase of the width of the mixed layer was observed. The superficial changes are caused by the solar radiation and incoming waters while the intermediate changes detected on August 1981 seem to be due to an internal wave.

These changes show the need of sampling programs in bays where instability and non-stationary are common.

Key words: Thermal balance, Thermal gradient, Thermal inversion, Internal wave.

INTRODUCCION

Entre los años 1979 y 1981 se realizaron muestreos en la bahía Laguna Verde (Fig. 1) con el objetivo de conocer el sistema de corrientes que la afecta. El análisis global de toda la información fue presentada en el estudio de Moraga y Gómez (1985). Como una variable de estas observaciones, se midió la temperatura en cortes horizontales y vertica-

les, repitiéndolas en distintas estaciones del año y con diferentes frecuencias. El análisis de la variabilidad de esta información térmica es el objetivo de este trabajo.

Alarcón y Pineda (1969), efectuaron 3 estaciones en la boca de la bahía en enero de 1959 y una en septiembre de 1960, señalando que existe entrada superficial de aguas más frías en verano (13°C) sin afectar las

**Instituto de Oceanología, Universidad de Valparaíso.*

Nota: Actualmente en la Facultad de Ciencias del Mar, Universidad del Norte, Sede Coquimbo. Trabajo presentado en las V Jornadas de Ciencias del Mar, 1985.

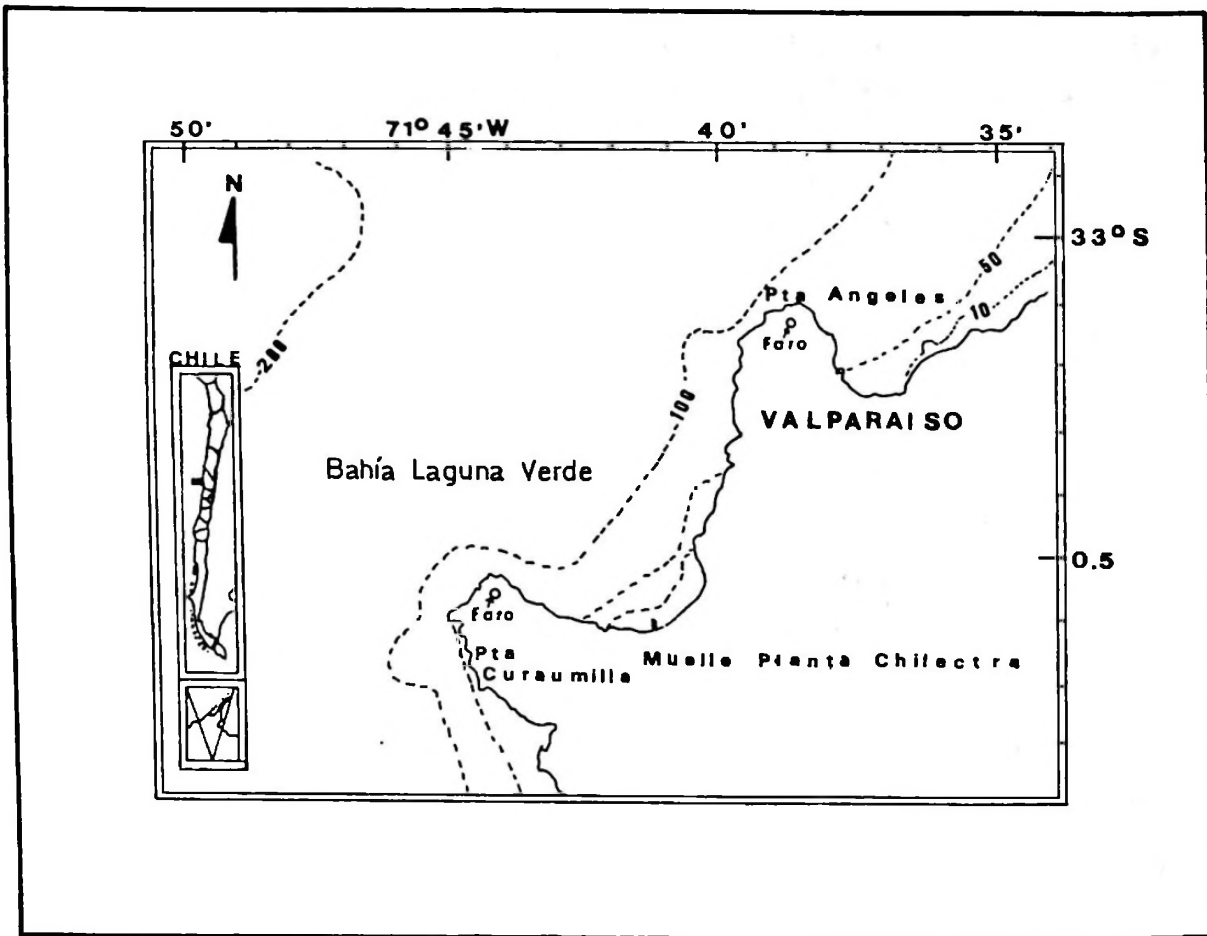


Figura 1. Área de estudio.

aguas del fondo, y que en invierno no hay prácticamente gradientes verticales, siendo la temperatura de la columna de agua de 11°C . Posteriormente, Johnson *et al.* (1980), realizaron observaciones con batitermógrafo, en diciembre de 1975, en un estudio intenso de surgencia de 4 días en punta Curauquilla, y observan que aguas frías ($\sim 11^{\circ}\text{C}$) se presentan en la superficie de la boca de la bahía y aguas homotermales bajo los 20 m de profundidad ($< 10,5^{\circ}\text{C}$). Fonseca (1985) analiza la variabilidad de algunos parámetros físicos frente a la costa en la zona central de Chile, y el mismo autor (1984) asocia las inversiones térmicas con las aguas surgentes en la misma área. Sin embargo, no hay antecedentes sobre las variaciones térmicas en el interior de la bahía.

MATERIALES Y METODOS

Para la obtención de registros continuos de temperaturas superficiales se usó un ter-

mógrafo de arrastre, de respuesta rápida, construido y calibrado en el Laboratorio de Electrónica de la Universidad Católica de Valparaíso y, para obtener perfiles verticales, un batitermógrafo (BT) calibrado Kahl-sico de 0 – 275 m.

El termógrafo de arrastre se utilizó el año 1979 en tres oportunidades en el área próxima al muelle Chilectra, desde el islote León a caleta Hornillos (Fig. 2). El registro continuo se hizo en menos de dos horas de navegación, en horas de la mañana.

El 14 de diciembre de 1980, se efectuaron cuatro estaciones con BT en un corte orientado al NW, Corte A, el que se repitió cuatro horas más tarde (Figs. 3a, 4a, y b). El 06 y 15 de mayo de 1981 se repitió el corte A con una mayor densidad espacial de estaciones (Figs. 3b, c, 4c, y d). Un muestreo más intenso, con una red de estaciones cubriendo todo el interior de la bahía, se realizó los días 14 y 15 de agosto (Figs. 3d, 4e, f, 5), repitiéndose dos

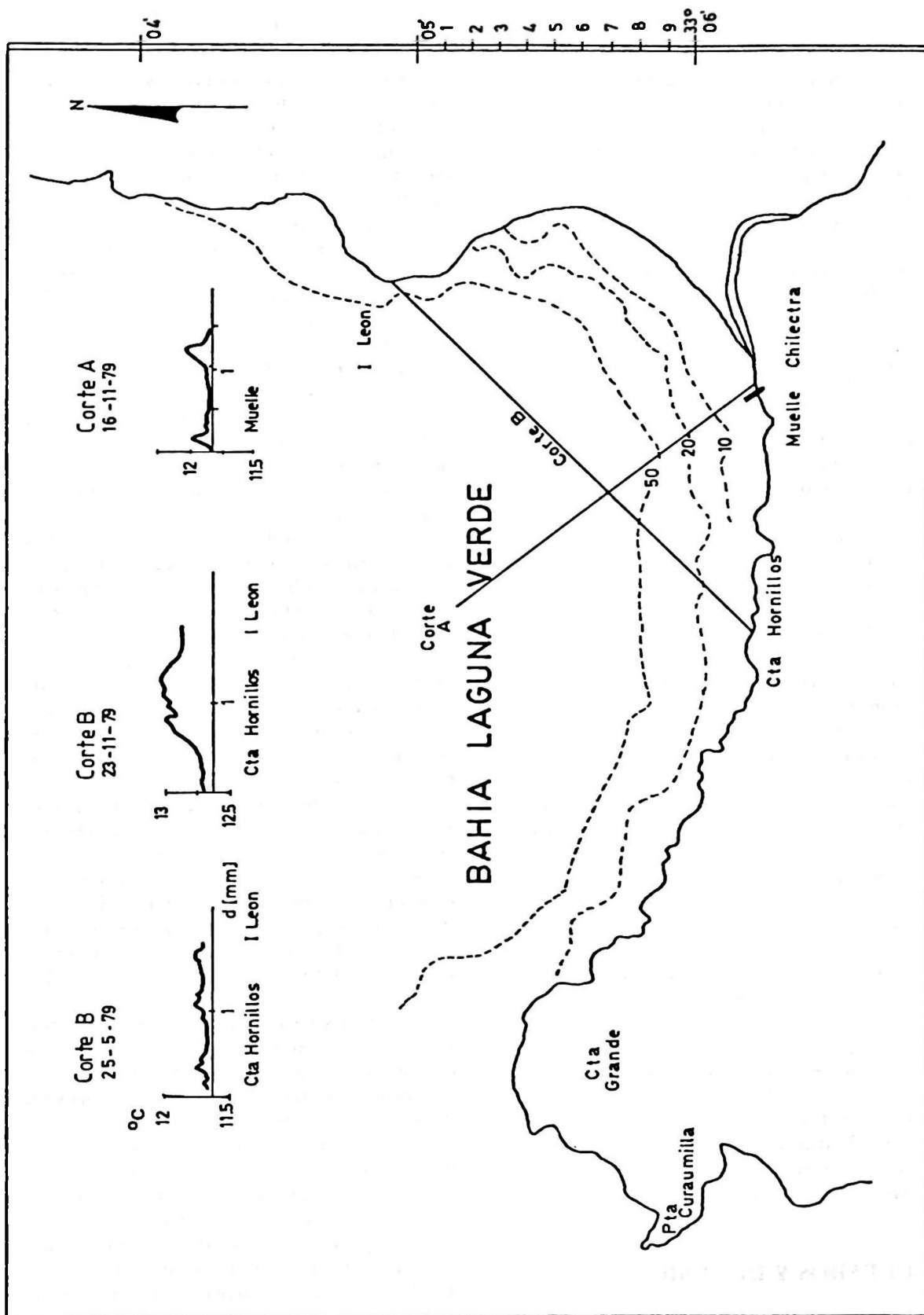


Figura 2. Registros superficiales de temperatura obtenidos con un termógrafo de arrastre en los cortes A y B, entre caleta Hornillos e islote León.

veces cada estación con un intervalo de 8 horas, aproximadamente.

El método de análisis de esta información térmica incluye la descripción temporal de los gradientes térmicos horizontales y verticales en el tiempo, y la aplicación de un modelo simple para ponderar el balance térmico en la bahía. Sólo algunos términos en la ecuación de conservación del calor fueron considerados. Usando notación indicial, la ecuación que describe el campo térmico (Csanady, 1982) es:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_i} (\mu_i T) = - \frac{\partial}{\partial X_i} \left(\frac{q_i}{\rho c_p} \right) \quad (1)$$

donde se definen:

- T : la temperatura
- X_i, μ_i : Coordenada espacial, velocidad en la coordenada.
- q_i : Flujo calórico, incluye flujo por radiación y otros, entre ellos el flujo del tipo Reynolds, $\rho c_p, \mu_i, T'$.
- ρ : Densidad del agua.
- c_p : Calor específico.

El término de la derecha, flujo divergente de calor, muchas veces no es considerado, dependiendo esto de la escala temporal de análisis y de la zona en estudio. Sin embargo, no es despreciable en días calmos de intensa radiación solar cuanto $\Delta T > 1^\circ\text{C}$ son obtenidos en un lapso de 3 horas. Esta radiación solar (q_s) ha sido considerada como condición frontera tal que,

$$q_s = q_s.$$

Si se excluye el término de divergencia de calor, la ecuación puede escribirse como:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_i} (\mu_i T) = 0$$

donde se plantea la conservación de la temperatura, la que es modificada sólo por advección. Una ecuación similar se usa en el análisis de la salinidad.

RESULTADOS Y DISCUSION

Las variaciones térmicas superficiales en el interior de la bahía observadas en 1979 (Fig. 2) muestran valores $< 0,4^\circ\text{C}$, excepto el día 21 de noviembre de 1979. Estas medicio-

nes no incluyen los efectos de la radiación solar. En diciembre de 1980 los cambios térmicos superficiales observados, con un intervalo de tiempo de cuatro horas, en las estaciones 1 - 4, 2 - 5 (Figs. 4a, 4b), muestran que el término flujo neto de calor es importante en esta época del año (Csanady, 1982). En agosto de 1981 no hay variaciones superficiales significativas (Figs. 4e, 4f).

En las distintas estaciones del año, se verificaron diferencias en el gradiente vertical en la boca de la bahía, observándose (Fig. 6) los cambios más intensos en los primeros 50 m. Este comportamiento ya había sido mostrado con anterioridad por Alarcón y Pineda (1969), en la estación ubicada en la boca de la bahía. En estaciones frente a punta Curau-milla la variación estacional había sido descrita por Sievers y Silva (1979) y afecta principalmente los 40 m superficiales en la estación más costera.

Si se comparan las estaciones efectuadas al interior de la bahía y aquéllas en la boca misma, es posible observar bajo ciertas condiciones, comportamientos diferentes entre ellas. Las secciones transversales del 06 al 15 de mayo (Figs. 3c y 3d) muestran gradientes verticales suaves en el exterior de la bahía y mayores en su interior, lo que estaría señalando el aislamiento parcial de las aguas en la región interior. Esta es afectada por los vientos del norte (Tabla 2 y Fig. 7) observándose un aumento de la mezcla y advección. Así se produce la homogenización de las aguas superficiales, el hundimiento de la termoclina, el aumento de la capa de mezcla, y la variación en el sistema de circulación. En agosto de 1981 los gradientes verticales en el interior de la bahía son despreciables, encontrándose la termoclina más afuera de la misma.

Esto muestra que la bahía no está totalmente aislada de las condiciones oceánicas y que se necesitan ciertos factores para que el comportamiento de las aguas interiores pueda ser modificado.

Considerando las isotermas de las estaciones 4 y 9 (Figs. 8a y 8b), se observa que su profundidad cambia con el tiempo. Esto indicaría la presencia de ondas internas, cuyo período parece ser distinto al semidiurno, la componente de marea dominante (Fonseca, 1981); sin embargo, no es posible determinar las características de la onda (período, longitud de onda, amplitud, dirección de propagación) sólo con estas observaciones.

Inversiones térmicas han sido observadas

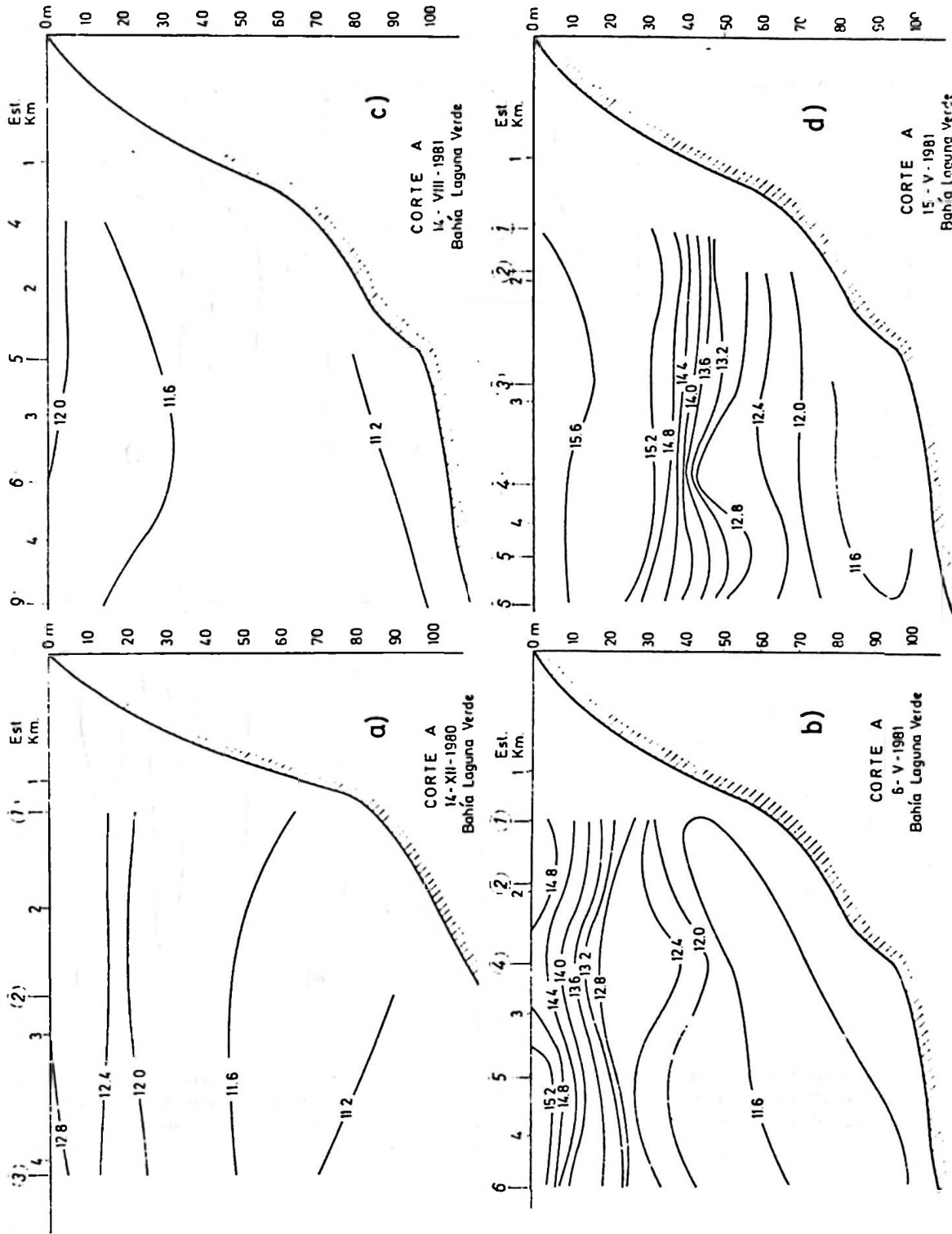


Figura 3. Sección transversal de temperaturas obtenidas con BT en el corte A (BW), los días: a) 14 de diciembre de 1980, b) 06 de mayo de 1981, c) 14 de agosto de 1981, d) 15 de mayo de 1981. (Tomado de Moraga y Gómez, 1985).

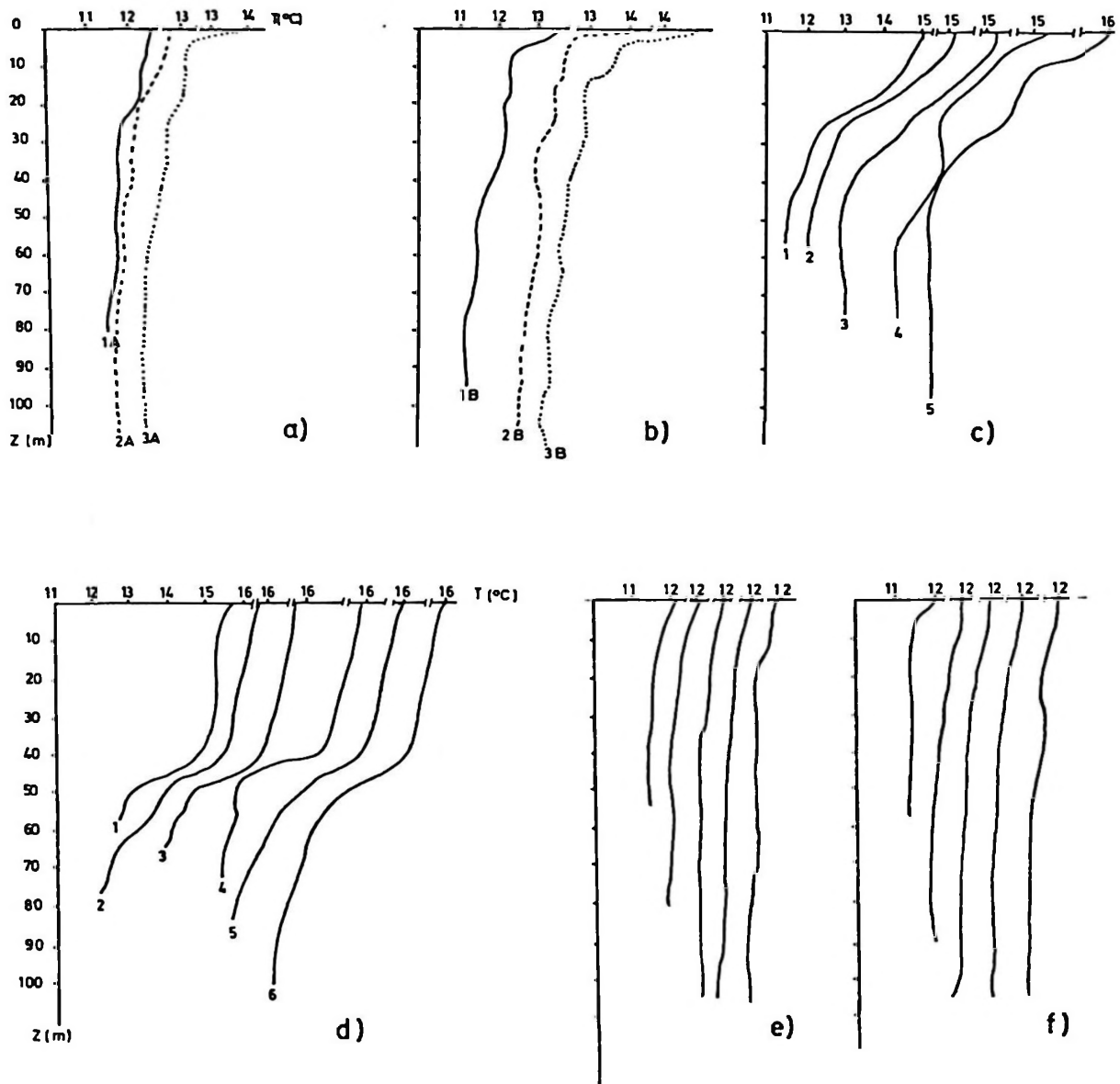


Figura 4. Conjunto de perfiles de temperatura respecto a profundidad tomados en el corte A a los días: a) 14 de diciembre de 1980 a las 13.00 horas, b) 14 de diciembre de 1980 a las 17.30 horas, c) 06 de mayo de 1981 a las 16.00 horas, d) 15 de mayo de 1981 a las 16.00 horas, e) 14 de agosto de 1981 a las 17.00 horas, f) 15 de agosto de 1981 a las 11.00 horas.

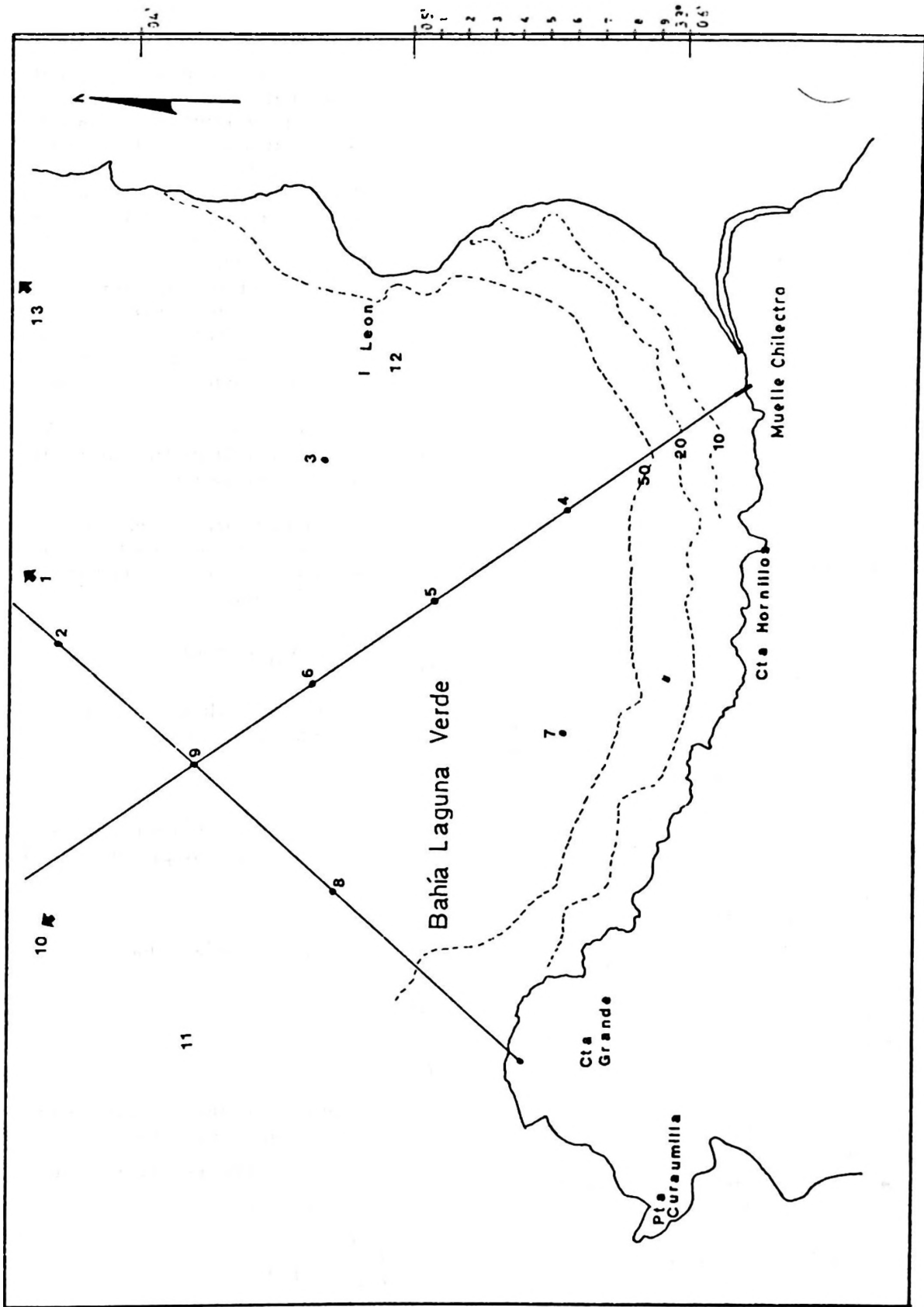


Figura 5. Red de estaciones efectuadas los días 14 y 15 de agosto de 1981.

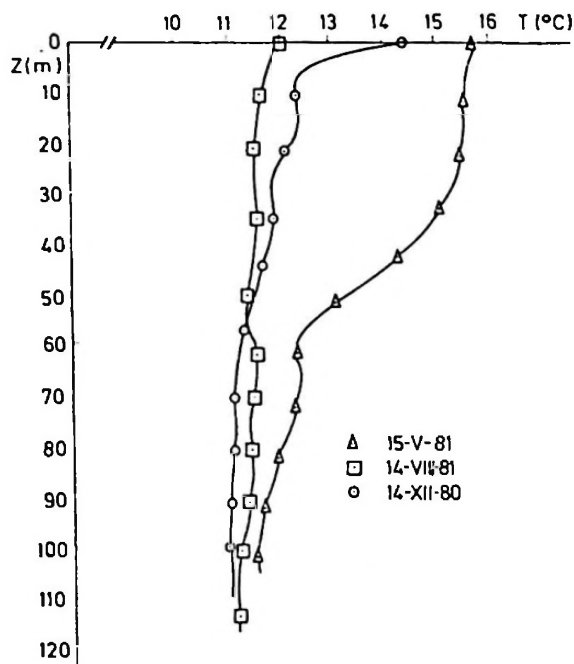


Figura 6. Perfiles verticales de temperatura registrados con BT en la boca de la bahía. (Tomado de Moraga y Gómez, 1985).

en agosto de 1981 (Est. 8B, 10A, 10C en Tabla 1 y Fig. 8c). Estas inversiones han sido detectadas con anterioridad por Sievers y Silva (1979, Fig. 2), sin dar una explicación sobre su causa. Fonseca (1984) asocia estas inversiones a la surgencia en esta zona, pero dada la proximidad a la costa de estas anomalías, parecería que no pueden incluirse en esa explicación, ya que los vientos predominantes en invierno son del norte o calmos, como en este muestreo (Fig. 7). Observaciones con BT efectuadas en la bahía de Valparaíso, vecina a la de Laguna Verde (24, 25 y 26 de septiembre de 1985), por Andrade *et al.* (1985), muestran inversiones en la boca de la bahía entre los 50 - 80 m de profundidad. La radiación solar no influye en profundidades medias.

Tabla 1
Algunas inversiones térmicas
observadas los días 14 y 15 de agosto
de 1981

Estación	Profundidad	ΔT
8B	35-50 m	0,3°C
10A	18-50 m	0,3
10C	10-50 m	0,6

Se debe considerar que el incremento de temperatura con la profundidad implica la inestabilidad del campo de masa por la disminución de la densidad, salvo que vaya acompañada por un aumento compensatorio de la salinidad. Esta última variable no fue incluida en este trabajo; sin embargo, los cambios de densidad causados por la salinidad son mínimos en el rango de variación detectados en el área (Moraga, 1978, Sievers y Silva, 1979). Esta bahía es, además, profunda y abierta al norte. Los gradientes térmicos positivos y negativos, en las inversiones, son inestables energéticamente, pues inducen la conducción y difusión del calor, lo que explica el desaparecimiento temporal de la inversión.

Descartando causas sólo va quedando la posibilidad de una onda interna que afecta la costa y cuyas características son aún desconocidas.

Para explicar comparativamente los perfiles de temperatura de los días 06 y 15 de mayo (Figs. 4c y 4d), se aplica la ecuación (2) en forma simplificada:

$$\frac{\delta T}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta X_H} (V_H T) = 0$$

donde X_H : Coordenada horizontal.
y V_H : Velocidad horizontal.

El término $\frac{\delta T}{\delta t}$

se calcula como el cambio temporal de la temperatura verticalmente promediada, definida por

$$\bar{T} = \frac{1}{Z} \int_0^z T dz \text{ para cada fecha}$$

Entonces

$$\frac{\delta \bar{T}}{\delta t}$$

indica el cambio de energía térmica entre ambas fechas, lo que es equivalente a considerar $\frac{\delta \bar{H}}{\delta t}$ donde \bar{H} es la energía calórica de la columna de agua, con

$$\bar{H} = \frac{1}{Z} \int_0^z \rho C_p T dz$$

Si hay un aumento de la capa de mezcla por hundimiento de la termoclina se produ-

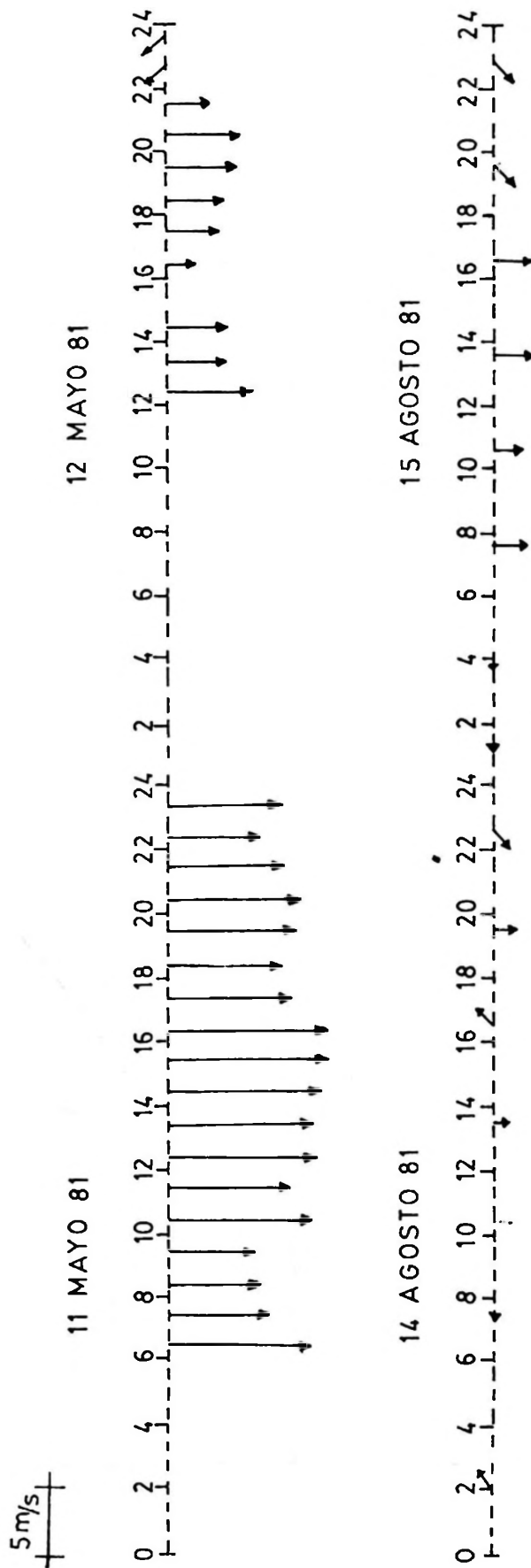


Figura 7. Promedios horarios de la velocidad del viento en los días: a) 11 y 12 de mayo de 1981, obtenidos de registro continuo, en el muelle Chilectra, b) 14 y 15 de agosto de 1981, obtenidos como lectura discreta en el faro Punta Angeles.

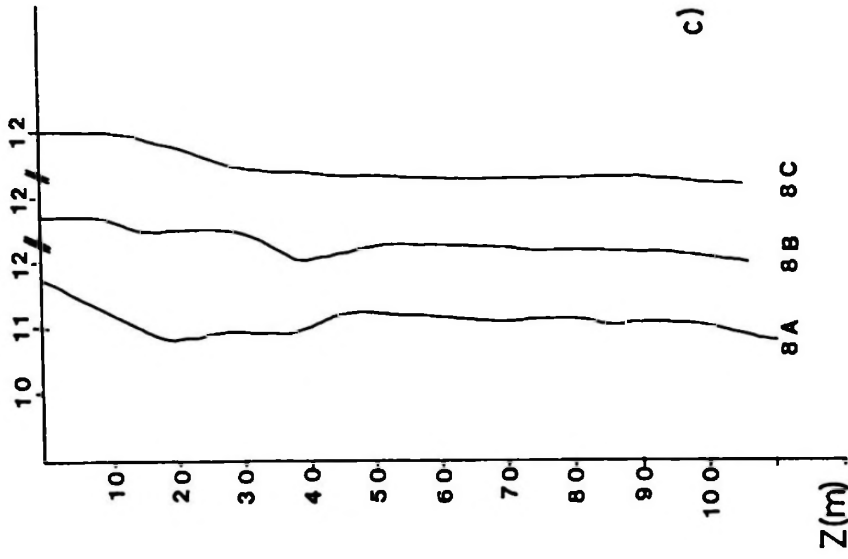
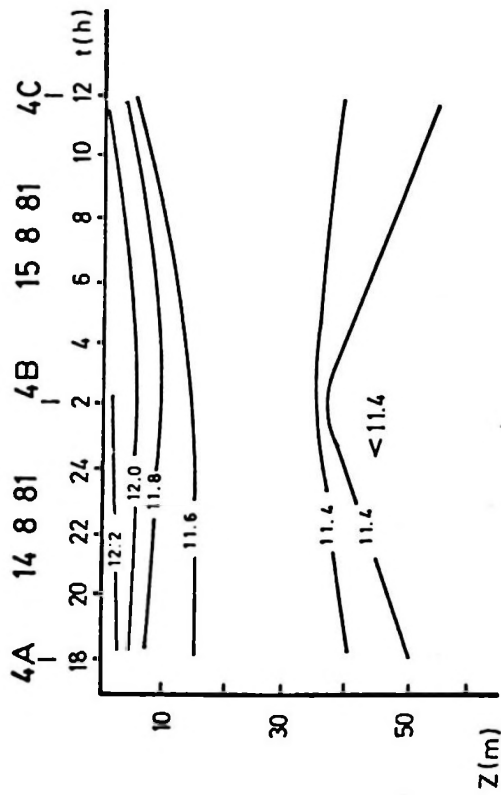
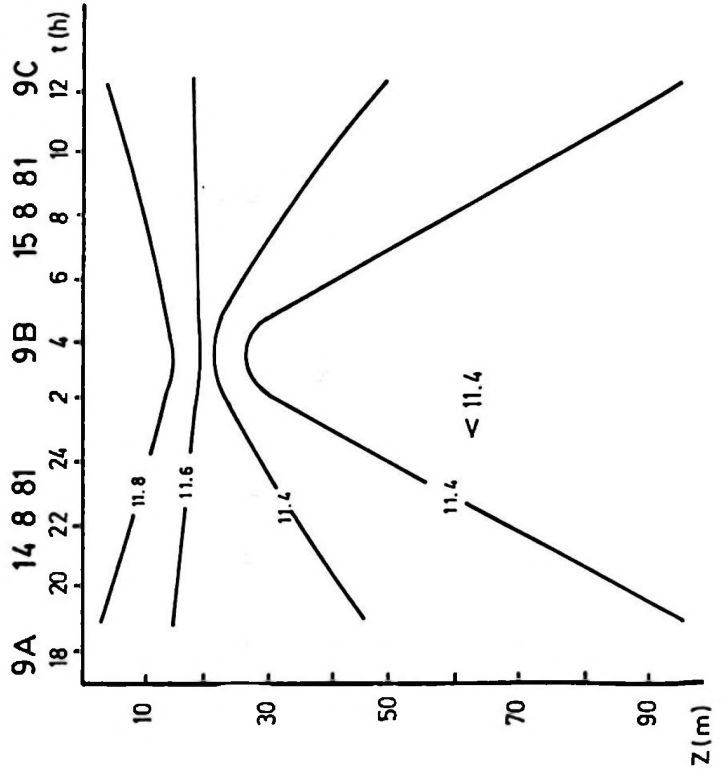


Figura 8. Variaciones temporales de las isotermas de los días 14 y 15 de agosto de 1981: a) Estación 4, b) Estación 9. En c) se muestran variaciones de los perfiles verticales de temperatura en la estación 8.



a)



b)

ce un incremento de la energía que, en este caso, es de tipo advectivo. Entonces, este cambio local es explicado por la entrada de agua más cálida a la bahía (Moraga y Gómez, 1985). Aguas de mayor temperatura, que están presentes en el área en mar abierto, son arrastradas al interior por los vientos norte de los días anteriores al 15 de mayo (Tabla 2).

En agosto de 1981, el término $\frac{\delta \bar{T}}{\delta t}$ es nulo, según se observa en las figuras (4e y 4f). Una estimación más precisa de los cambios locales no se justifica, dado el método utilizado en este trabajo.

Tabla 2
Vientos en el muelle de Chilectra,
mayo de 1981

Día	Magnitud media m/s	Dirección dominante
05	1,9	S
06	3,0	N
07	7,2	N
08	3,2	S
09	1,9	SE
10	3,9	N
11	10,2	N
12	4,5	N
13	3,0	SE
14	2,8	SE
15	2,5	SE

CONCLUSIONES

Las condiciones térmicas de la bahía Laguna Verde cambian estacionalmente y en períodos más cortos, lo cual condiciona el método de muestreo.

Las condiciones normales son de alta variabilidad, pues la bahía no es un medio estacionario ni estable. Las aguas interiores de la bahía son modificadas por la entrada de aguas oceánicas bajo ciertas condiciones como vientos del norte, y surgencia en punta Curaumilla.

La aplicación de la Ecuación del Balance Térmico en la bahía permite apreciar la diferente implicancia que tienen los términos en el tiempo, ya sea estacionalmente como en períodos más cortos.

Cambios verticales en la ubicación de las isotermas en el tiempo indican la presencia

de ondas internas. Además, es importante estudiar las inversiones térmicas (y salinas) en áreas próximas a la costa como indicadores de ondas internas. Otras causas de estas inversiones, tales como aguas surgentes que se hundén, radiación solar, han sido descartadas en este trabajo.

Nota del autor

Las ondas internas han sido observadas por el autor en el interior de la bahía Herradura de Guayacán y a 2 millas de la costa, al sur de la bahía Herradura (Resúmenes de 6ª y 7ª Jornadas de Ciencias del Mar.

AGRADECIMIENTOS

Los datos utilizados en este trabajo son parte del Proyecto E 559-791 y E 850-812 del Servicio de Desarrollo Científico, Artístico y de Cooperación Internacional de la Universidad de Chile (1979 - 1980) y financiado en la etapa final por el Instituto de Matemáticas y Física de la Universidad de Valparaíso (1981). Se agradece encarecidamente este respaldo y la colaboración del personal del citado Instituto en la recolección de la información.

Además, se desea agradecer a un revisor anónimo sus valiosas sugerencias incluidas en esta versión final.

BIBLIOGRAFIA

- ALARCÓN, E. y J. PINEDA. 1969. Descripción Oceanográfica estacional de las aguas frente a Valparaíso. Bol. Cient., Inst. Pesq. Santiago, Chile. N° 11:31 pp.
- ANDRADE, H., J. MORAGA y E. ACUÑA. 1985. Proyecto UV 29/85. Informe de Avance. Universidad de Valparaíso.
- CSANADY, G.T. 1982. Circulation in the Coastal Ocean. D. Riedel, 279 p.
- FONSECA, T. 1981. Variabilidad de las Corrientes en la bahía de Valparaíso. Inv. Mar. 9 (1-2): 36-60.
- FONSECA, T. 1984. Inversión Térmica Costera y su relación con los eventos de surgencia. Biología Pesquera 13: 15-22.
- FONSECA, T. 1985. Física de las Aguas Costeras de la zona Central de Chile, TRALKA. Vol. 2, N° 4: 337-354.
- JOHNSON, D.R., T. FONSECA y H. SIEVERS. 1980. Upwelling in the Humboldt Coastal Current near Valparaíso, Chile. J. Mar. Res. Vol. 38: 1-16.
- MORAGA, J. 1978. Variación de la Temperatura, Salinidad, Altura dinámica y Altura estérica frente a la Costa de Chile. Tesis Esc. de Pesquerías y Alimento. Universidad Católica de Valparaíso. 68 p.
- MORAGA, J. y R. GÓMEZ. 1985. Estudio de la Circulación en la bahía Laguna Verde (33° 06' S; 71° 45' W). Manuscrito no publicado.
- SIEVERS, H. y N. SILVA. 1979. Variación Temporal de las Condiciones Oceanográficas frente a punta Curaumilla, Valparaíso, Chile (mayo 1974 - abril 1975). Inv. Mar. 7 (1): 3-20.

