

# INVERSION TERMICA COSTERA Y SU RELACION CON LOS EVENTOS DE SURGENCIA

## SUBSURFACE THERMAL INVERSION AND ITS RELATION WITH COASTAL UPWELLING

Tomás R. Fonseca\*

### RESUMEN

En este trabajo se busca una explicación física del origen y fluctuaciones de una inversión térmica costera. Para ello se analiza información batitermográfica recolectada en la costa de Valparaíso durante 8 años. Con esta información se calculan estadísticas simples y se emplean modelos de caja para el balance calórico a fin de estudiar este fenómeno.

La inversión térmica en la costa de Valparaíso se atribuye al hundimiento que experimenta el agua de surgencia en su trayectoria hacia el oeste. El hundimiento se produce debido a la mayor densidad del agua fría de surgencia y al arrastre hacia el oeste por el transporte Ekman.

Un modelo de capa simple para el balance de calor, muestra alguna evidencia de que el intercambio calórico con la atmósfera no sería suficiente para calentar el agua surgente. Esta evidencia respalda el mecanismo que relaciona la inversión térmica costera con los eventos de surgencia.

### ABSTRACT

The origin and fluctuations of a coastal thermal inversion is studied. A set of data from 8 years of bathythermograph observations, collected off Valparaíso (33°S), is used to calculate simple statistics and a preliminary heat balance within the inversion.

The thermal inversion is produced by the sinking water on its way to the west. The sinking is due to the higher density of the upwelled water.

A box model for the heat balance showed some evidence that the air-sea heat flux may not be enough to warm up the upwelled water, a fact that supports the proposed relationship between the thermal inversion and coastal upwelling.

### INTRODUCCION

Una inversión térmica ha sido observada en los primeros metros de la columna de agua en la costa de Valparaíso. En algunas ocasiones la curva de temperatura fue suavizada eliminando la inversión ya que se consideró que la inversión era sólo un error del instrumento. No obstante, más tarde, se comenzó a publicar este resultado en perfiles de temperatura (Silva, 1973).

El interés por el estudio de las inversiones térmicas costeras es netamente científico, puesto que ello permite ampliar los conocimientos que se tienen sobre la dinámica y termodinámica de la zona costera. Por ejemplo si la circulación perpendicular a la costa fuese como en un sistema de circulación de doble celda (Fonseca, 1977) sería de esperar que exista una inversión de temperatura a cierta distancia de la costa (Mooers y Smith, 1967).

Inversiones de temperatura han sido detectadas en la costa oriental del Pacífico Norte. En esa región se distinguen dos inversiones con características disímiles. Una de ellas es un fenómeno semipermanente que se encuentra a todo lo largo de la costa y sobre el quiebre de la plataforma continental y que corresponde a una advección de aguas frías de norte a sur. La otra inversión, es una anomalía cálida que está asociada directamente a la surgencia costera y es consecuencia del hundimiento de agua más salina que ha sido previamente calentada por el sol (Huyer y Smith, 1974).

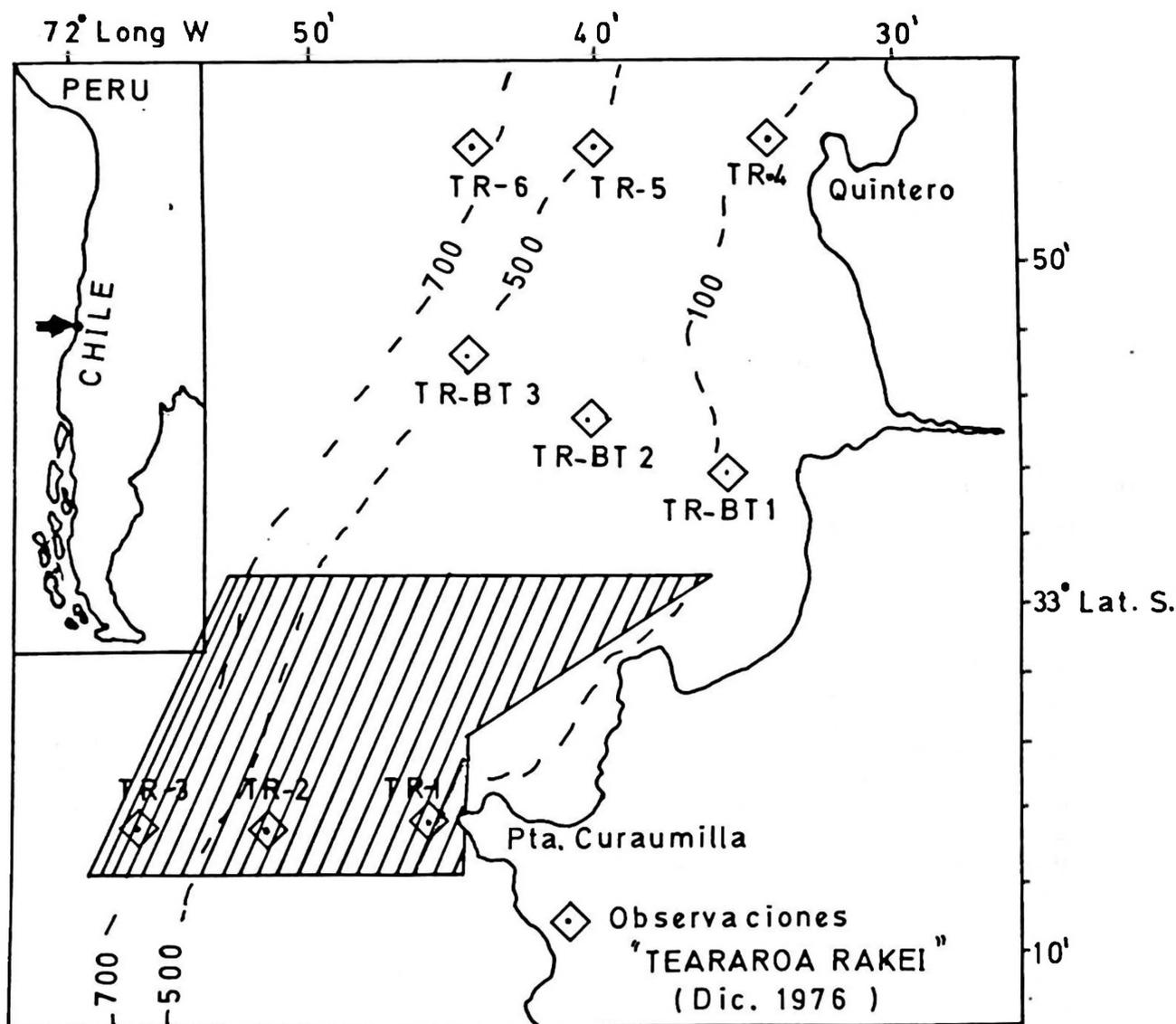
En este trabajo se utiliza la información disponible frente a la costa de Valparaíso, para estudiar las principales características de una inversión de temperatura. Se investiga si la inversión es una característica semipermanente o se relaciona con algún fenómeno oceanográfico esporádico.

\*Escuela de Ciencias del Mar, Universidad Católica de Valparaíso, Casilla 4059, Valparaíso, Chile.

### Fuentes de Información

Un total de 157 observaciones de temperatura obtenidas con batitermógrafo mecánico fueron revisadas, cubriéndose la columna de agua entre la superficie y los 272 m de profundidad. El periodo total de tiempo que se estudia va desde agosto de 1967 hasta diciembre de 1976. La mayor parte de las observaciones fueron hechas sobre la plataforma continental frente a Punta Curaumilla (Fig. 1). En la Tabla 1 se hace una referencia de los cruceros oceanográficos y de la primera publicación en que los datos fueron analizados y/o descritos.

Por otra parte, en diciembre de 1976 se efectuó una serie de cruceros a bordo del "Teararoa-Rakei", en la costa de Punta Curaumilla y de Quintero (Fig. 1). El objetivo de estos cruceros fue el de comparar las condiciones oceanográficas frente a Punta Curaumilla con las de Quintero y especialmente estudiar la inversión térmica. En esa oportunidad se realizaron 28 observaciones con batitermógrafo mecánico, lo que permitió ampliar la información disponible frente a esta costa.



**Figura 1.** Ubicación geográfica de las estaciones de batitermografía. Lo achurado corresponde al área en que se efectuaron las observaciones entre agosto 1967 y diciembre de 1976.

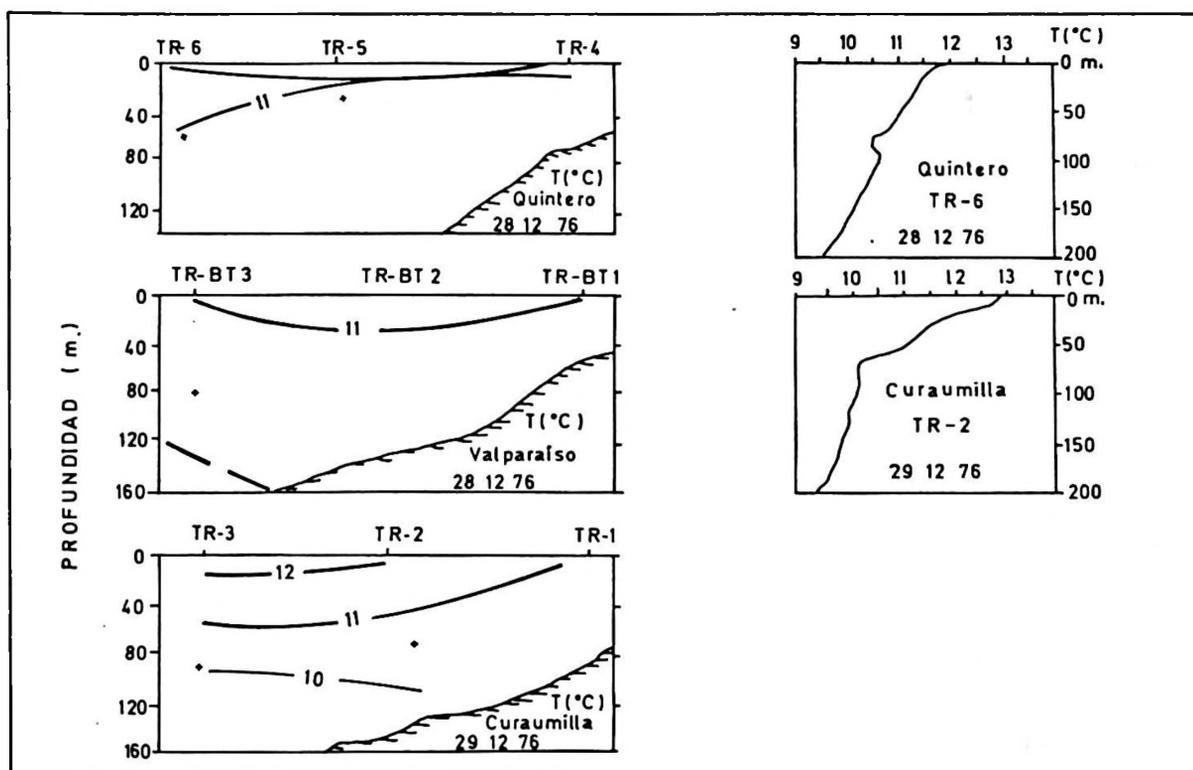
## RESULTADOS

**Observaciones Teararoa-Rakei:** Observaciones cuasi-sinópticas efectuadas frente a Quintero, Valparaíso y Punta Curaumilla permiten visualizar la magnitud de la inversión (Fig. 2). El fenómeno se presentó en Quintero, en Curaumilla y en la estación más occidental frente a la Bahía de Valparaíso; es decir la estación que está alineada con las de

Curaumilla. En ninguno de los casos se encontró inversión cerca de la costa, ésta solo apareció en las estaciones más oceánicas.

La profundidad en que apareció la inversión fluctuó entre 30 m y 100 m (Fig. 2) y en un plano que se inclina hacia el Oeste. Nótese, en la figura 2, que las isotermas de 11°C y 12°C están inclinadas hacia la superficie en la costa; indicando que las aguas superficiales son más frías en ese lugar.

**Figura 2.** Secciones de temperatura obtenidas desde el "B/I Teararoa Rakei". La inversión térmica se destaca como (+). Los perfiles de temperatura de la derecha muestran la magnitud de la inversión.



**TABLA 1**

### Información Batitermográfica reprocesada en este trabajo

B/E Tiberíades	Agosto - septiembre 1967	Interno U.C.V.*	No publicada.
B/O Explorador	Enero 1968 - abril 1969	Interno U.C.V.	Sievers y Silva (1973).
B/E Tiberíades 01-06	Septiembre 1969 - agosto 1970	CORFO** U.C.V.*	Silva (1973)
B/E Tiberíades 17-25	Septiembre 1970 - julio 1971	D.G.I. / U.C.V.***	No publicado.
B/E Tiberíades 26-39	Mayo 1974 - abril 1975	D.G.I. / U.C.V.***	Sievers y Silva (1979)
Teararoa-Rakei	Diciembre 1976 - enero 1977	D.G.I. / U.C.V.***	Este trabajo.

\* U.C.V.: Universidad Católica de Valparaíso.

\*\* CORFO: Corporación de Fomento a la Producción. República de Chile.

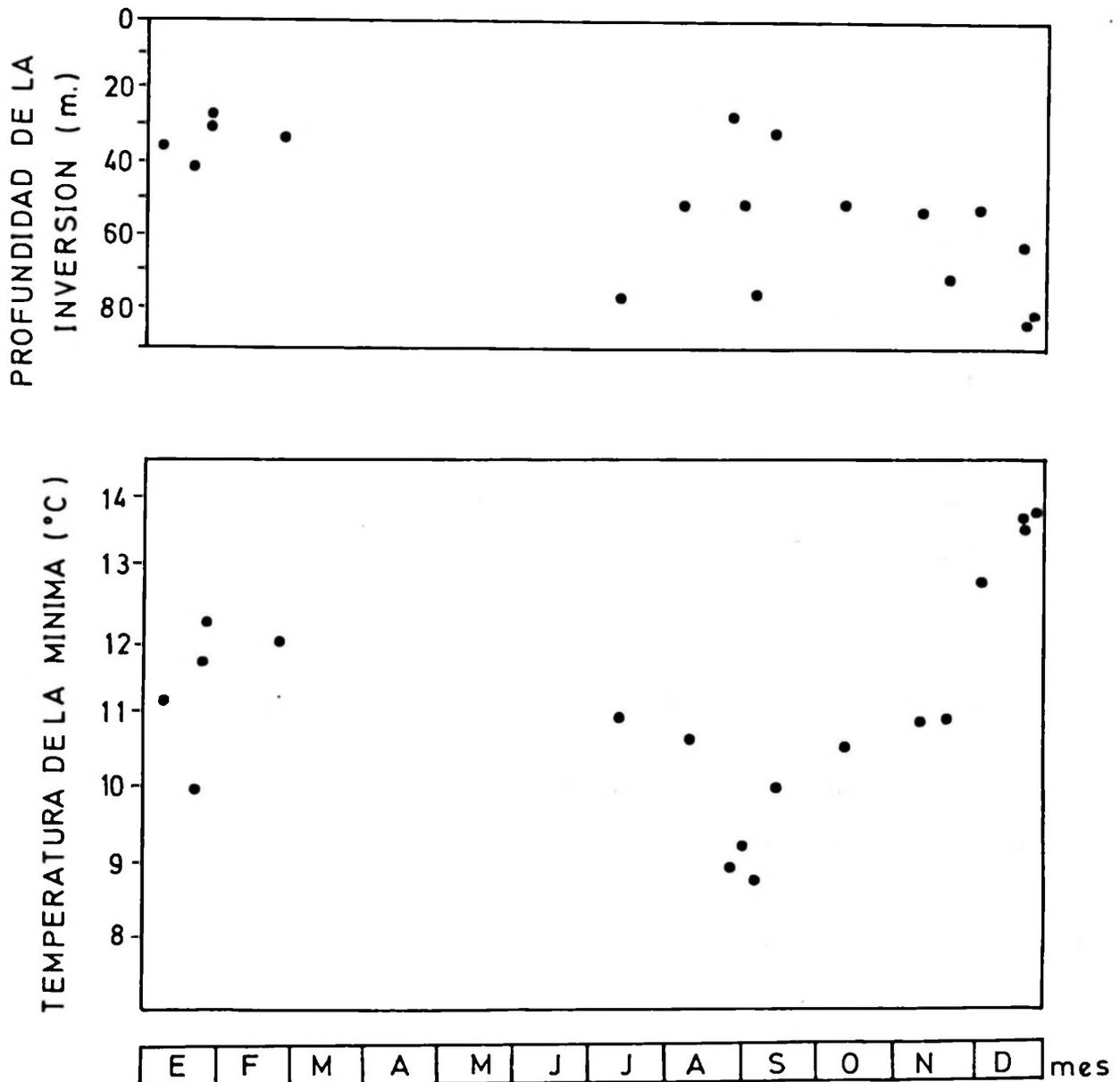
\*\*\* D.G.I.: Dirección General de Investigaciones de la Universidad Católica de Valparaíso.

**Datos históricos:** La información de batitermografía recolectada frente a la costa de P. Curaumilla permite reconocer a la inversión térmica como un fenómeno esporádico en esta zona (Fig. 3). De un total de 157 observaciones de temperatura, distribuidas a lo largo de 8 años, apareció con claridad en 18 oportunidades (11%).

La profundidad de la mínima de temperatura fluctuó entre los 26 m y los 82 m (Fig. 3), siendo en promedio de 49 m (D.S.  $\pm$  18 m).

La temperatura de la mínima fluctuó entre 8.8°C y 13.8°C siendo su media de 11.1°C (D.S. =  $\pm$  1.5°C). Los valores más altos de temperatura en la inversión aparecen en diciembre.

Un análisis de frecuencia de aparición de esta anomalía, indicó que es más frecuente en los meses de noviembre, diciembre y enero que en el resto del año (Fig. 4). En estos meses su porcentaje de ocurrencia, respecto del total de observaciones en el mes, supera el 50%.



**Figura 3.** Fluctuación anual de la temperatura y profundidad de la inversión. Los datos fueron tomados entre agosto 1967 y diciembre 1976.

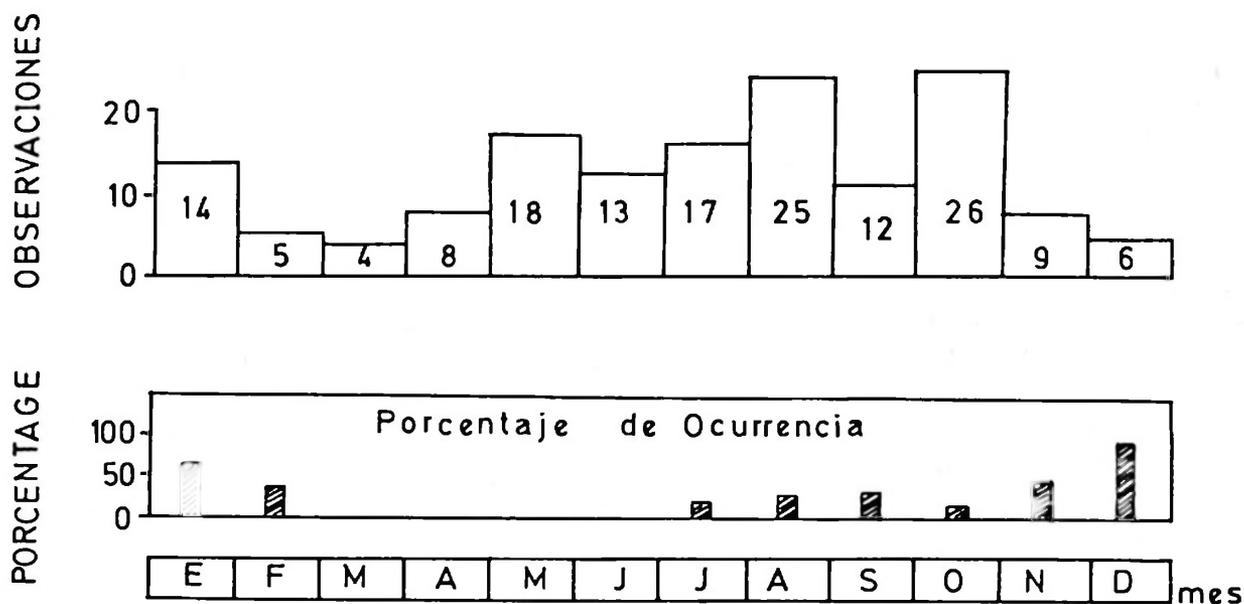


Figura 4. Relación temporal entre observaciones de BT y ocurrencia de la inversión.

#### DISCUSION

Lo primero que se constató, en este trabajo, es que la inversión térmica costera no es un fenómeno semi-permanente y por lo tanto no estaría relacionado a cambios anuales o estacionales en el campo de masa en la zona. En el caso de P. Curaumilla, la inversión estuvo presente solo en un 11% de las observaciones de BT. Sin embargo, en noviembre, diciembre y enero su frecuencia de aparición es igual o superior al 50% de las observaciones lo que lleva a pensar que la inversión estaría relacionada con algún fenómeno oceanográfico que sea más frecuente en esos meses.

Los procesos que en la zona son más frecuentes, entre septiembre y diciembre son los eventos de surgencia costera (Fonseca, 1982). Aun en enero se advierten condiciones de surgencia (Sievers y Silva, 1979). Se observa entonces que la inversión térmica está presente con mayor frecuencia en los meses de surgencia y también se presenta en la forma de eventos.

Para estudiar una posible relación entre la inversión térmica y la surgencia costera, se deben considerar algunos hechos interesantes. La inversión térmica se hace más profunda hacia el Oeste (Fig. 2), aparece de la mitad de la plataforma alejándose de la costa (no en la costa misma) y es más frecuente en los meses de surgencia. Con esta información se puede proponer un mecanismo de forma-

ción. Esto es, agua fría y salina asciende desde el fondo de la capa Ekman hacia la superficie debido a la surgencia y en la zona adyacente a la costa se mezcla con el agua que antes ocupó el estrato superior, disminuyendo así su salinidad. Luego es arrastrada hacia el oeste por el transporte Ekman y cuando se aproxima a aguas más cálidas, y por lo tanto menos densas, se hundiría hasta ubicarse sobre aguas que, aunque levemente más cálidas, son también más salinas y por lo tanto más densas.

Las inversiones de temperatura en otras zonas del Pacífico han sido relacionadas con una circulación de doble celda durante la surgencia (Mooers y Smith, 1967). Ese tipo de circulación, ha sido propuesta para P. Curaumilla por Johnson *et al* (1980) idea que es reforzada por las nuevas evidencias sobre una inversión térmica fría presentadas en este trabajo. En efecto, el valor de 11°C en la inversión y su correspondiente valor de sigma-t del orden de 26.3 (Fisher *et al*, 1979) coinciden con valores de la densidad en la zona de hundimiento de una celda superior de circulación, estudiada en diciembre de 1975 (Fonseca, 1977).

Por otra parte, a diferencia del caso de la costa oriental del Pacífico Norte, el calentamiento solar pareciera no tener un rol importante en la inversión. Para estudiar esta situación se utiliza un modelo de caja para el balance de calor. Modelos de este tipo permiten tener una idea aproximada sobre la termodinámica del fenómeno (Friehe and Schmitt, 1976; Stevenson, 1982).

Supóngase que una caja como la de la figura 5, representa la capa de Ekman, limitada zonalmente por la costa y por el radio de deformación de Rossby (Yoshida, 1955). Las ecuaciones para el balance de calor se indican en la figura 5, la primera representa el calor acumulado en la caja, la segunda ecuación representa la relación entre el calor latente de evaporación y el calor liberado por simple conducción a la atmósfera y la tercera ecuación es la razón de cambio, en el tiempo, del contenido calórico del cuerpo. Para evaluar los términos de las ecuaciones se consideraron los valores de la Tabla 2.

Además de las ecuaciones de la figura 5, se debe considerar una expresión para la cantidad de calor transportado verticalmente por la surgencia hacia la base de la capa Ekman. Esta es:

$$Q_v = \rho C_p w \Delta z (\Delta T / \Delta z) \quad (4)$$

El valor estimado para (4) es:  $Q_v = 3.750$  (cal/cm<sup>2</sup> - día). Por otra parte el calor acumulado (o perdido) por toda la caja, en el tiempo, está dado por (3). De esta última ecuación se puede despejar ( $\Delta T / \Delta t$ ) y llegar a:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{1}{\rho C_p Z} (Q_s + Q_b + Q_E (1+R) + Q) \quad (5)$$

substituyendo (4) y evaluando se tiene:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = 0.06 \quad -0,75 \text{ (}^\circ\text{C/día)}$$

(Int. Aire-Mar) surgencia

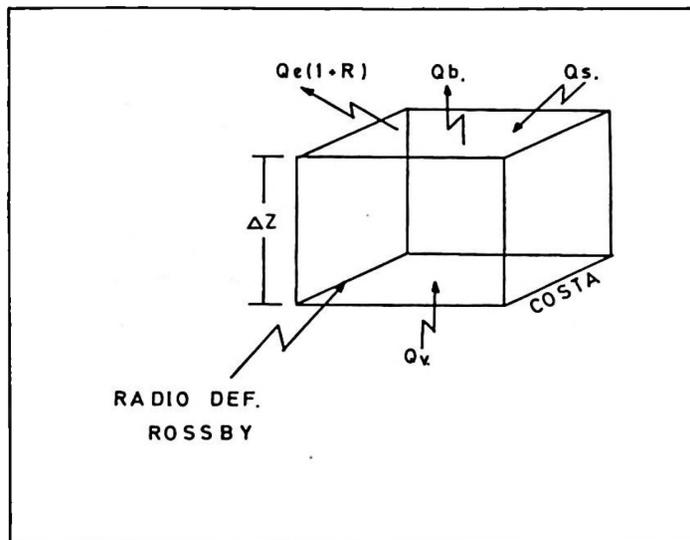
En lo anterior se observa que la temperatura disminuye en 0.7°C por día, lo que según el modelo se debería a la surgencia. Sin incluir la advección horizontal de calor, la que en este caso particular también aportaría aguas frías. Aquí no se considera la advección horizontal por el escaso conocimiento que se tiene del gradiente horizontal de temperatura ( $dT/dy$ ). Sin embargo del cálculo simple efectuado se puede observar que la atmósfera no jugaría un rol muy importante en la termodinámica de la inversión en esta zona como es el caso de la costa oeste de Norteamérica (Huyer y Smith, 1974). Nótese también que una baja de 0.7°C/día, indicada por el modelo bidimensional, es concordante con valores observados en investigaciones anteriores. En efecto, en diciembre de 1975, la temperatura superficial disminuyó 0.4°C/día durante un evento moderado de surgencia (Fonseca, 1977).

El mecanismo propuesto, que relaciona la formación de la inversión térmica con la surgencia, parece ser en esencia correcto y es un ejemplo más de la complejidad de la circulación y la termodinámica de la surgencia costera. Complejidad que también afecta a los organismos marinos. Antecedentes biológi-

TABLA 2

Valores de los términos involucrados en el modelo de caja para el balance de calor

Término	Significado	Valor a usar	Fuente
$Q_s$	Radiación solar directa o difusa	500 cal/cm <sup>2</sup> día	Reyes y Romero (1977). Valor de verano en Valparaíso.
$Q_b$	Radiación de retorno (onda larga)	-125 cal/cm <sup>2</sup> día	Valor promedio (Sverdrup <i>et al</i> 1942).
$Q_E$	Calor latente de evaporación.	-150 cal/cm <sup>2</sup> día	Suponiendo que se evaporan 111 cm/año.
R	Relación de Bower entre el calor latente ( $Q_E/0$ ) y el calor sensible ( $Q_h$ ).	0.3	Valor aproximado para 30°S (Sverdrup <i>et al</i> 1942).
$Q_v$	Calor adveccionado verticalmente por la surgencia.	—	Ver texto.
$\rho$	Densidad.	1 gr/cm <sup>3</sup>	—
$C_p$	Calor específico del agua.	1 cal/gr - °C	—
$A_z$	Espesor de la capa Ekman.	50 m	Fonseca (1977)
W	Velocidad vertical de surgencia	2.500 cm/día	Mínimo en P. Curaumilla.
AT/AZ	Gradiente vertical de temperatura.	3"/100 m	Fonseca (1977).



1.)  $Q_a = Q_s + Q_b + Q_e(1 + R) + Q_v$

2.)  $R = \frac{Q_e}{Q_h}$

3.)  $Q = \frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{PC(\Delta T)\Delta Z}{P(\Delta t)}$

Figura 5. Modelo de caja para el balance de calor. Se indican las principales ecuaciones utilizadas.

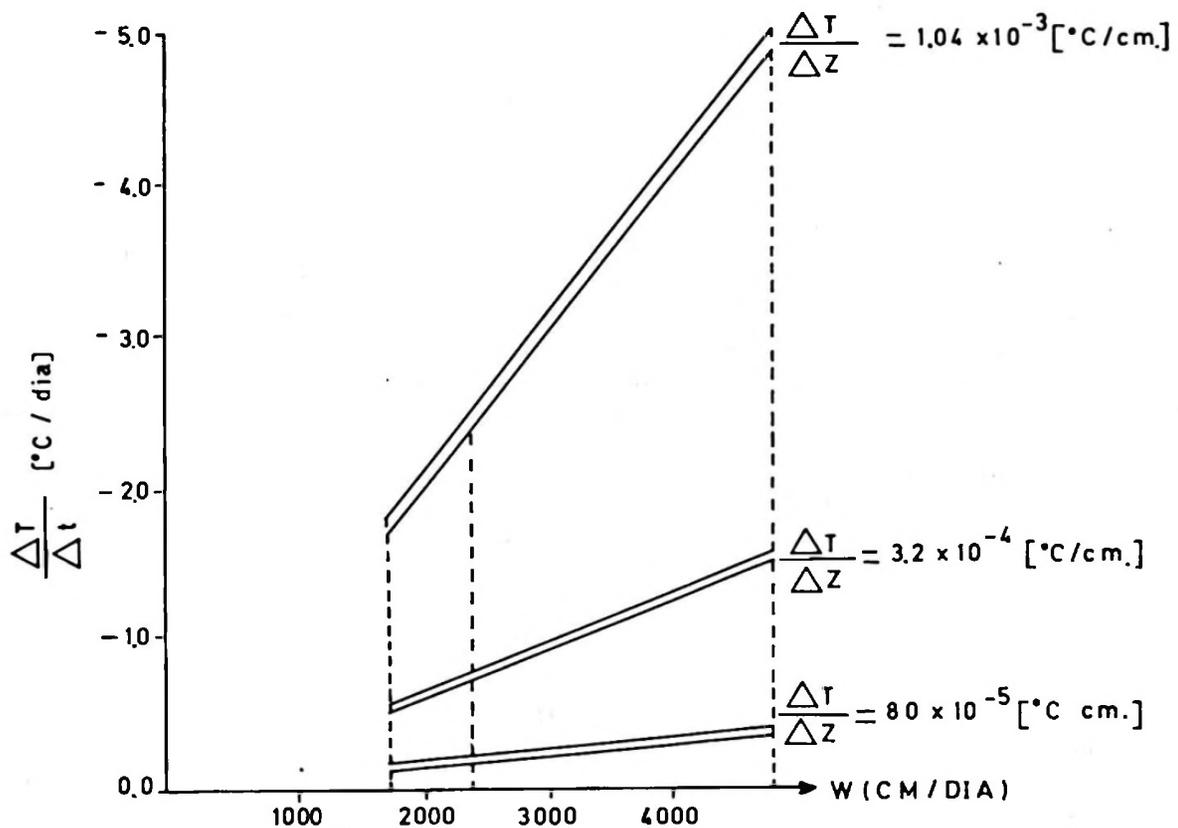


Figura A1. Cambio diario de la temperatura en la costa en función de la velocidad vertical y del gradiente vertical de temperatura. Por cada  $\Delta T/\Delta Z$  la línea superior corresponde a una capa de mezcla de 20 m y la inferior a una de 100 m de espesor.

cos indican que las comunidades fitoplanctónicas, también son afectadas por el hundimiento hacia el oeste (Uribe, 1978). Esto abre una interesante perspectiva para los estudios de la dinámica de la surgencia y su relación con la distribución esperada de organismos marinos de los primeros eslabones tróficos.

## APENDICE

El modelo de caja para el balance de calor indicó que el enfriamiento superficial durante la surgencia es, en términos generales, de  $0.7^{\circ}\text{C}/\text{día}$ . Se observó también que la temperatura superficial no depende mucho del intercambio calórico con la atmósfera, sino más bien, de  $Q_v$  (ec. 3) —es decir— de la advección vertical de agua fría. Ahora bien, se puede pensar que los resultados con este modelo dependen mucho de los valores elegidos para cada variable (Tabla 2). En consecuencia y para generalizar resultados se probó, por medio de análisis de sensibilidad, la efectividad del modelo. Para ello se revisaron distintos grados de estratificación, espesor de la capa de mezcla y velocidad de surgencia y se observó los valores que se obtienen para  $dT/dt$ .

La estratificación vertical —producto de  $dT/dz$ — es la variable más influyente en los valores de  $dT/dt$  (Fig. A1). También se observa que a mayor velocidad de surgencia hay un aumento lineal en el enfriamiento superficial. Por otra parte, el espesor de la capa Ekman no tiene mayor influencia en los valores de  $dT/dt$ .

Enfriamientos mayores que  $2^{\circ}\text{C}/\text{día}$  no han sido observados en P. Curaumilla durante eventos de surgencia. Parece ser entonces que para valores de  $dT/dz$  superiores a  $5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  en pleno verano, ya no existirían las condiciones de viento favorables a la surgencia o bien este fenómeno alcanzaría un estado estacionario.

Por lo observado en P. Curaumilla — $0.7^{\circ}\text{C}/\text{día}$  es un valor razonable para  $dT/dt$  y la selección de valores de la Tabla 2 parece también ser razonable. Otros valores para las variables de intercambio calórico con la atmósfera no producirían mayores cambios en los resultados, lo mismo ocurriría con otros valores de  $w$ . Solamente valores extremos de  $dT/dz$ , darían un valor  $dT/dt$  muy grande; valores que no han sido observados en P. Curaumilla.

## REFERENCIAS

- FISHER, H., E. LIST, J. IMBERGER y N. BROOKS. 1979. *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press. New York: 481 pp.
- FONSECA, T.R. 1977. Proceso de surgencia en Punta Curaumilla con especial referencia a la circulación. Tesis Esc. de Pesquerías y Alimentos. U.C.V., 90 pp.
- FONSECA, T. 1982. Física de las aguas costeras de la zona central de Chile (manuscrito en preparación).
- FRIEHE, C.A. and K.F. SCHMITT. 1976. Parameterization of air-sea interface fluxes of sensible heat and moisture by the bulk aerodynamic formulas. *J. Phys. Oceanogr.*, 6, 801-809.
- HYER, J. y R. SMITH. 1974. A subsurface ribbon of cool water over the continental shelf off Oregon. *J. Phy. Oceanogr.*, 4(3): 381-391.
- JOHNSON, D.R., T. FONSECA y H. SIEVERS. 1980. Upwelling in the Humboldt coastal current near Valparaíso, Chile. *J. Mar. Res.*, 38(1): 1-16.
- MOOERS, C.N.K. y R. SMITH. 1967. Dynamical structure in an upwelling Frontal Zone. *Trans. Amer. Geophysical Union*, 48(1): 125-126.
- REYES, E. y H. ROMERO. 1977. Climatología e Interacción Océano-atmósfera en la bahía de Valparaíso. *Rev. de Biol. Mar.*, 16(2): 125-161.
- SIEVERS C., H.A. y N. SILVA S. 1973. Variaciones estacionales de Temperatura, Salinidad y Contenido de Oxígeno frente a la bahía de Valparaíso (mayo de 1968 - abril de 1969). *Inv. Mar.*, 4(1): 1-16.
- SIEVERS, H. y N. SILVA. 1979. Variación temporal de las condiciones oceanográficas frente a Punta Curaumilla, Valparaíso, Chile (mayo de 1974 - abril de 1975). *Inv. Mar.*, 7(1): 3-20.
- SILVA S., NÉLSON. 1973. Variaciones estacionales de Temperatura, Salinidad y Contenido de Oxígeno en la zona costera de Valparaíso (septiembre de 1969 - agosto de 1970). *Inv. Mar.*, 4(3): 89-112.
- STEVENSON, J.W. 1982. Computation of heat and momentum fluxes at the sea surface during the Hawaii-Tahiti Shuttle Experiment. Hawaii Inst. Geophys. Rep. N° HIG-82, 812 pp.
- SVERDRUP, H.U., M.W. JOHNSON, R.H. FLEMING. 1942. *The Oceans* Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs N.J. 1.060 pp.
- URIBE, E.T. Estudio de las comunidades fitoplanctónicas durante un proceso de surgencia frente a P. Curaumilla. Valparaíso. Tesis Inst. Ciencias Básicas. Depto. de Biología U.C.V., 65 pp.
- YOSHIDA, K. 1967. Circulation in the Eastern Tropical Ocean with special references to upwelling on undercurrent. *Jap. J. Geophys.*, 4(2): 1-75.

## AGRADECIMIENTOS

*Este trabajo fue financiado por la Escuela de Ciencias del Mar y por el proyecto DGI 223-771/83 de la Universidad Católica de Valparaíso. El autor agradece al Sr. Nelson Silva por proporcionar la información batitermográfica.*