

CAPAS CONVECTIVAS EN POZAS SOLARES

Graciela Lesino, Josefina Mangussi, Alicia Ronco y Luis Saravia*
Grupo de Energía Solar, Departamento de Ciencias Exactas
Universidad Nacional de Salta - 4.400 Salta, Argentina.

Resumen

Uno de los problemas de funcionamiento de las pozas solares lo constituye el desarrollo y crecimiento de capas convectivas. Es un fenómeno de inestabilidad en sistemas a doble gradiente difusivo. En el presente trabajo se analiza el estado actual del problema hidrodinámico desde el punto de vista teórico y experimental.

Se exponen los métodos de medida y visualización en uso para una mejor determinación de la estructura térmica y de concentración de dichas capas. Se plantea el diseño de un nuevo modelo experimental que permitirá una mejor determinación de los parámetros significativos.

Abstract

One of the difficulties found in operating solar ponds is the development and growth of convective layers. The existence of these layers is due to instabilities in the double diffusive gradients.

In this paper, the present state of the hydrodynamical problem, both from a theoretical and experimental point of view, is analyzed.

The measurement and visualization methods used tending to a better determination of the thermal and concentration structure of the convective layers are described.

A new experimental model of solar pond is designed.

Introducción

Las pozas solares son colectores-acumuladores de energía solar. La energía en la zona del visible colectada en el fondo oscuro de la poza se acumula en una capa convectiva, de la que se puede extraer, y cuya temperatura puede estar 40°C o más por encima de la exterior. Está aislada del ambiente por una capa de agua quieta de aproximadamente 1 m de espesor. Como la temperatura es mayor en el fondo que en la superficie se impide la convección con el agregado de una sal dando mayor concentración a la solución en el fondo y menor en la superficie. De esta manera se logra una densidad creciente de la superficie hacia el fondo, estáticamente estable. Experiencias realizadas con prototipos y modelos (1), (2) ponen en evidencia la importancia de este fenómeno en el uso práctico de los colectores y la falta hasta el momento de una explica-

* Investigador de la CNEGH

ción básica del problema térmico e hidrodinámico. Estas razones son las que llevan a encarar el presente estudio.

En la sección 1 se expone el estado actual de los problemas hidrodinámicos de convección en sistemas con doble difusión desde el punto de vista teórico y experimental, en la 2 se resumen las experiencias realizadas con un modelo de poza y en la sección 3 se describe el proyecto de un nuevo modelo en el que se podrá mejorar el control ambiental y la medida de los parámetros significativos.

1.- Convección en sistemas con doble difusión

1.1. Aspectos teóricos

El problema a analizar es de la estabilidad de un sistema en el que existen dos componentes que contribuyen al gradiente vertical de densidad que son en este caso la temperatura y concentración. (Podría tratarse de concentraciones de dos solutos distintos, etc.).

Un fluido ocupa el espacio entre dos planos horizontales infinitos separados una distancia D . La temperatura y concentración en el plano superior son T_0 y c_0 . El plano inferior está mantenido a temperatura $T_0 + \Delta T$ y concentración $c_0 + \Delta c$. Se supone el problema bidimensional con una coordenada vertical Z y una horizontal X .

Las variables empleadas son adimensionadas; las longitudes respecto de D , los tiempos respecto de D^2/K_T donde K_T es la difusividad térmica del fluido. La velocidad del mismo está dada en términos de la función de corriente Ψ por

$$\vec{v}_{\text{dim}} = \frac{K_T}{D} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial Z}, - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \right)$$

la temperatura por

$$T_{\text{dim}} = T_0 + \Delta T (1 - z + T)$$

$$c_{\text{dim}} = c_0 + \Delta c (1 - z + c)$$

con $z = \frac{Z}{D}$ variando entre 0 y 1.

$T(c)$ es la diferencia entre la temperatura (concentración) en el plano y la que habría si la distribución fuera la de equilibrio, lineal, adimensionado con ΔT (Δc).

El sistema de ecuaciones (3,4) que gobierna el fenómeno es el siguiente

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{Pr} \left[\frac{\partial \nabla^2 \psi}{\partial t} - J(\psi, \nabla^2 \psi) \right] &= -R_T \frac{\partial T}{\partial x} + R_S \frac{\partial c}{\partial x} + \nabla^4 \psi \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial x} - J(\psi, T) &= \nabla^2 T \\ \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial x} - J(\psi, c) &= \tau \nabla^2 c \end{aligned} \right\} S$$

donde J es el jacobiano

$$J(f, g) = \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial g}{\partial y} - \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial g}{\partial x}$$

Las condiciones de contorno son

$$\psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = T = c = 0 \text{ en } z = 0 \text{ y } z = 1 \quad \left. \right\} S$$

Se supone un desarrollo lineal de la densidad ρ en la temperatura y la concentración

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}_{\text{dim}}$$

$$\beta = +\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial c}_{\text{dim}}$$

Las otras magnitudes que aparecen son

$$Pr = \nu / \kappa_T$$

ν viscosidad cinemática

$$\tau = \kappa_s / \kappa_T$$

κ_s = difusividad salina

$$R_T = \alpha g \Delta T D^3 / \kappa_T \nu$$

R_T es el número de Rayleigh térmico

$$R_S = \beta g \Delta c D^3 / \kappa_T \nu$$

R_S es el número de Rayleigh salino.

En el caso de las pozas R_T y R_S son positivos.

En la teoría lineal, en S se desprecian los jacobianos J y se prueba con soluciones del tipo

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \psi_0 \operatorname{sen} \pi \alpha x \\ T &= T_0 \cos \pi \alpha x \\ c &= c_0 \cos \pi \alpha x \end{aligned} \right\} e^{pt} \operatorname{sen} \pi z$$

La relación de dispersión es una ecuación cúbica y de la existencia de parte imaginaria en p y del signo de su parte real resulta la existencia de oscilaciones y la estabilidad a pequeñas perturbaciones del sistema.

Los resultados para $\alpha = 2^{-\frac{1}{2}}$, que es el caso más desfavorable, aparecen en la Fig. 1 observándose una zona estable y la posibilidad de modos inestables oscilatorios o directos.

Huppert y Moore (4) han hecho también un detallado estudio numérico del caso no lineal. En general para Pr , Z y R_s fijos, al crecer R_T se pasa de un movimiento oscilatorio relativamente simple a otro con estructura más complicada, luego el movimiento se hace aperiódico y finalmente las únicas soluciones asintóticas son independientes del tiempo.

1.2. Aspectos Experimentales (3,5,6)

En el caso que se identifica en la literatura como "difusivo" (aquél en que la energía para el movimiento convectivo proviene de la componente que tiene la mayor difusividad, la temperatura) el ejemplo más simple es el de un gradiente salino lineal estable isoterma, que se calienta fuertemente en la parte inferior. Se observa la aparición de una primera capa convectiva próxima al fondo cuando la difusión térmica torna allí inestable el gradiente de densidad. Sin embargo la inestabilidad no se propaga a toda la masa del fluido como lo predice la teoría lineal, se forma una serie de capas convectivas y hay un salto de la densidad, debido a la concentración salina, en las interfases.

Shirtcliffe (6) verificó que la ruptura del equilibrio se produce por una oscilación de amplitud creciente. Al continuar el calentamiento se desarrolla una capa convectiva neta que crece hasta que llega a un cierto espesor, se detiene y se forma una nueva capa sobre la primera. El espesor máximo alcanzado depende de la velocidad de calentamiento, del gradiente salino inicial y de R_T en la capa límite térmica difusiva que precede a la capa convectiva.

Las medidas de temperatura se han realizado con termocuplas, termistores y termocuplas diferenciales.

Las concentraciones se obtienen por preparación de las soluciones previamente a las experiencias y en algún caso se ha observado cambios cualitativos con celdas conductimétricas fijas.

La visualización se realiza mediante colorantes y fotografías y usando el método de Schlieren.

2.- Experiencias realizadas

Si se aplican a las pozas en funcionamiento los criterios de estabilidad glo-

bal se encuentra que todas ellas resultan estables en contradicción con la evidencia experimental. Para las pozas, R_T y R_S son grandes, de tal manera que el criterio de estabilidad se puede aplicar a R_T/R_S siendo despreciable la influencia de la ordenada en el origen de la recta límite de la zona estable. En la tabla I aparecen los valores de dicho cociente calculado con los valores globales de los gradientes.

Tabla I

Tipo de poza	Z	R_T/R_S	
Sulfato de sodio	0,006	$3,5 \cdot 10^{-2}$	estable
Cloruro de sodio	0,01	$5,5 \cdot 10^{-2}$	estable
Cloruro de magnesio	0,01	$2,3 \cdot 10^{-2}$	estable

$$R_T / R_S = \frac{\alpha \Delta T}{\beta \Delta c}$$

$$R_T / R_S \text{ crítico} = \frac{Pr + Z}{Pr + 1} = 7/8$$

También en este caso, como en los descritos en 1.2, la ruptura del equilibrio se produce en una capa y no compromete globalmente a la poza.

Las experiencias realizadas con el modelo se han llevado a cabo con velocidades de calentamiento menores, similares a las que se tendrían, en promedio, en una poza solar real.

Las velocidades de crecimiento de las capas, para potencias totales del orden de 100 w/m^2 , son de $0,4 \text{ cm/día}$.

2 a. Medidas de temperatura y gradiente térmico

Tanto la temperatura como su gradiente vertical han sido medidos en forma sistemática mediante termocuplas y termocuplas diferenciales. Los rangos de temperaturas de trabajo han sido de 28 a 32° C para el fondo y de 7 a 12° C para la superficie.

La evolución temporal del espesor de las capas ya ha sido descrito en otro trabajo (2).

Se toma como espesor de la capa la zona isoterma del registro.

Se han obtenido en varios días sucesiones de registros como los que aparecen en la figura 2. En el correspondiente al 21/7 se observa una primera zona sobre el fondo de gradiente de temperatura no nulo, luego la zona isoterma (gradiente nulo), una zona de transición intermedia entre la isoterma y la de gradiente constante, aproximadamente igual a $0,6^\circ \text{ C/cm}$.

En el gráfico para el 22/8 la zona isoterma se ha extendido absorbiendo parte de la zona de transición, reduciéndose ésta en forma evidente. Como se ha dicho, esa secuencia de configuraciones se repite en días sucesivos teniéndose

un crecimiento por "pulsos" de la capa.

2 b. Medidas de concentración de sulfato de sodio

Los análisis del contenido de $\text{SO}_4 \text{Na}_2$ se han realizado por extracción de muestras y por determinaciones conductimétricas directas.

A los efectos de la calibración de la medida de conductividad se midió la conductividad equivalente a 25°C (figura 3) y se calibró la variación de la conductividad en función de la temperatura (figura 4) de soluciones patrones preparadas con sulfato de sodio pro Análisis cuya concentración se determinó por medidas de densidad.

Para comodidad de operación se obtuvo un ajuste analítico de la concentración en función de la temperatura y la conductividad.

Por otra parte se realizaron determinaciones volumétricas con solución patrón de cloruro de bario usando tetrahidroquinona (THQ) como indicador (7).

Los resultados obtenidos sobre las muestras extraídas son los siguientes:

Tabla II

Altura	Temperatura $^\circ \text{C}$	Conc. $\text{SO}_4 \text{Na}_2$ % p/V	Conc. $\text{SO}_4 \text{Na}_2$ % p/V
		Determ. conductim.	Determ. THQ $\text{Cl}_2 \text{Ba}$
superficie	15	10,5	10,0
refrigeradores	13,1	12,7	11,8
zona gradiente	23,1	17,2	16,3
fin gradiente	28,2	21,6	21,7
capa convectiva	28,9	21,4	22,1
capa convectiva	28,9	20,4	21,1

En determinaciones conductimétricas directas se introdujo la celda a distintas profundidades en la poza. Los resultados figuran en la tabla III y la figura 5.

Tabla III

Profundidad cm	Temperatura $^\circ \text{C}$	Conc. % p/V
5,8	10,1	11,9
14,5	17,7	12,3
21,3	23,2	17,9
30	31	18,9
32,5	32,7	21,8
33,5	32,7	24,1
Fondo	33,9	22,8

En ambos casos se observa que en la zona media de la capa la concentración parece ser mayor que en los bordes de la misma. Dejando de lado la difusión, si

la capa aparece como una mezcla de una zona donde existió un gradiente lineal, es de esperar que su concentración sea mayor que la de la zona de gradiente no destruida.

2 c. Visualización

La poza tiene dos pequeñas ventanillas a través de las cuales se ha observado la evolución de trazas de cristales de permanganato para visualizar las distintas zonas. Se ha observado variaciones en el módulo y dirección de las velocidades en distintos puntos de la poza y a varias alturas dentro de la capa. Es factible fotografiar estas trazas y se encarará el desarrollo de la técnica por el interés de la información hidrodinámica que proporciona. En el modelo actual existen gradientes horizontales en la temperatura del fondo que influyen en los movimientos convectivos por lo que se tratará de eliminarlos en el nuevo diseño.

3.- Diseño de un nuevo modelo

Se ha diseñado un nuevo modelo experimental que consiste en un recipiente de 50 x 50 x 60 cm³ totalmente de vidrio en la parte lateral. Está armado sobre una chapa de aluminio de 11 mm. de espesor. Para impedir el ataque de la chapa por las soluciones salinas calientes la misma ha sido pintada con pintura poliuretánica que se ha elegido de color claro pues deberá servir de fondo para las fotografías.

Para evitar gradientes térmicos laterales se ha colocado por debajo de la chapa una bandeja con los calefactores dejando una distancia de 4 cm de aire. Se espera que el espesor de la chapa y la acción de lamido del aire entre la misma y los calefactores permitirá obtener una temperatura uniforme en el fondo. A los mismos efectos, los calefactores se distribuirán de forma de compensar las pérdidas laterales. Estas además se reducirán al mínimo mediante la colocación de una aislación lateral que llegará por debajo de la bandeja. La aislación se podrá retirar cuando se desee hacer trabajo fotográfico. Dos de las paredes laterales de vidrio tienen escalas para su ubicación en las fotos que han sido grabadas por ataque con ácido fluorhídrico. En caso de que los gradientes laterales resultaran excesivos se podrá colocar un baño de aceite para uniformizar la temperatura.

Para la medida de temperatura se continuará empleando termocuplas. Las medidas de gradiente se realizarán mediante un par de diodos separados aproximadamente 0,3 cm para tener una relación señal/ruido mejor que con las termocuplas con un montaje como el sugerido en (8).

El izamiento de los sensores en las medidas continuas se realizará mediante un motor de velocidad constante con soportes rígidos de manera de tener buena verticalidad y poder ubicar con precisión las coordenadas del punto donde se realiza la medida.

Las medidas de densidad que se hacen en la actualidad en forma discreta, por

nivel de flotación de esferitas taradas y de distintas densidades, no permiten explorar la capa convectiva. Por ello se ha previsto que las nuevas medidas se realicen por empuje sobre un buzo de pequeño espesor mediante una balanza a 0,1 mg con la que se puede pesar por debajo de platillo y que por su sensibilidad es adecuada para una exploración más afinada en altura.

Para las medidas de concentración se planea utilizar un método continuo de medida, sensible a la fase para obtener la variación de conductividad con la celda conductimétrica. Las variaciones de capacidad de la misma no han resultado repetitivas por lo que se debe detectar sólo la componente resistiva.

Como se pondrán en funcionamiento dos modelos, en el local que se les ha destinado se ha instalado un par de rieles sobre el que desliza un puente que a su vez puede desplazarse transversalmente a aproximadamente 1,20 m sobre los modelos.

Sobre él se instalará la balanza, los dispositivos de izamiento de los sensores (termocuplas, diodos, celda de conductividad) y la cámara fotográfica. De esta manera se podrá utilizar el sistema de medida en ambos modelos y será posible variar los puntos donde se realizarán las medidas en cada poza.

Toda la habitación tendrá su temperatura controlada con un acondicionador de aire adecuadamente regulado de manera que se puedan calibrar las pérdidas térmicas del modelo con mayor precisión que en la actualidad. Para la alimentación de los calefactores se recurrirá a una fuente de corriente continua regulada con lo que se conocerá la potencia entregada al sistema con precisión mejor que el 1%.

La visualización de los movimientos convectivos se obtendrá mediante el uso de cristales de permanganato y se realizarán fotografías simultáneas seriadas para poder obtener mapeos cualitativos de las velocidades.

Referencias

- 1.- a) C.Nielsen - Experience with prototype solar pond for space heating - ISES, Winnipeg, Canadá, 1976.
b) C.Nielsen - Conditions for absolute stability of salt gradient solar ponds. ISES, Nueva Delhi, India, 1978.
- 2.- J.Mangussi, G.Lesino, A.Ronco, L. Saravia - Funcionamiento de un modelo de poza solar con gradiente salino saturado - Presentado a la 4ª Reunión de Trabajo de ASADES, La Plata, 1978.
- 3.- J.S.Turner - Buoyancy effects in fluids - Cambridge University Press, 1974.
- 4.- H.E.Huppert and D.R.Moore - Non-linear double diffusive convection - J.Fluid Mech. 78, Part 4, 1976.
- 5.- J.S.Turner - The behaviour of a stable salinity gradient heated from below - J.Fluid Mechanics, 33, Part 1, 1968.
- 6.- T.G.L.Shirtcliffe - The development of layered thermo-solutal convection - Int. J.Heat Mass Transfer 12, 1969.
- 7.- I.M.Kolthoff and V.A.Stenger - Volumetric analysis - Vol.II - Interscience Publishers, 1942.
- 8.- G. Lesino - Diodos en medidas de temperatura. ASADES. La Plata .

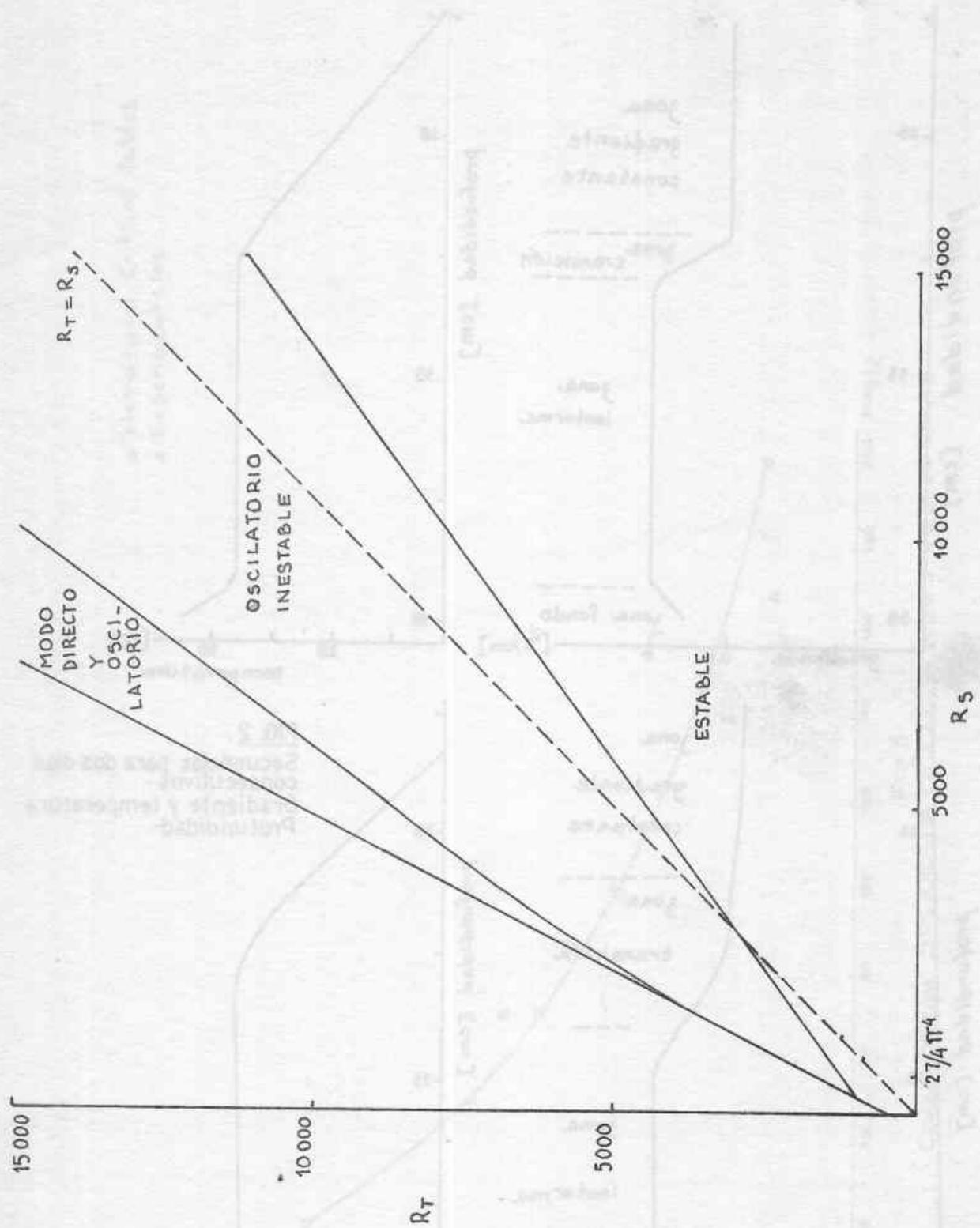


Fig. 1
 Resultados de la teoría lineal. $\sigma = 1$ $\tau = 0,5$

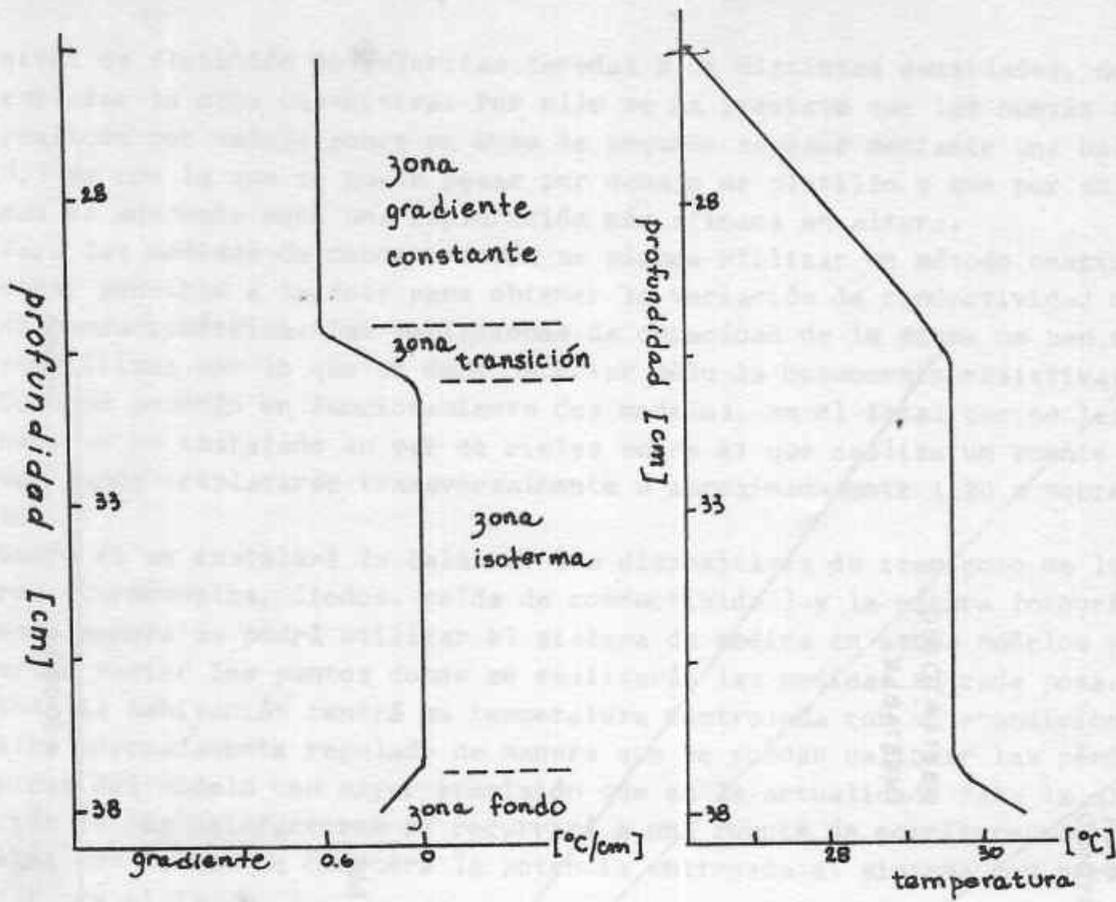
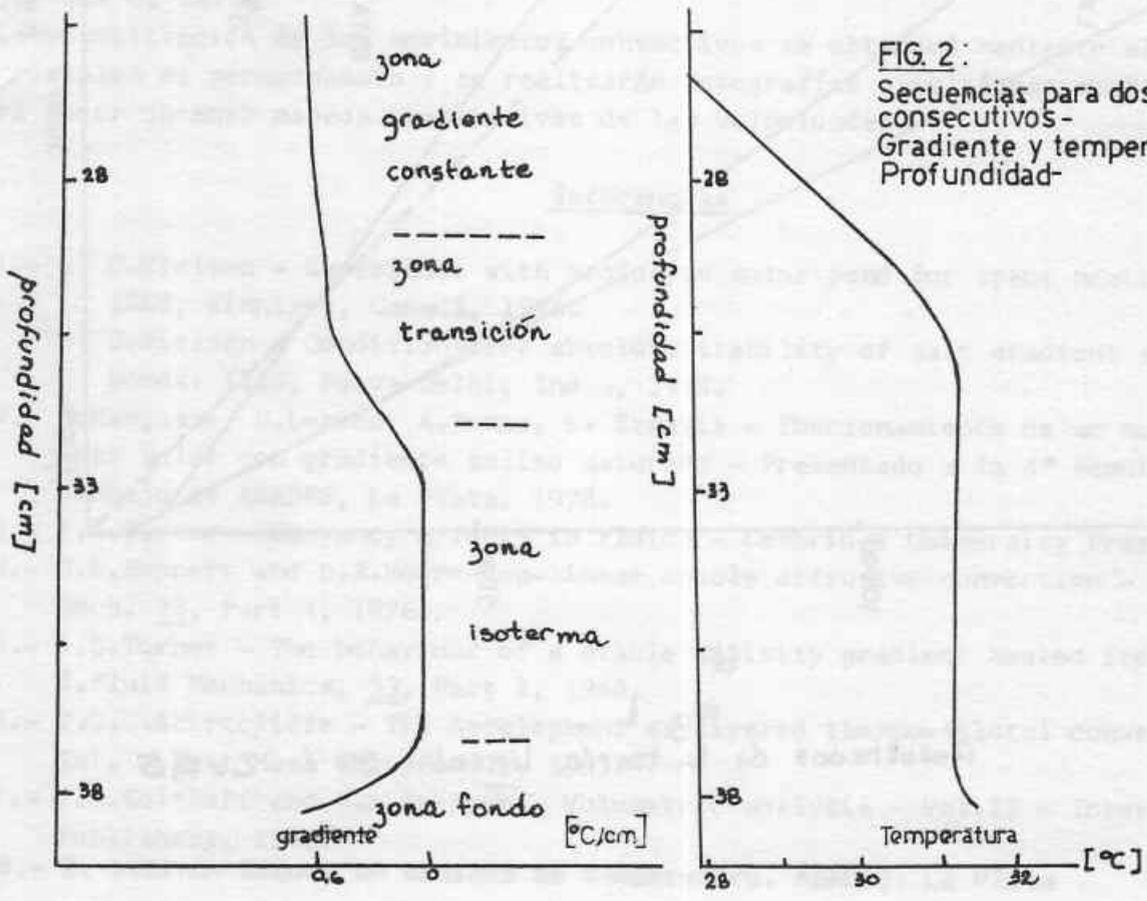


FIG. 2:
 Secuencias para dos días
 consecutivos -
 Gradiente y temperatura -
 Profundidad-



o International Critical Tables
Δ Experimentales

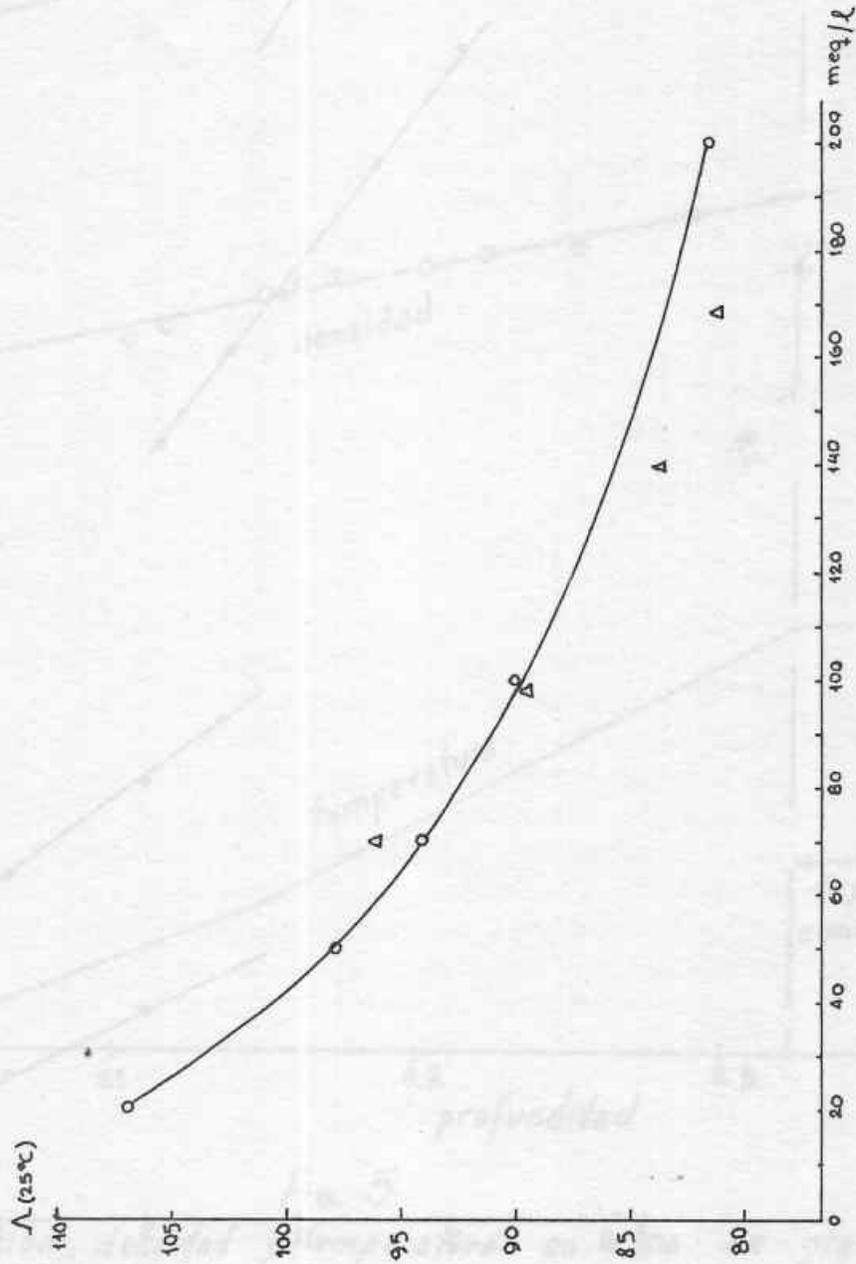


Fig 3
Concentración SO_4Na_2 Vs conductividad equivalente

- 4,75 % p/p SO_4Na_2
- + 9,5 % p/p SO_4Na_2
- 19,0 % p/p SO_4Na_2
- ▲ 30,0 % p/p SO_4Na_2

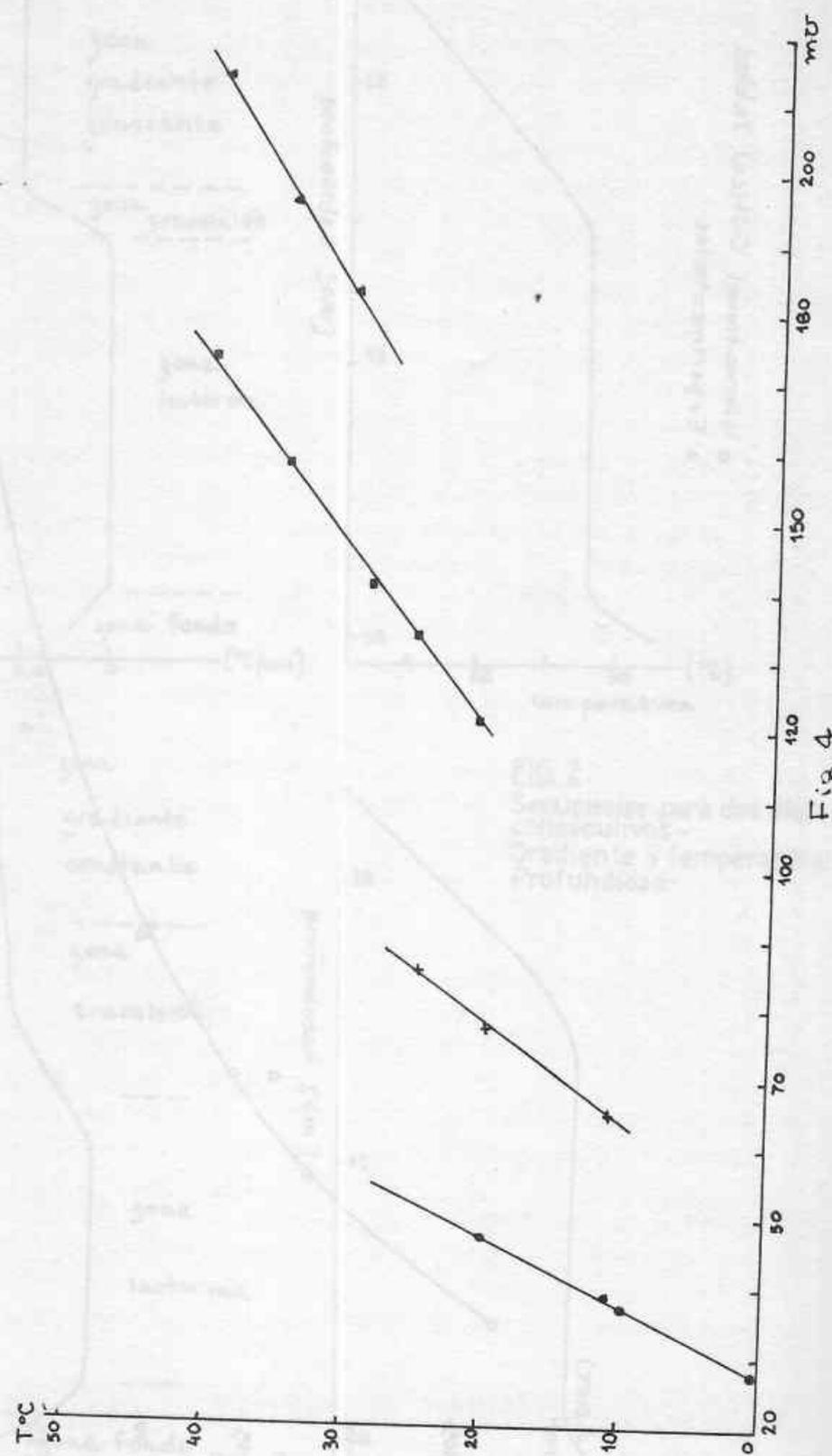


Fig. 4
Curvas temperatura - conductividad

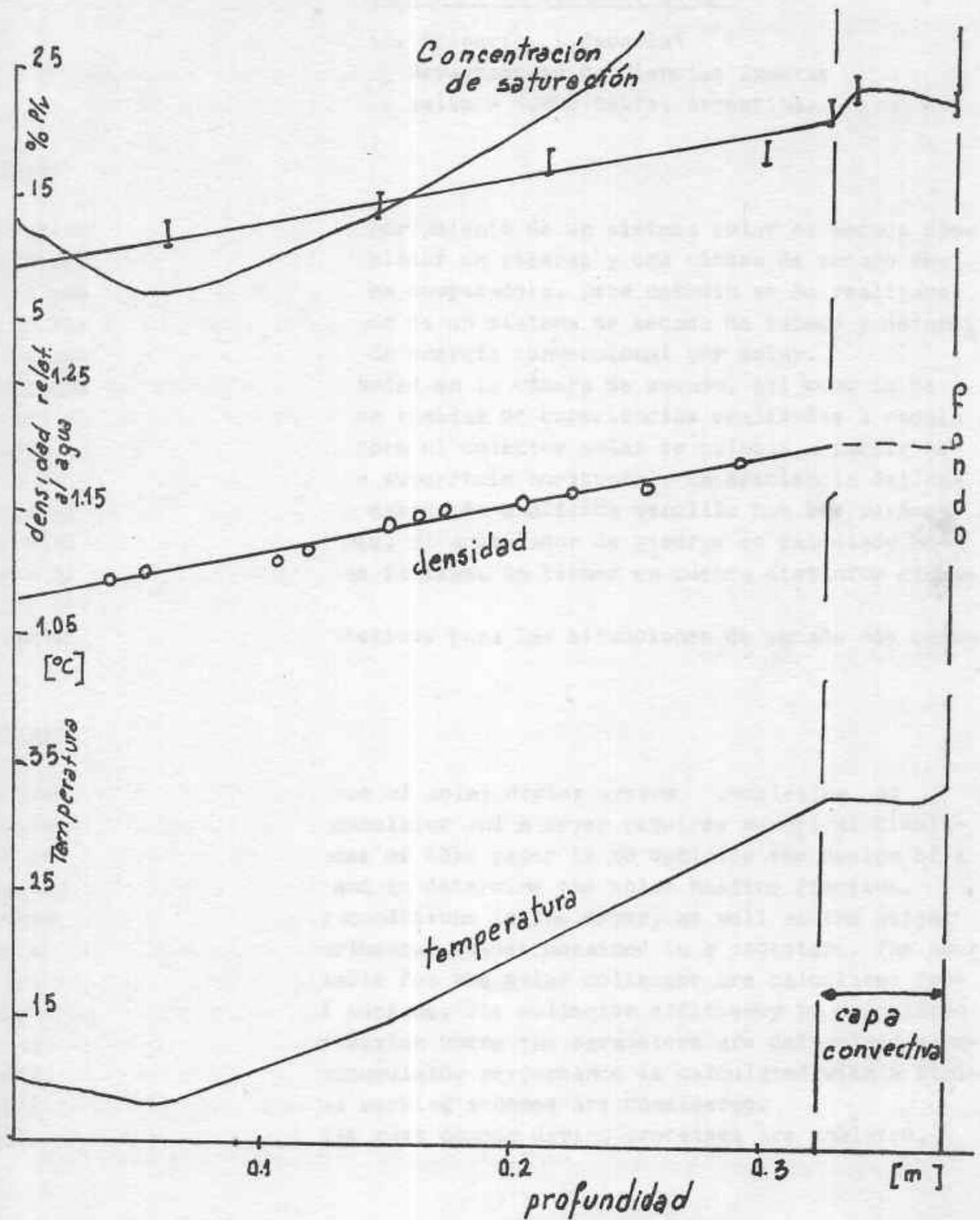


Fig. 5
 Concentración, densidad y temperatura en zona de gradiente y capa convectiva