

## POZAS SOLARES CON GRADIENTE SALINO SATURADO

J. MANGUSSI, L. SARA VIA \*  
Departamento de Ciencias Exactas  
Universidad Nacional de Salta  
Buenos Aires 177 - 4400 Salta  
República Argentina

### RESUMEN

En este trabajo se analiza la posibilidad de utilizar pozas solares saturadas de sulfato de sodio con el fin de mantener el gradiente salino sin el suministro de sal.

Se muestra la posibilidad de establecer un gradiente automantenido en que momentáneamente las capas superiores estén saturadas, viéndose que en estas condiciones la temperatura puede tomar valores superiores a la del cambio de fase del sulfato decahidratado.

Se describe el modelo experimental utilizando para ensayar la factibilidad del procedimiento y se dan los resultados obtenidos.

### Introducción

El interés en las pozas solares como sistema de aprovechamiento de la energía solar se ha incrementado en los últimos años (1,2) debido a dos razones principales: su bajo costo inicial y la de poseer un sistema ininterrumpido de acumulación. No obstante, su utilización plena dependerá de la obtención de solución satisfactoria para algunos problemas prácticos de funcionamiento tales como el mantenimiento del gradiente, la extracción de calor, limpieza de la poza y agitación de la superficie.

En este trabajo se analizará una solución al problema de mantenimiento del gradiente a ser utilizada en regiones con condiciones climáticas especiales.

La convección en el seno del líquido que forma la poza, es evitada mediante un gradiente de concentración salina, desde un mínimo en la superficie a un máximo en el fondo. Dado que el costo total de la sal es uno de los factores preponderante en el costo total inicial, la concentración en el fondo suele elegirse como el valor mínimo compatible con la estabilidad del sistema. Debido al proceso de difusión de la sal a través del gradiente de concentración, éste no se mantiene y se hace necesaria la utilización de sistemas que mantengan las concentraciones en el fondo y en

\* Investigador de la CNEGI

la superficie, (3).

Con el fin de evitar la necesidad de mantener el gradiente, se ha sugerido utilizar sales cuya concentración de saturación cambie con la temperatura, y construir el gradiente de la poza con una concentración en la superficie tal que corresponda a la de saturación para la temperatura de la misma. El proceso de difusión provocará la saturación de las capas, cristalizando la sal y cayendo al fondo, por lo cual se mantendrá automáticamente el gradiente.

La posibilidad práctica de utilizar este método dependerá de que se consiga una sal con las propiedades necesarias y con precios así como una concentración lo suficientemente bajas como para que el costo inicial de la sal haga rentable el sistema.

En la zona de la puna salteña existen yacimientos de sulfato de sodio que tienen una concentración de saturación fuertemente dependiente de la temperatura. Dado que las temperaturas medias ambiente son muy bajas, del orden de los  $5^{\circ}\text{C}$ , sería posible hacer trabajar a una poza de sulfato de sodio con un gradiente térmico entre  $5^{\circ}\text{C}$  en la superficie y  $30^{\circ}\text{C}$  o más en el fondo, y algunas capas saturadas. La disponibilidad local de la sal hace factible el planteo desde el punto de vista económico. Por otra parte, el desarrollo minero exigirá la disponibilidad de energía térmica a temperaturas moderadas con fines de habitabilidad y para algunos procesos industriales.

En la sección 2 se detallan los fundamentos del método. En la sección 3 se describe un modelo experimental que simula la poza con calentamiento artificial y se dan algunos resultados que confirman las consideraciones de la sección 2. Finalmente, en la sección 4 se establecen algunas conclusiones respecto al uso de las técnicas descriptas a escala real.

## 2. Fundamentos

Considérese una poza unidimensional de espesor  $L$ . A la profundidad  $x$ , medida desde la superficie, tendrá una temperatura  $T$  y una concentración  $C$  (kilos de sal por kilos de solución). En la determinación de  $T(x)$  y  $C(x)$  influyen serios problemas. En una poza real se deberá tener en cuenta la absorción de la radiación solar a distintas alturas (4,5). No obstante, en lo que sigue se planteará el problema en relación con un modelo experimental que se calienta en el fondo únicamente, por lo que pueden considerarse como datos del problema estacionario, la temperatura en la superficie  $T_s$  y la potencia que se suministra en el fondo  $Q_f$ . Cuando la poza comienza a calentarse se pasa por un período no estacionario. El tiempo  $\tau_T$  que se tarda para que el fondo llegue a la temperatura de re-

donde  $T_f$  es del orden de:

$$\frac{C_p \rho L^2}{2 K}$$

donde  $C_p$  es el calor específico,  $\rho$  la densidad y  $K$  la conductividad térmica de la solución. Este término vale 15 horas para una poza de  $L = 40$  cm llegando a 4 días para  $L = 1$  metro. La temperatura de régimen que se obtiene en el fondo es:

$$T_f = T_s + \frac{Q_f L}{K A}$$

donde  $A$  es el área de la poza.

En régimen estacionario, la función  $T(x)$  será lineal:

$$T(x) = T_s + (T_f - T_s) \cdot \frac{x}{L}$$

Si se supone que las constantes físicas de la solución son independientes de la concentración. Esta suposición es razonable en una primera aproximación. Si se introduce la variación de  $K$  con  $C$  y  $T$  se calcula variaciones de la forma lineal no mayores que el 0,3 %. Es de observar que esta hipótesis desacopla el fenómeno térmico  $T(x)$ , de las variaciones de concentración.

El segundo fenómeno de interés es el de difusión del soluto producido por el gradiente de concentración, el que estará caracterizado por una constante de difusión  $D$ . Cuando la sal comienza a difundirse se pasará por un período no estacionario. El tiempo  $t_D$  en que se alcanza el régimen estacionario será:

$$\frac{L^2}{2 D}$$

Este término vale 15 meses para una poza con  $L = 40$  cm y llega a 10 años para  $L = 1$  metro.

Se puede constatar que  $t_D \gg t_T$ , lo que en la práctica significa que el perfil de temperatura alcanzará el equilibrio antes que las condiciones de concentración cambien sensiblemente. Por tal razón, en las discusiones que siguen se supondrá que las condiciones de régimen en el estado térmico se alcanza en forma "instantánea".

Antes de estudiar el régimen estacionario para las concentraciones, se debe discutir el fenómeno de saturación, precipitación de sal y disolución de sal dentro de la poza. Las soluciones del sulfato de sodio alcanzan una concentración de saturación fuertemente dependiente de la temperatura,  $C^s(T)$ , tal como se muestra en la figura 1.

El punto anguloso está relacionado con el hecho de que por encima de los  $32,6^\circ\text{C}$  los cristales que se forman son de sulfato de sodio anhidro, en vez de decahidratado.

Cuando dentro de la poza se alcanza en un punto la concentración de saturación, se precipitarán cristales, que por su mayor densidad se depositarán en el fondo, donde vuelven a disolverse. Debido al fenómeno de sobre saturación, la curva  $C^s(T)$  puede depender mucho de las condiciones de nucleación de la solución, las que suelen ser variables. En lo que sigue se adoptará una curva, la de la figura 1.

La velocidad de formación de cristales o de su disolución posterior depende de varios factores. No obstante, las experiencias realizadas muestran que el proceso es mucho más rápido que el de difusión, por lo que también se supondrá que es "instantáneo".

Cuando se conoce la distribución de temperatura  $T(x)$  se puede encontrar la concentración de saturación  $C^s$  para cada altura  $x$  de la poza. Ello se ilustra gráficamente en la figura 2.

El más simple de los regímenes estacionarios en lo que se refiere a concentraciones, es aquél en el que únicamente se satura la superficie de la poza. Para  $x > 0$ , en la suposición de que  $D$  y  $\rho$  sean constantes,  $C(x)$  será lineal, tal cual se muestra en la figura 3, curva  $C_1(x)$ . La pendiente de la curva quedará determinada por la condición de que la masa total de soluto no ha variado en la poza,  $M_0$ :

$$\int_0^L C(x) \rho A dx = M_0$$

El gradiente de concentración producirá una difusión de sal, pero al llegar a la superficie, que está saturada, precipitará y caerá al fondo, realimentando el proceso de difusión.

Si la cantidad de soluto  $M_0$  disminuye, llegará un momento en que

$C(0) < C^s(0)$ , no habrá realimentación y se establecerá una concentración constante en toda la poza, la que entonces no podrá marchar.

Si  $M_0$  aumenta, también aumentará el gradiente hasta que la recta  $C(x)$  se haga tangente a  $C^s(x)$  en  $x = 0$ , tal cual se muestra en la figura 8, curva  $C_2(x)$ .

Más allá no se podrá ir ya que al cortar  $C_2(x)$  a  $C^s(x)$  se produce la pre

equación. Si  $M_0$  sube de ese valor, la poza se saturará desde  $x = 0$ , hasta  $x = x^S$  en forma tal que:

$$\int_0^{x^S} C^S(x) \rho A dx + \int_{x^S}^L C(x) \rho A dx = M_0$$

Definiese que en estado de régimen  $C(x)$  debe ser continua en todo punto para asegurar la no existencia de puntos de acumulación de sal. Por tanto  $C(x)$  será tangente a  $C^S(x)$  en  $x = x^S$ , como muestra la figura 8, curva  $C(x)$ .  $x^S$  será función de la temperatura en la superficie  $T_s$  y en el fondo  $T_f = 32,6^\circ\text{C}$  y varios valores de  $T_s$  y  $M_0$ .

Si  $M_0$  sube lo suficiente, la poza se saturará en su totalidad. La temperatura  $T_f$  no puede llegar a tener un valor tal que  $C(x)$  corte a  $C^S$ . En ese caso se producirá precipitación en el fondo de la poza, con comienzo con una conversión de densidad que ocasionaría la convección en el fondo. En la tabla II se dan valores de  $M_0$  que permiten obtener distintos  $T_f$  máximos para una poza de 1 m de profundidad. Se han agregado los valores correspondientes de  $x^S$  y el gradiente  $(T_f - T_s) / L$ . Se debe destacar que si la poza está parcialmente saturada,  $T_f$  máximo puede ser mayor que  $32,6^\circ\text{C}$ . Debe puntualizarse que en la confección de la tabla no se han introducido las condiciones de estabilidad de la poza, por lo que algunos valores pudieran ocasionar convección en el sistema.

### 3. Modelo Experimental

Con el fin de experimentar las condiciones de trabajo explicadas en la sección anterior, se construyó un modelo de  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  de sección y  $40 \text{ cm}$  de profundidad, aislado en forma suficiente para asegurar isoterma casi planas. La solución se calienta eléctricamente en el fondo, con las resistencias eléctricas apoyadas en una chapa metálica que asegura una distribución uniforme de temperatura. En la superficie, se circula agua fría, de un depósito mediante una bomba, la que se controla con un termostato para asegurar la constancia de la temperatura. En la figura 4 se esquematiza el modelo experimental.

La temperatura se detecta en forma continua mediante un termocupla de cobre constantán envainada en vidrio que se levanta a velocidad constante mediante un motor. El registro total se realiza en 30 minutos.

La concentración de sulfato de sodio se mide indirectamente determinando la densidad mediante la flotación de bolillas de densidad conocida, cuya altura se mide a través de una ventanilla lateral. Otra ventanilla permite el acceso de un haz de luz para medidas de índice de refracción

de la solución. Un conjunto de salidas ubicadas cada 5 cm permite la medición de capas parciales.

En las figuras 5, 6, 7 se muestran medidas de concentraciones  $C(x)$  en función de la profundidad  $x$  de la poza para distintas cantidades totales de soluto  $M_0$ . Para cada conjunto de medidas la línea continua se ajusta al régimen estacionario esperado. Se determina el punto tangencial  $x^s$  de esta recta con la curva de concentraciones saturadas  $C^s(x)$ . Se indica la profundidad donde está colocados los refrigeradores. En la figura 5 se muestran dos curvas típicas de  $C(x)$ , ambas con gradiente de concentración constante y distintas profundidades de saturación  $x^s$ . El gradiente de temperatura es  $69^\circ\text{C/m}$ ; la temperatura en el fondo  $35.2^\circ\text{C}$ . y en la superficie  $7.6^\circ\text{C}$ .

Debido a los largos tiempos necesarios para establecer el gradiente de concentración de equilibrio una vez fijado  $M_0$  el estado estacionario no se alcanza en cortos lapsos. Este es el caso en la figura 6 de las medidas correspondientes a  $M_0 = 89 \text{ kg de sal/m}^2$ , tomadas un mes después del llenado de la poza. En los 5 cm próximos al fondo se observa un gradiente de concentración mucho mayor que en el resto, donde es constante. Al arribar al estado estacionario  $C(x)$  será una recta de pendiente mucho mayor que de la figura. Los valores que se muestran en la figura 6, se midieron con un gradiente de temperatura igual a  $55^\circ\text{C/m}$ , la temperatura en el fondo es  $30.2^\circ\text{C}$  en la superficie  $8.3^\circ\text{C}$ .

En la figura 7 se observan perfiles de concentración casi saturados. El gradiente de temperatura es  $27^\circ\text{C/m}$ , la temperatura en el fondo  $19.4^\circ\text{C}$  y en la superficie  $8.7^\circ\text{C}$ .

En la figura 8 se muestran perfiles de temperatura de la poza durante un calentamiento producido por un suministro de potencia constante en el fondo  $Q_f$ . Se parte de un estado estacionario con temperatura en el fondo igual a  $18.8^\circ\text{C}$ ; al cabo de 13 días es de  $34.4^\circ\text{C}$ . Las irregularidades en el crecimiento del gradiente de temperaturas son efectos de cortes en la potencia suministrada en el fondo e interrupciones en el sistema de refrigeración. El perfil de temperatura en el estado final no corresponde aún al del estado estacionario que es una recta. Se observa que la curva al cabo de 13 días no es totalmente lineal como lo es la dependencia de la temperatura con la profundidad en el caso estacionario. La cantidad total de soluto  $M_0$  es igual a  $57 \text{ kg de sal/m}^2$  durante todo este proceso.

En la figura 9 se muestran perfiles de temperaturas de la poza a partir de su llenado durante un período de 34 días. Alcanza regímenes estacionarios de lapsos de 5, 14 y 15 días, con la temperatura en el fondo  $T_f$  igual a  $18.8^\circ\text{C}$ ,  $35.4^\circ\text{C}$  y  $40.5^\circ\text{C}$ , respectivamente. Durante la evolución de un estado estacionario a otro la potencia se mantiene constante. En la zona donde está ubicado el sistema de refrigeración, se observan disminuciones de temperaturas. Al cabo de 34 días hay una zona de 3,5 cm

señala al fondo a temperatura constante de  $40.5^{\circ}\text{C}$ , que corresponde al crecimiento de una capa convectiva de dicha región.

En la figura 10 se muestra el crecimiento de la capa convectiva en función del tiempo, al aumentar la temperatura de fondo desde  $36^{\circ}\text{C}$  a  $40^{\circ}\text{C}$  durante un período de 20 días. La potencia suministrada se mantiene aproximadamente constante, con diversas interrupciones que provocan descensos rápidamente compensados al reestablecer el calentamiento de la temperatura del fondo. Se sugiere con línea de trazos una posible dependencia del espesor de la capa convectiva con el tiempo. Durante este lapso la cantidad total de soluto  $M_0$  se mantuvo constante e igual a  $57 \text{ kg de sal/M}^2$ .

Cuando la capa convectiva se extendió al 25% de la profundidad de la poza se bajó la potencia a la mitad de su valor y simultáneamente se agregó sal en el fondo, con lo cual la cantidad total de soluto se elevó a  $60 \text{ kg de sal/M}^2$ . En un día se restablecieron los gradientes térmicos y de concentraciones y desapareció la capa convectiva.

#### 4. Conclusiones Generales

El estudio realizado hasta el presente con modelos muestra la factibilidad técnica de la solución propuesta para el automantenimiento del gradiente en la poza. La solución se encuentra limitada por las condiciones de temperaturas impuestas por el tipo de sal. La temperatura media en la superficie no debe ser mayor de unos  $10^{\circ}\text{C}$  si se quiere tener un salto de temperatura aceptable. Ello limita su uso en la Argentina a las zonas altas. Esta condición no resulta tan limitante en la realidad ya que allí se donde existen reservas grades de sal constituyéndose en el lugar ideal para la utilización de este tipo de colector.

La cantidad de sal necesaria por unidad de superficie de colección es menor aquí que en las zonas comunes debido a la necesidad de saturar la superficie. No obstante, si se trabaja con temperaturas de superficie bajas, la concentración de saturación se vuelve pequeña y las diferencias se son muy apreciables. En la tabla III se dan kilos de sal por  $\text{m}^2$  de colector necesarias para mantener distintos gradientes de concentración en una poza de 1 m de profundidad con  $5^{\circ}\text{C}$  en la superficie y  $30^{\circ}\text{C}$  en el fondo.

El sulfato de sodio se cotiza a precio bastante mayor que el cloruro de sodio. Ello se debe fundamentalmente a que el material en los depósitos comerciales es una mezcla de sulfato con cierta proporción de cloruro, mientras que los usos industriales habituales exigen porcentajes no mayores al 1: 24 de cloruro lo que exige el uso de procesos de purificación. También es necesario extraer el agua de cristalización con el fin de abaratar el costo de transporte. Estas exigencias no son necesarias en el caso de las pozas. El cloruro de sodio tiene una curva de saturación casi independiente de la temperatura y si se agrega a la solución de sulfato, terminará por establecerse condición de equilibrio con una

concentración constante de cloruro y el gradiente ya discutido de sulfato ; por lo que sería factible utilizar directamente la mezcla de sales extraída del salar. Esta alternativa se encuentra en etapa de estudio más detallado. Al respecto debe agregarse que el tema también es interesante porque existen posibilidades de utilizar una poza que trabaje con la sal sin purificar como parte integral de un proceso industrial de separación de sal.

Debido a que las zonas andinas tienen un clima muy seco, la evaporación superficial del agua es fuerte. Para la poza saturada esto no resulta ser un inconveniente, ya que la capa superficial está saturada y la pérdida de agua sólo provoca una mayor precipitación de sal. El agua debe ser re-puesta, pero puede hacerse en el fondo con aguas que tengan alto contenido salino. Respecto al trabajo en altura, es interesante destacar que este tipo de solutos tiene como ventajas adicionales la de no sentir el efecto de radiaciones ultravioletas ni el de las bajas temperaturas.

En lo que se refiere a la extracción de calor cabe destacar que el método de extracción directa de la capa inferior caliente es de aplicación más difícil en este caso, debido que al enfriarse la solución, la sal precipita produciendo el taponamiento del sistema de intercambio de calor.-

#### REFERENCIAS

- 1.- Tabor, H " Solar Developmet in Israel", Solar Energy III, (1959)
- 2.- Tabor, H " Large Area Solar collector for power production", Solar Energy Vol VII, N° 4, p189 (1963)
- 3.- Nielsen, C., Rabl. A., Watson, J. Weiler, P "Maintenance of Salt Concentration Gradient in Solar Ponds"
- 4.- Weinberger, H " The Physics of the solar Pond", Solar Energy, Vol VIII, N° 2, p45, (1964)
- 5.- Bruné, L., Saravia, L., Bekerman, C. " Modelo de Laboratorio de una poza solar" " a Reunión de Trabajo de Energía Solar; Salta, junio 1976.

Tabla I - Valores calculados para una poza de 1m de profundidad con la temperatura en el fondo  $T_f = 32.6^\circ\text{C}$  y distintos valores de  $M_o$  y  $T_s$ .

$x^s$ (m)	$M_o$ (kg sal/m <sup>2</sup> )	$T_s$ (°C)
0	118	5
0.05	135	5
0.1	162	5
0	168	10
0.05	183	10
0.1	199	10

Tabla II - Valores calculados de  $M_o$  para distintas temperaturas en el fondo  $T_f$  máximas para una poza de 1 m de profundidad.

$M_o$ (kg sal/m <sup>2</sup> )	$T_f$ (°C)	$x^s$ (m)	$(T_f - T_s) / L$ (°C/m)
0.254	60	0.07	55
0.355	50	0.10	45
0.447	40	0.34	35
0.192	30	1	25

Tabla III - Valores calculados de  $M_o$  para una poza de 1m de profundidad con  $T_s = 5^\circ\text{C}$ ,  $T_f = 30^\circ\text{C}$  y distintos gradientes de concentración  $s$ .

grad. C (Kg sal/Kg soluc. m)	$x^s$ (m)	$M_o$ (Kg sal/m <sup>2</sup> )
0.064	0	104
0.081	0.05	134
0.123	0.10	151
0.134	0.15	167
0.161	0.20	195
0.178	0.30	214

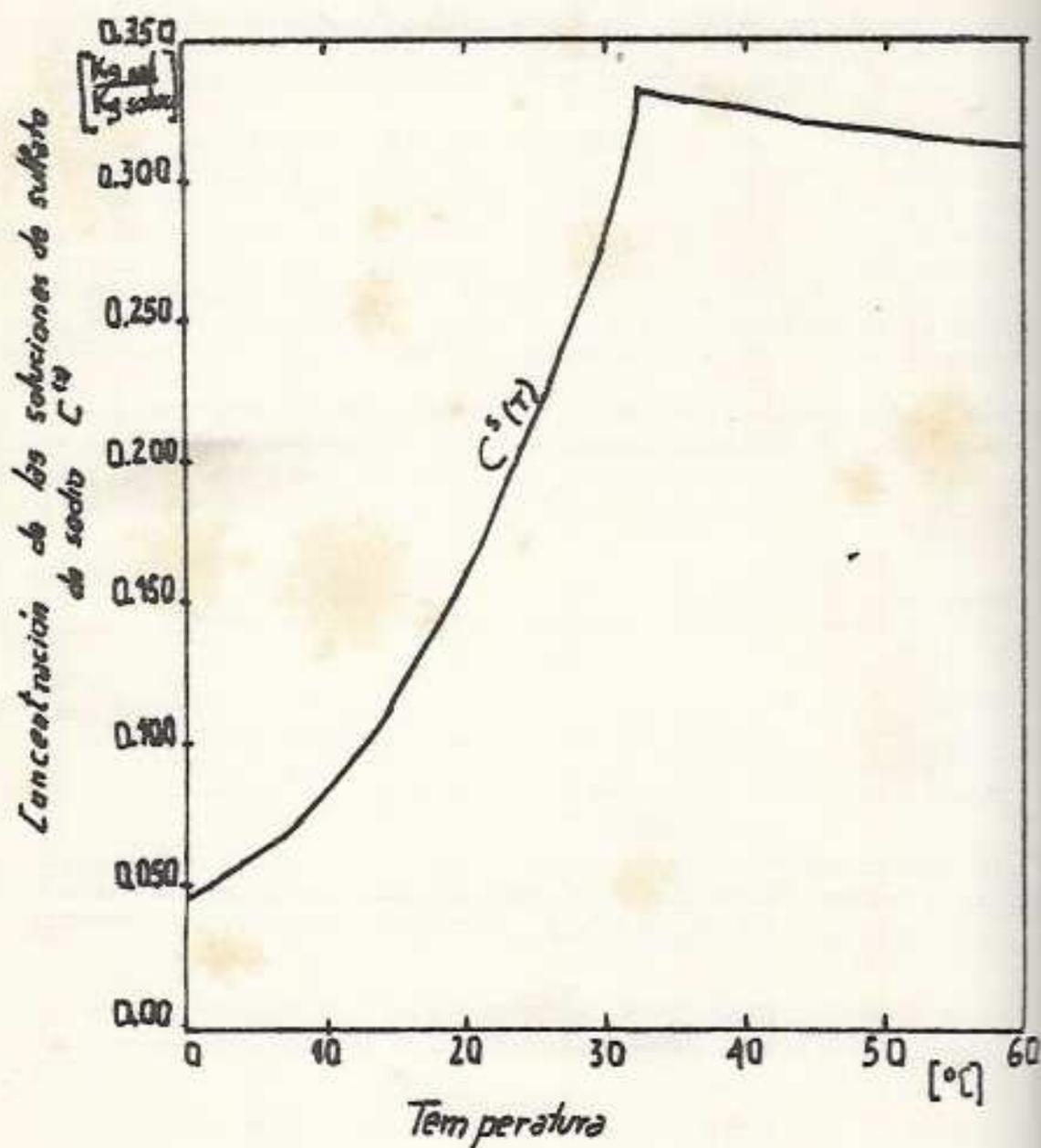


Figura 1- Dependencia de la concentración de saturación  $C^s$  de las soluciones de sulfato de sodio con la temperatura

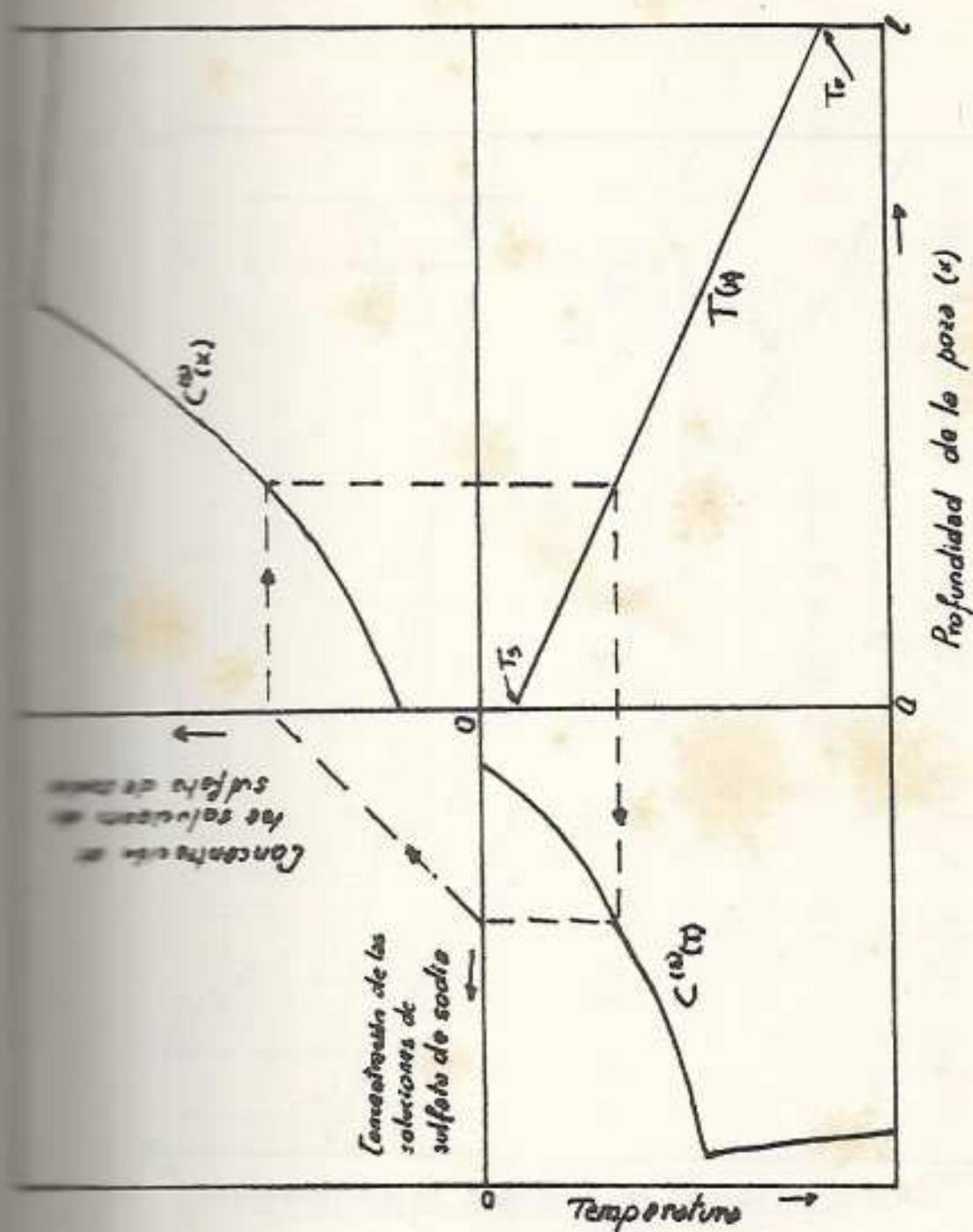


Figura 2. Concentración de saturación  $C^{(s)}$  en función de la profundidad  $x$  de la poza, obtenida a partir de la distribución de temperaturas  $T(x)$  que es conocida.

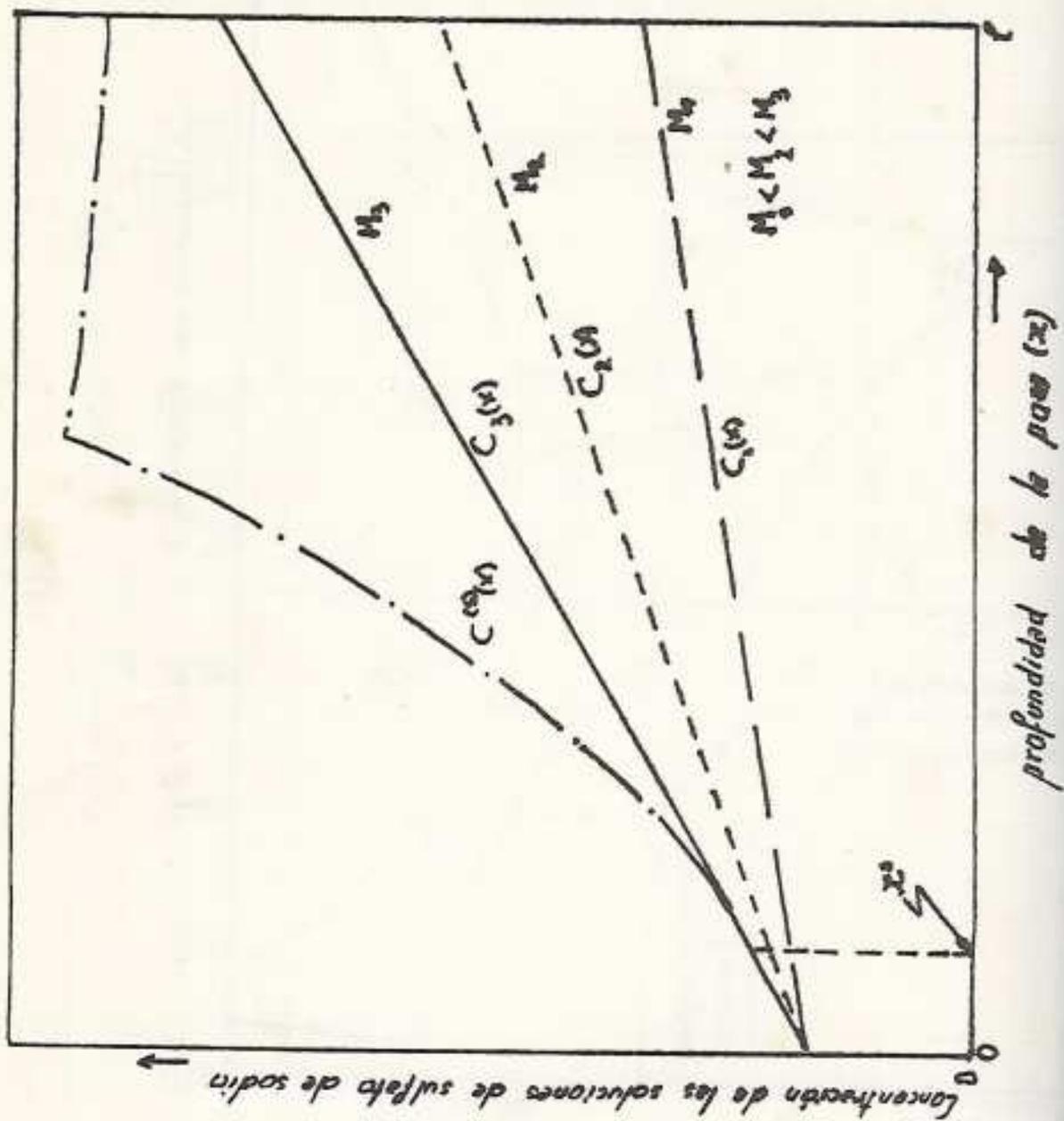


Figura 3.- Variación del régimen estacionario de concentración  $C_1(x)$ ,  $C_2(x)$ ,  $C_3(x)$  al aumentar la cantidad total de soluto  $M_0$ , a  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ .

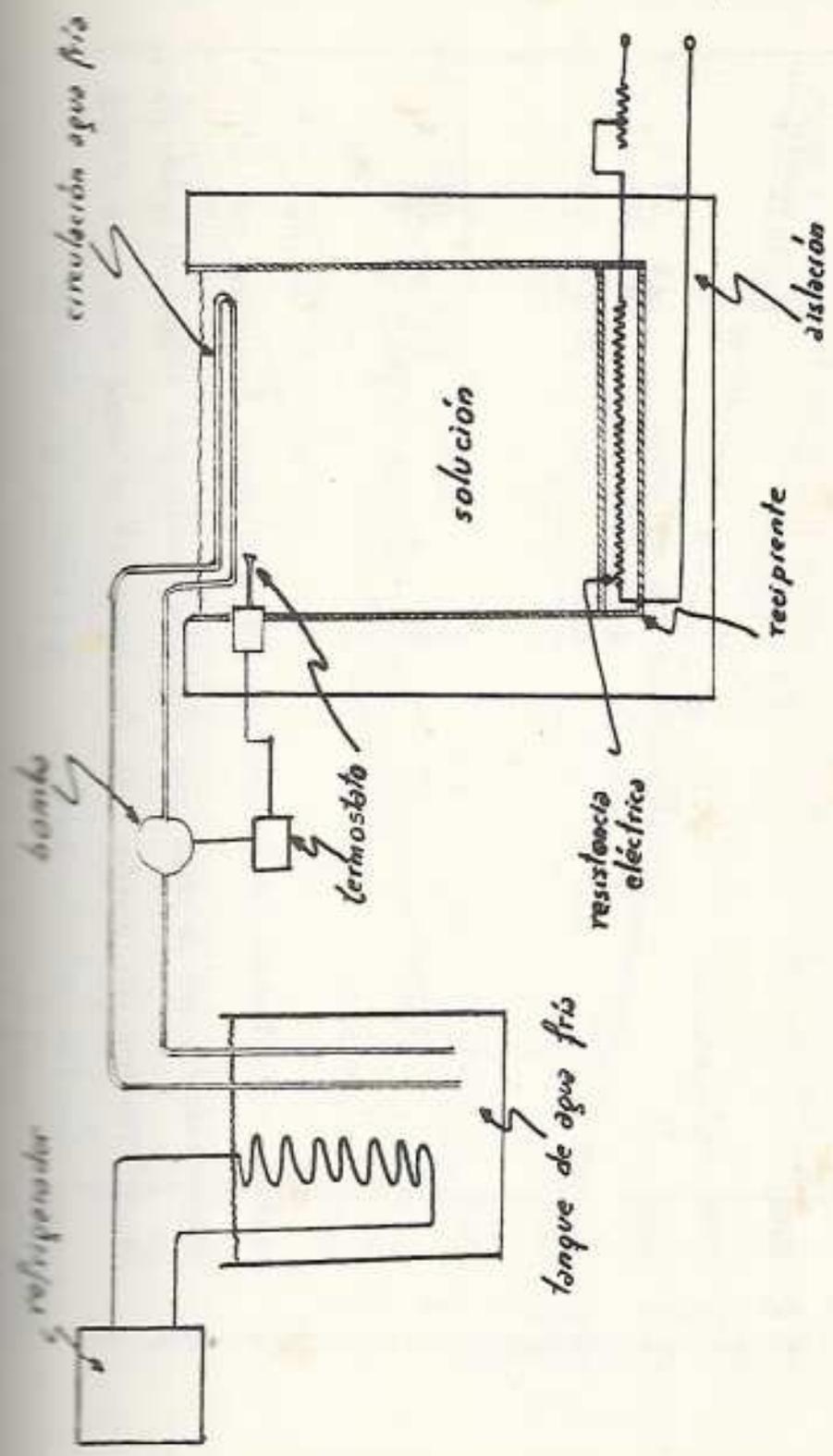


Figura 4. Esquema del modelo experimental de la poza

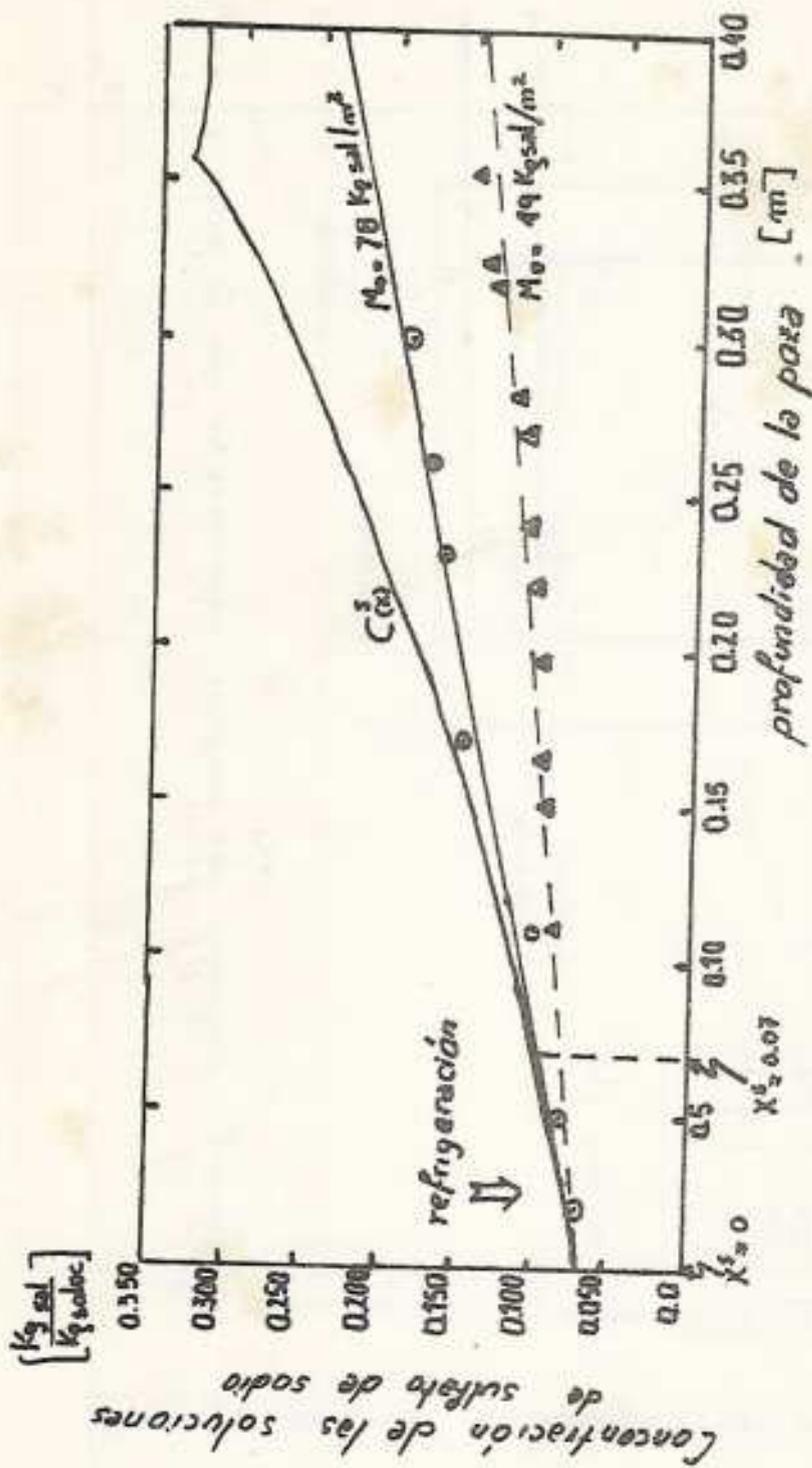


Figura 5. Medidas de concentraciones  $C(x)$  como funciones de la profundidad  $x$  de la poza para distintas cantidades totales de soluto  $M_0$ . Se determinan los puntos de tangencia  $x^s$  de cada  $C(x)$  con  $C^s(x)$ .

Con  $(T_E - T_S)/\ell = 69^\circ\text{C/m}$ ,  $T_S = 7.6^\circ\text{C}$ ,  $T_E = 35.2^\circ\text{C}$ .

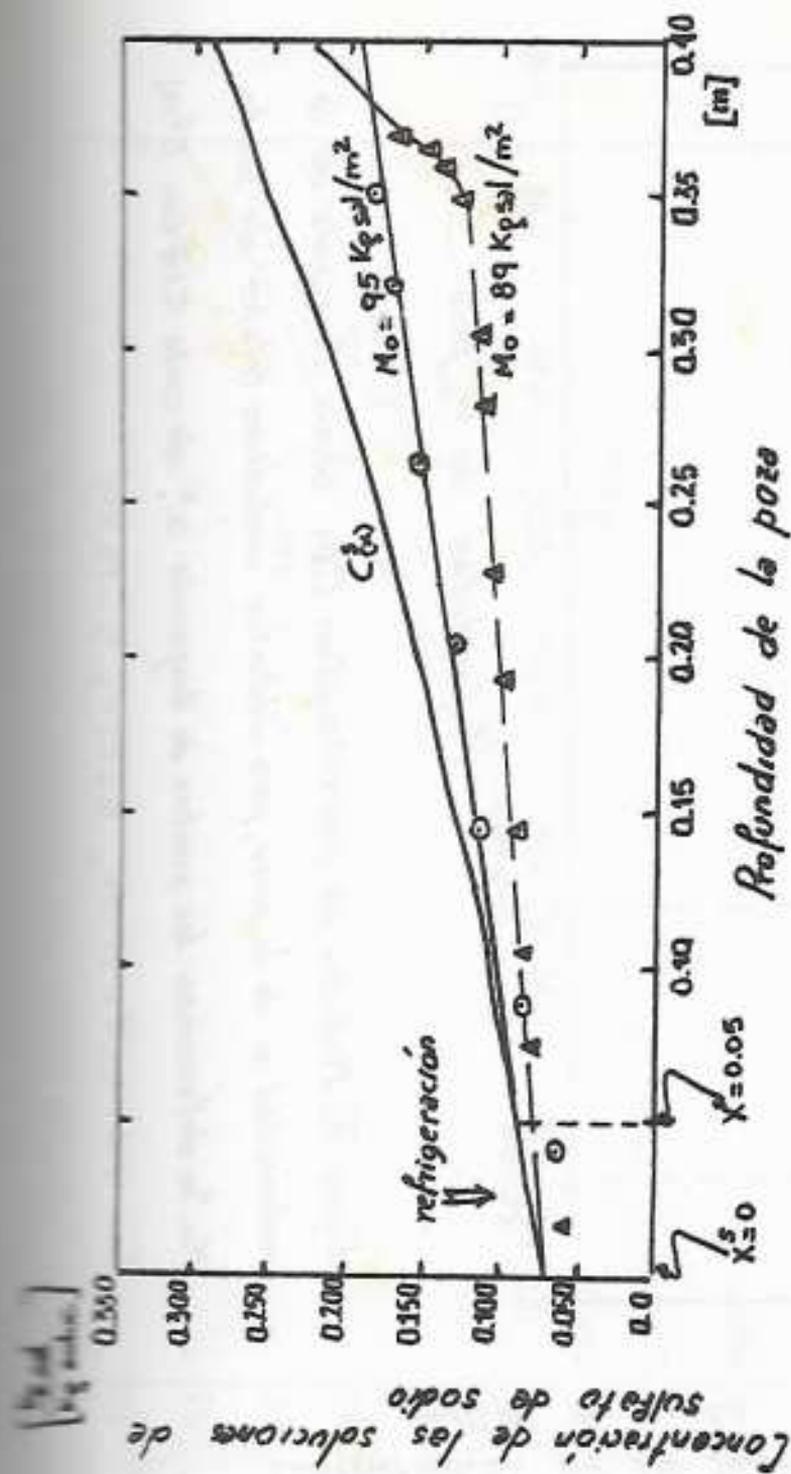


Figura 6. - Medidas de concentraciones  $C(x)$  como funciones de la profundidad  $x$  de la poza para distintas cantidades totales de soluto  $M_0$ . Se determinan los puntos de tangencia  $x^2$  de cada  $C(x)$  con  $C^3(x)$ .

Con  $(T_F - T_0)/\ell = 55^\circ\text{C}$ ;  $T_F = 30.2^\circ\text{C}$ ;  $T_0 = 0.3^\circ\text{C}$ .

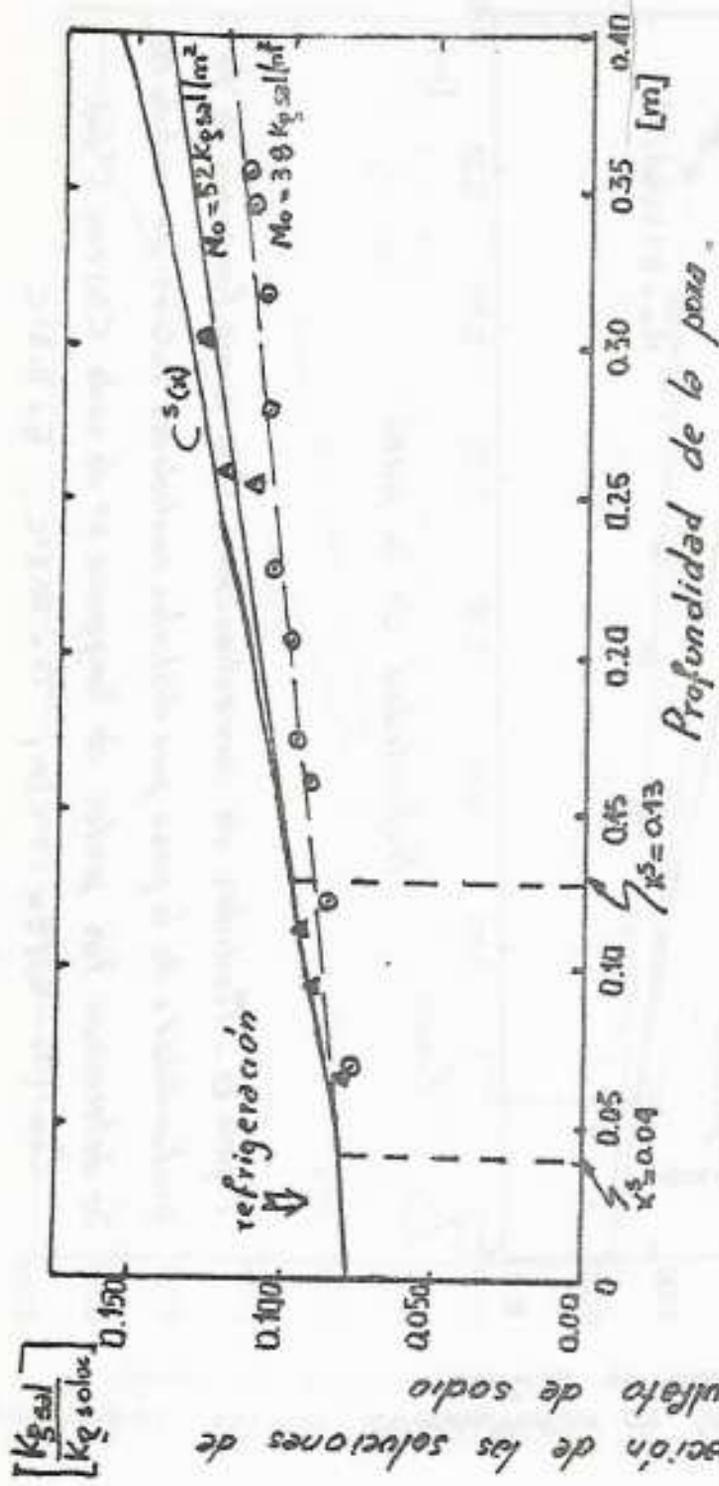
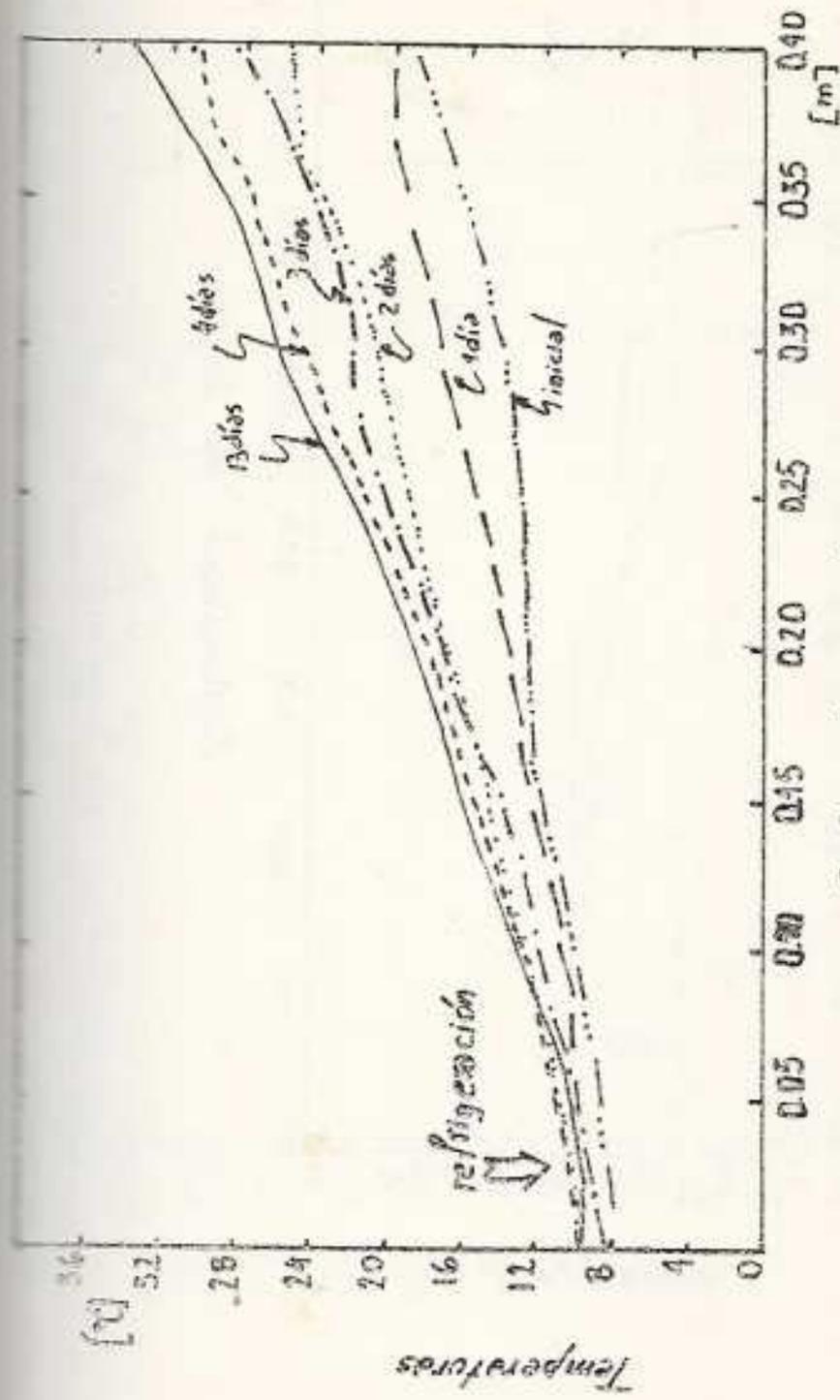


Figura 7. - Medidas de concentraciones  $C(x)$  como funciones de la profundidad  $x$  de la poza, para distintos cantidades totales de soluto  $M_0$ . Se determinan los puntos de temperatura  $x^s$  de cada  $C(x)$  con  $C^s(x)$  con  $(T_F - T_S)/\ell = 27^\circ\text{C}/\text{m}$ ;  $T_S = 8.7^\circ\text{C}$ ;  $T_F = 19.4^\circ\text{C}$ .



Profundidad de la poza

Figura 3. Perfiles de temperatura de la poza a lo largo de su evolución desde un estado estacionario a otro, con un suministro fijo de potencia  $Q_f$ .

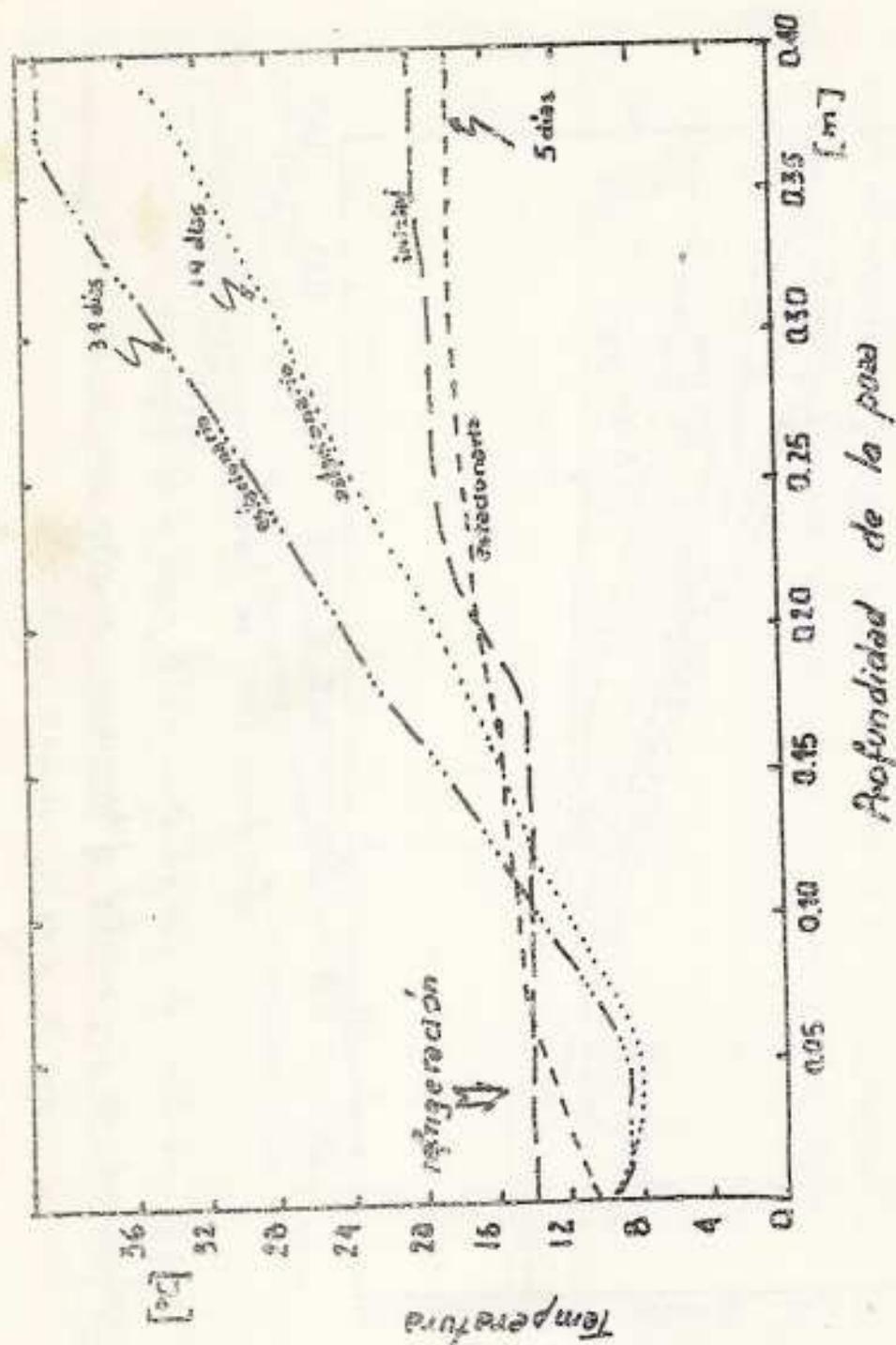


Figura 3. Perfiles de temperatura de la poza desde su llenado durante el calentamiento. Se indican los estratos estacionarios

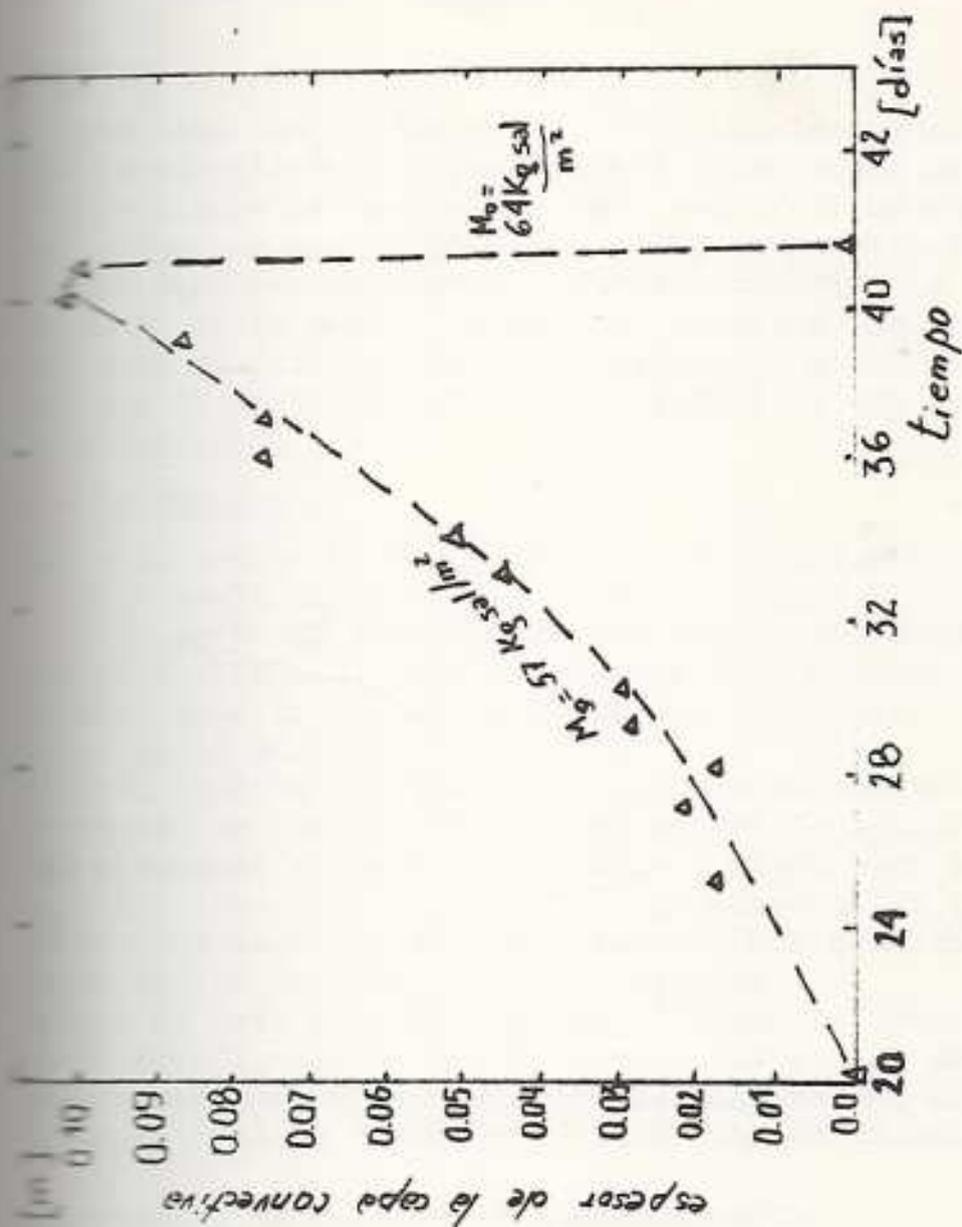


Figura 10.- Crecimiento de la capa convectiva en función del tiempo al aumentar  $T_F$  desde 36°C a 40°C. Se muestra la desaparición de la capa al aumentar la cantidad total de soluto  $M_0$ .