



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES**

**"CUAUTITLAN"**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL EFECTO  
DE LA LLUVIA EN LA PARTE SUPERIOR  
DE UN ESTANQUE SOLAR**

**TESIS PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A**

**FERNANDO Z. SIERRA ESPINOSA**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. JORGE M. HUACUZ VILLAMAR**

**CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO**

**MARZO 1985**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## INDICE

CAPITULO	PAGINA
1.- INTRODUCCION.....	3
2.- GENERALIDADES SOBRE ESTANQUES SOLARES.....	8
2.1 ANTECEDENTES .....	8
2.2 MODO DE OPERACION DE UN ESTANQUE .....	13
2.3 MODO DE CONSTRUCCION DE UN ESTANQUE.....	23
2.4 PAPEL DE LA ZONA CONVECTIVA SUPERIOR EN LA EFICIENCIA DEL ESTANQUE.....	26
3.- JUSTIFICACION Y OBJETIVOS DEL PRESENTE TRABAJO.....	29
3.1 EFECTO DE LA LLUVIA SOBRE EL ESTANQUE SOLAR.....	29
3.2 PARAMETROS QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO.....	35
3.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO .....	36
4.- METODOLOGIA DE TRABAJO .....	38
4.1 DESCRIPCION DE LOS EXPERIMENTOS POR REALIZAR.....	38
4.2 DESCRIPCION DEL METODO DE GENERACION DE LLUVIA....	41
4.3 DESCRIPCION DEL METODO DE VISUALIZACION DEL FLUJO CONVECTIVO .....	49
4.4 DESCRIPCION DEL SISTEMA DE MEDICION Y ADQUISICION DE DATOS.....	54
4.5 DESCRIPCION DEL METODO DE ESTRATIFICACION DE LA CURA .....	56

4.6 USO DEL EQUIPO .....	57
5.- DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL SISTEMA PARA GENERACION DE LLUVIA ARTIFICIAL.....	59
5.1 DISEÑO Y CALCULO DEL SISTEMA HIDRAULICO .....	59
5.2 DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA PLACA DE GOTEO .....	65
5.3 CARACTERIZACION DE LA PLACA DE GOTEADO.....	72
5.4 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACION .....	76
6.- DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL SISTEMA DE MEDICION Y ADQUISICION DE DATOS.....	84
6.1 SISTEMA DE CAPILARES .....	84
6.2 SENSOR DE CONDUCTIVIDAD .....	85
6.2.1 SISTEMA ELECTRONICO.....	88
7.- ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA INFLUENCIA DE LA LLUVIA EN EL ESTANQUE.....	92
7.1 DESCRIPCION DE LOS FENOMENOS OBSERVADOS .....	92
7.2 ANALISIS DE LA INFORMACION.....	105
8.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	156
9.- APENDICES .....	158
10.-REFERENCIAS.....	199
LISTA DE FIGURAS.....	202

## CAPITULO 1

### INTRODUCCION

Actualmente se considera a la tecnología de estanques solares como una alternativa viable para suministrar calor de origen solar a procesos de baja temperatura, incluyendo la producción de electricidad, a un costo relativamente bajo.

Un estanque solar con gradiente salino es un cuerpo de agua, en el cual se mantiene artificialmente un gradiente de densidad, positivo hacia abajo, mediante el uso de sales.

La energía solar que penetra en el agua es absorbida y establece un gradiente de temperatura, también positivo hacia abajo, el cual corre paralelo al gradiente salino. De esta manera se compensa con mayor concentración de sal la disminución de densidad debida al aumento de temperatura, impidiendo el movimiento natural convectivo.

Al no existir convección, (que es la causa principal de que un estanque no estratificado ceda calor al medio ambiente y de que su temperatura no se incremente), la energía térmica se va almacenando en el fondo del estanque, alcanzándose en ocasiones temperaturas mayores de 100°C (dependiendo del tipo de sal utilizada), mientras que la superficie se mantiene

prácticamente a la temperatura ambiente,

de esta forma únicamente se tienen pérdidas de calor por conducción en las paredes del estanque y a través de las capas que forman el gradiente.

En su estructura vertical el estanque se compone esencialmente de tres capas: Una zona convectiva superior (ZCS), una zona intermedia no convectiva (ZNC) que constituye propiamente el gradiente, y una zona convectiva inferior (ZCI) que es una gran capa establecida bajo la zona de gradiente y actúa como almacén térmico, aislado del medio ambiente por el gradiente arriba de ella.

Esta capa convectiva inferior generalmente tiene una concentración salina máxima en peso poco mayor que la última capa del gradiente no convectivo, dando como resultado un gradiente salino no saturado en el cual se presenta el fenómeno de difusión, proceso por medio del cual la materia es transportada de una parte del sistema a otra, como resultado de movimientos moleculares aleatorios. En consecuencia existe en el estanque una migración continua de sal hacia la superficie, por lo que es necesario mantener artificialmente el perfil de concentraciones, reemplazando la sal en el fondo (ZCI) mediante algunos de los métodos conocidos (1)\*.

La capa convectiva superior es inevitable en la superficie

del estanque, debido principalmente a que la superficie del agua se encuentra expuesta a la acción del medio ambiente, pero a su vez su presencia es indeseable desde el punto de vista de la eficiencia térmica del estanque, pues a medida que crece, lo hace a expensas de la zona no convectiva disminuyendo su capacidad de aislante, y provocando un aumento en la pérdida de calor por conducción hacia la superficie.

Suelen ser varias las causas que provocan el crecimiento de esta capa; entre las principales se encuentran: el viento, la evaporación y la lluvia.

En cuanto al efecto del viento se han hecho estudios y planteado diferentes soluciones, como el uso de sustancias gelatinosas (leles) colocadas sobre la superficie, que tienen la característica de evitar la formación de ondas, pero tienen el inconveniente de ser demasiado costosas, y traen problemas de absorción y difracción de los rayos solares en detrimento de la eficiencia térmica, aparte de los problemas de estabilidad del propio material.

En otros esquemas para la solución de este problema, se

---

† Los números encerrados en paréntesis indican

la referencia citada.

Propone el uso de mallas de material sintético, colocados también en la superficie, las cuales tienen la función de cortar o disminuir la longitud de las ondas creadas por el viento. Parece ser ésta la mejor solución y se emplean arreglos triangulares, cuadrados, circulares etc., de las mallas, para tratar de aumentar su eficiencia.

En torno al fenómeno de la lluvia hasta ahora no se han realizado estudios de ningún tipo, debido a que no se acepta generalmente que tal fenómeno tenga un efecto nocivo sobre la estratificación del estanque. Posiblemente esta actitud se deba a que la mayoría de los estanques han sido construidos en zonas donde la lluvia es poco frecuente. En consecuencia, se conoce poco sobre el efecto de ésta sobre un estanque solar.

Con el objeto de estudiar el comportamiento de los estanques en condiciones reales de operación en una zona de lluvias intensas, se construyó en los terrenos del IIE, en Cuernavaca, Mor., un estanque solar de 3 m x 4 m x 1.5 m a finales de 1982. La temperatura máxima alcanzada en este pequeño estanque durante los primeros meses de operación fué de 46 C, pero al presentarse las primeras lluvias, la ZCS incrementó su espesor de 20 a 30 cm. El espesor de esta capa llegó a un máximo de 80 cm, en un proceso lento pero continuo, cuando el estanque enfrentó la temporada fuerte de lluvia y no hubo nuevos intentos por reestablecer la zona de

gradiente.

Esto indujo a pensar que la lluvia ejerce un efecto negativo sobre el comportamiento térmico del estanque al propiciar el incremento de la ZCS, pudiendo ser el mecanismo de crecimiento un proceso de erosión turbulenta de las caras que forman el gradiente de concentración. La zona estratificada puede incluso llegar a romperse, y provocar un movimiento convectivo general en todo el estanque.

## CAPITULO 2

### GENERALIDADES SOBRE ESTANQUES SOLARES\*

#### 2.1 Antecedentes

En el periodo comprendido entre 1975 y 1984 el concepto de estanque solar ha evolucionado rápidamente alrededor del mundo, lo que ha dado origen a una variedad de tecnologías de captación solar en base a reservorios con agua. Entre los principales tipos de estanques se cuentan los siguientes:

- Estanques estabilizados por densidad
  - a) Saturados
  - b) No saturados
- Estanques estabilizados por viscosidad.
- Estanques estabilizados con geles
- Estanques convectivos profundos
  - a) Con cubiertas transparentes
  - b) Con aislamientos
  - c) Pigmentados

---

\* La mayor parte del material contenido en este

capítulo fue tomado de la referencia (1).

- Estanques estabilizados con membranas

La idea de utilizar un reservorio con agua y sales como convertidor de energía solar fué propuesta por primera vez en 1948 por el Dr Rudolph Bloch, director de investigaciones del Dead Sea Works en Israel. Su idea tuvo como base las observaciones hechas por el húngaro Von Kelecsinsky a principios de siglo en un lago estratificado por densidad en forma natural.

Las investigaciones teóricas y experimentales no se iniciaron sino hasta diez años después, y a una escala limitada, en el National Physical Laboratory de aquel país. A finales de 1958 se construyó en Jerusalén un pequeño estanque de unos cuantos metros cuadrados, y por primera vez se alcanzó una temperatura de 60 C en el fondo de un estanque artificial.

En septiembre de 1959 se habilitó a orillas del Mar Muerto, en Sodoma, una antigua laguna de evaporación de 625 m<sup>2</sup> de área y 1 m de profundidad, para ser usada como estanque solar. Los experimentos se interrumpieron en agosto de 1960 al desintegrarse las paredes del estanque que habían sido construidas 25 años atrás.

En 1960 se une a las investigaciones sobre estanque solares el Nesev Institute for Arid Zone Research también de Israel administrado por el National Council for Research and

Development. A partir de entonces se comienza a formular la teoría de los estanques solares. Así continuó el desarrollo tanto experimental como teórico hasta 1966, año en que se vio interrumpido debido principalmente a problemas financieros. En 1975 se reanuda las actividades con la construcción de un estanque de 1100 m<sup>2</sup> en los terrenos de la compañía Dead Sea Potash Works. Los experimentos realizados incluyeron por primera vez la extracción de calor de un estanque solar.

En 1964 Australia inicia las investigaciones sobre estanques solares con la construcción en Aserdale de un estanque de geometría piramidal truncada invertida de 10.29 m x 10.29 m en la superficie, 6.63 m x 6.63 m en el fondo y 86 cm de profundidad. El objetivo principal del proyecto fue la investigación de métodos para la producción de sal y duró dos años. Otro estanque de 2000 m<sup>2</sup> cerca de Alice Springs inicia su operación en 1981 y, sirve la energía captada por éste para operar una máquina generadora de electricidad de 10 Kw que alimenta un restaurant y una fábrica de vino.

Dos estanques convectivos profundos se construyen en 1982 en la Universidad de Queensland. Tienen 16 m<sup>2</sup> de superficie captadora cada uno y sus aguas solo están oscurecidas con tintas para absorber la luz del sol. La superficie contiene una capa de aceite transparente que impide la evaporación y tiene una estructura tipo canal en la parte superior para

evitar las perturbaciones del viento.

En 1980 en Arabia Saudita se construye un estanque de superficie hexagonal de 2.3 m de diámetro y 1.3 m de profundidad, destinado a la investigación.

Otro país que comienza en 1977 la investigación en modelos de laboratorio, para estudiar el comportamiento de estanque solares saturados, es Argentina y utilizan sulfato de sodio como agente estabilizador.

En Canadá comienzan los estudios en 1974 con un modelo de laboratorio de 40 cm de diámetro y 71 cm de profundidad, usando cloruro de magnesio para su estratificación. Posteriormente un estanque de 3.66 m de diámetro y 75 cm de profundidad dió información del cloruro de sodio como agente estabilizador. En 1979 las sales fueron usadas para estabilizar un modelo de laboratorio.

La India es otro país donde se han hecho investigaciones, las cuales comienzan en 1977 con un estanque estratificado por densidad y otro mas en 1978, ambos fueron modelos de laboratorio. Ya en 1980 construyen un estanque de 100 m<sup>2</sup> de superficie captadora y 2 m de profundidad.

Entre 1969 y 1973 la Unión Soviética llevó a cabo estudios para determinar algunos parámetros importantes en el comportamiento térmico, su estudio fué realizado a nivel laboratorio.

Los países que actualmente mantienen proyectos en desarrollo son principalmente; Israel, el cual tiene construida una planta para generación eléctrica con capacidad de 5 Mw, teniendo como fuente energética un estanque solar de 250 000 m<sup>2</sup> construido con salmuera del Mar Muerto. Dicha planta que empezó a funcionar a mediados de 1984 podría incrementar capacidad a 20 Mw en base a un estanque de 1 km<sup>2</sup>. A esto seguiría la construcción de una serie de unidades generadoras, de 50 Mw cada una, con sus respectivos estanques construidos a orillas del Mar Muerto.

Conforme el sistema se expande, a finales del siglo podría construirse un estanque de 500 km<sup>2</sup> que abasteciera a un grupo de plantas generadoras en módulos de 50 a 100 Mw, lo que representaría entre 20% y 30% de la capacidad futura de generación eléctrica en ese país.

Las investigaciones iniciadas en EUA primero con modelos de laboratorio en 1973 y posteriormente con estanques de hasta 2000 m<sup>2</sup>, con objeto tanto de estudiar el comportamiento como de aprovechar el calor en procesos de calentamiento, dió como resultado un programa que lleva a cabo el Departamento de Energía y que contempla:

a) Investigación y Desarrollo; b) Estanque solar en Salton Sea y c) Estudios de factibilidad para sitios específicos.

Todas estas actividades contempladas alrededor del mundo dictan la necesidad de un mejor entendimiento de los fenómenos básicos que ocurren en un estanque.

## 2.2 Modo de operación de un estanque solar

### 2.2.3) Mantenimiento, extracción de energía y operación

Una vez llenado, el estanque tarda algún tiempo en alcanzar las condiciones adecuadas de operación. Este periodo de calentamiento inicial varía según el tamaño del estanque, el estado del terreno y las condiciones climatológicas del lugar donde fué construido. En ocasiones se lleva hasta un año en alcanzar la máxima temperatura, como en el caso del estanque de la Universidad de Nuevo México en Estados Unidos. La fig. 1 muestra los periodos de calentamiento de las diferentes regiones de un estanque típico.

La extracción de energía con fines prácticos se lleva a cabo generalmente extrayendo de la ZCI la salmuera, sin perturbar la zona de gradiente. Esto es posible gracias a la dinámica tan particular de los fluidos estratificados. La salmuera se hace circular a través de un intercambiador de calor en donde cede su energía al fluido de trabajo del subsistema acoplado. La salmuera enfriada se reinyecta a la zona de almacenamiento del estanque (ZCI), para completar el ciclo. Este método se conoce como extracción por decantación. Otra forma consiste en colocar un intercambiador de calor en el interior de en la ZCI y llevar a cabo la termotransferencia dentro del estanque mismo. Este método presenta varios problemas para su aplicación, incluyendo la dificultad para localizar y restaurar fugas en el haz de tubos la complejidad de su

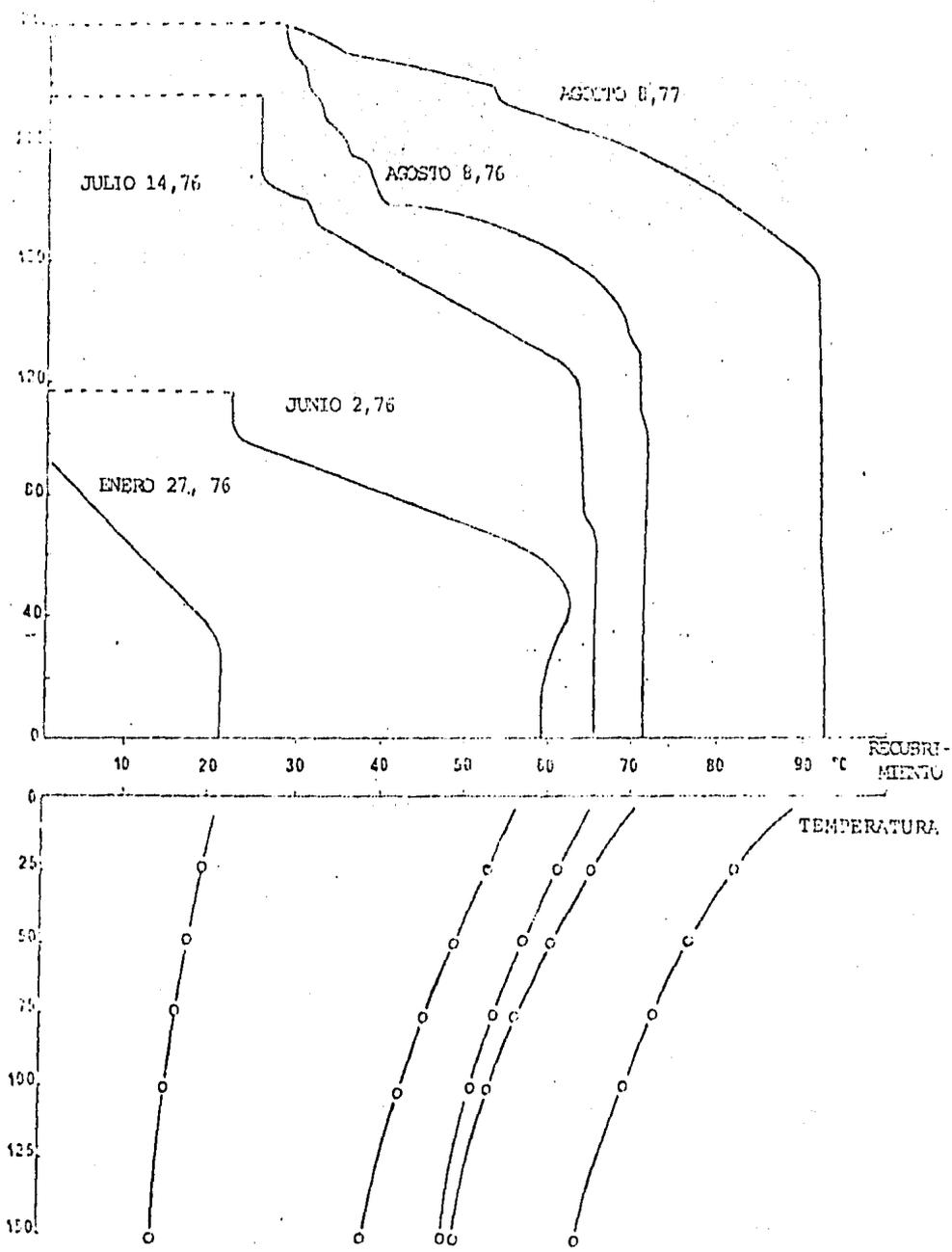


FIGURA 1 - PERFILES TIPOICOS DE TEMPERATURA EN UN ESTANQUE SOLAR

instalación y los altos costos del intercambiador. La fig. 2 muestra los diagramas correspondientes de ambos métodos.

Para mantener el gradiente de densidad en un estanque solar, deben controlarse las concentraciones de sal en la superficie y en el fondo. La rapidez con que la sal se difunde en forma natural desde el fondo (mayor concentración) hasta la superficie (menor concentración) es del orden de 60 a 80 g por metro cuadrado por día para casos típicos. Esto trae como consecuencia que, en general, la cantidad total de sal que se remueve del fondo a la superficie llague a ser considerable. Por ejemplo, el flujo total de sal por año, para un estanque de 1 km<sup>2</sup> es del orden de 20000 ton. Por lo tanto es necesario tomar medidas para reemplazar la sal que se pierde en el fondo, removiendo al mismo tiempo la sal que se gana en la superficie. Existen varios métodos propuestos con este propósito, una de los cuales es el método en cascada, que consiste en imprimir un movimiento vertical hacia abajo al fluido en el estanque, de tal forma que el flujo neto de sal a través de un plano paralelo a la superficie del estanque es cero. Esto se logra reconviniendo parte del agua de la zona de almacenamiento y manteniendo constante el inventario de sal. De esta forma no hay necesidad de agregar más sal al estanque en operación.

Para mantener constante la profundidad del estanque es necesario agregar agua pura (o agua de mar) en la superficie,

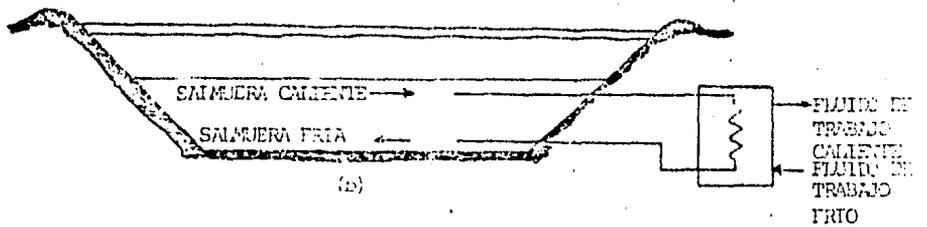
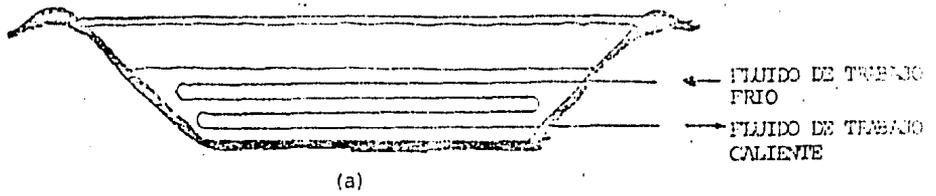


FIGURA 2 .- METODOS DE EXTRACCION DE ENERGIA EN UN ESTANQUE ESTABILIZADO POR DENSIDAD: a) .INTERCAMBIADOR SUMERGIDO; b) .INTERCAMBIADOR ENTERNO (EXTRACCION POR DECAANTACION).

teniendo cuidado en recuperar también el agua perdida por evaporación. El método de estanque en cascada para el mantenimiento del gradiente es compatible con el método de extracción por decantación. La fig 3 muestra un diagrama esquemático de los principios de operación de este método y se observa que puede considerarse como base para una planta de propósito múltiple, en la que se contempla la extracción de energía y la producción de agua dulce a partir de agua de mar.

### 2.2.b) Eficiencia

La eficiencia de un estanque solar ( $\eta$ ) puede expresarse como el cociente de la energía útil extraída del estanque ( $E_u$ ) dividida entre la energía incidente en la superficie efectiva del estanque ( $E_i$ ), esto es:

$$\eta = E_u / E_i \quad 2.1$$

La energía útil extraída del estanque es a su vez proporcional a la energía útil acumulada ( $E_{ua}$ ) en la zona convectiva inferior del estanque:

$$E_u = F_r E_{ua} \quad 2.2$$

donde  $F_r$  es un factor de proporcionalidad que engloba todas las ineficiencias asociadas con los métodos de extracción de energía.

Por otro lado la energía útil acumulada es igual al balance entre la energía que llega a la zona convectiva inferior ( $E_{zci}$ ), la energía que se pierde en forma de calor en esa misma zona ( $E_p$ ), y la energía que se transmite en forma radiante ( $E_t$ ).

$$E_{ua} = E_{zci} - E_p - E_t \quad 2.3$$

Si se define un factor ( $\tau$ ) como la fracción de la energía

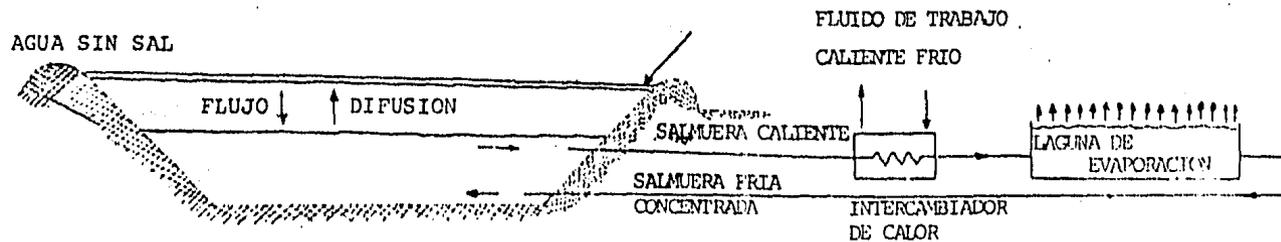


FIGURA 3 .- PRINCIPIO DE OPERACION DE UN ESTANQUE EN CASCADA. LA LAGUNA DE EVAPORACION PUEDE SUSTITUIRSE POR UNA PLANTA DE DESALACION.

que se transmite desde la interfaz aire-agua, en la superficie del estanque, hasta la ZCI entonces el producto  $(\tau E_i)$  representará el total de energía que llega a la zona convectiva inferior del estanque, tomando en cuenta las reflexiones de Fresnel en la interfaz aire-agua y la extinción en las zonas de gradiente y convectiva superior; esto es:

$$E_{zci} = \tau E_i \quad 2.4$$

Por otro lado si  $(\alpha)$  es la fracción de la energía radiante que se absorbe en la zona convectiva inferior, entonces la energía radiante transmitida a través de esa zona estará dada por:

$$E_t = (1 - \alpha) E_i \quad 2.5$$

Sustituyendo (4) y (5) en (3) tenemos:

$$E_{ua} = [\tau - (1 - \alpha) \tau] E_i - E_r = \alpha \tau E_i - E_r \quad 2.6$$

Sustituyendo (6) y (2) en (1) tendremos que la eficiencia del estanque estará dada por:

$$\eta = Fr [\alpha \tau - E_r/E_i] \quad 2.7$$

A las temperaturas de operación de la zona convectiva inferior aunadas a la propiedad del agua de ser opaca a las radiaciones infrarrojas, y dada la naturaleza no convectiva de la zona de gradiente, las pérdidas térmicas de la ZCI del estanque ocurren esencialmente por difusión térmica, en proporción directa a la diferencia de temperaturas entre la ZCI y el medio ambiente. Así pues las pérdidas térmicas por unidad de área en la ZCI pueden representarse por:

$$E_p = U \Delta T \quad 2.8$$

donde U es el coeficiente de transferencia de calor y  $(\Delta T)$  la diferencia de temperaturas entre la ZCI y el medio ambiente.

Si denotamos por  $I_o$  la energía incidente por unidad de área sobre la superficie del estanque, la ecuación de la eficiencia puede finalmente escribirse como:

$$\eta = Fr [ (\alpha \tau) - U \Delta T / I_o ]$$

En la fig 4 se puede observar el balance térmico de un estanque solar típico, en el cual alrededor del 65% de la energía recibida en la superficie del estanque se absorbe en las primeras zonas, y del total sólo entre el 15% y el 20% es energía útil colectada en la ZCI. Una vez que se ha saturado térmicamente el suelo abajo del estanque, éste actúa como

almacén de energía, cediendo calor en los periodos de baja insolación. Las pérdidas de calor a través de las paredes, pueden llegar a ser significativas, especialmente en estanques pequeños.

## 2.3 Modo de construcción de un estanque

### 2.3.1 Formación del Gradiente.

Suelen construirse los estanques en diferentes configuraciones: rectangulares, cuadrados, circulares etc. y con paredes inclinadas o verticales; de forma piramidal truncada o de prisma circular truncado. La potencia calorífica del estanque depende directamente del tamaño de la superficie captadora. La configuración más usual es la rectangular con paredes inclinadas. El tener las paredes así ofrece la ventaja de que la compactación requerida en el suelo para evitar asentamientos es mucho más fácil de llevarse a cabo. El fondo y las paredes suelen recubrirse con arcillas o materiales plásticos para evitar filtraciones e infiltraciones. Los plásticos son los más usados debido a su economía con respecto a las arcillas.

Para formar el gradiente existen básicamente dos métodos aparte del natural (2); en el cual sólo basta depositar un líquido muy ligero (agua pura) sobre una capa de líquido pesado (salmuera al 23%) y la sal se irá difundiendo hacia arriba hasta formarse un perfil de concentraciones. El problema es que este método lleva mucho tiempo en realizarse.

Un método alternativo es el de redistribución(3), el cual consiste en llenar a una altura dada el estanque con salmuera a la máxima concentración y con la ayuda de un difusor

ENERGIA SOLAR

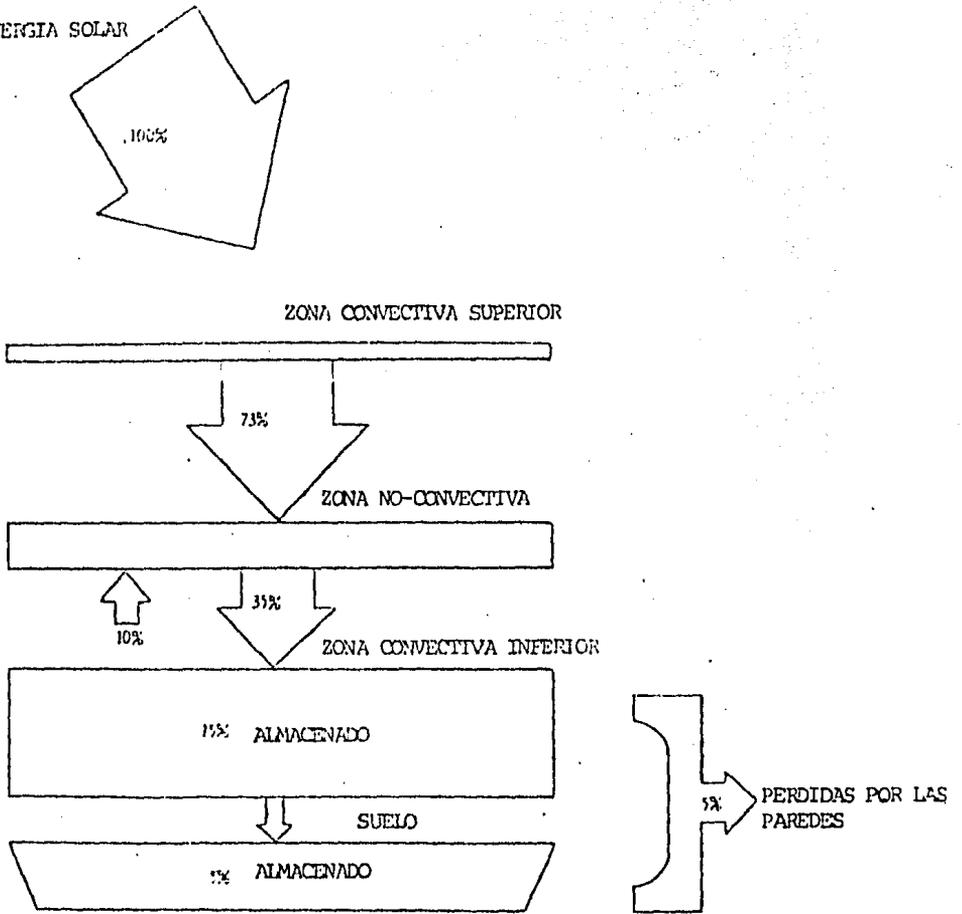


FIGURA 4 - BALANCE ENERGETICO DE UN ESTANQUE SOLAR TIPOICO

horizontal inyectar agua limpia a la altura de la primera capa arriba de la ZCI. Para formar las siguientes capas se repite la operación agregando la cantidad suficiente de agua para formar la capa en cuestión. Tanto el difusor como el nivel de la superficie libre se irán desplazando hacia arriba hasta completar el gradiente.

Un segundo método alternativo, conocido como el método de capa por capa, consiste en preparar con la ayuda de equipo periférico las salmueras de concentración correspondiente a cada capa, comenzando con la ZCI y terminando con agua limpia o salmuera de muy baja concentración en la superficie.

La aplicación de uno u otro depende básicamente del tamaño del estanque. Un estanque pequeño sería afectado por el desplazamiento de un difusor y un estanque grande requeriría de la preparación de cantidades inmensas de salmuera para formar cada capa.

### 2.3.2 Tipos de sales para la formación del gradiente

Cualquier sal así como cualquier salmuera natural puede ser usada para construir un estanque solar. El criterio para la selección de una sal en particular puede basarse en los siguientes factores:

- 1.- Debe asegurarse su manejo y disponer de una evaluación correcta de los problemas asociados con la intoxicación y contaminación de aguas subterráneas.

- 2.- Debe ser barata y fácilmente disponible; la proximidad de una gran fuente de sal en particular influirá bastante en la elección.
- 3.- No debe afectar las características de transmisividad óptica del agua. Las sales en cuyo seno aumenta el desarrollo de microorganismos y coloides deben ser evitadas, así como aquellas que provocan un cambio de coloración en el agua.
- 4.- Existen sales cuyo índice de solubilidad depende fuertemente de la temperatura, hasta el grado de reducir o eliminar la difusión. Con este tipo de sal un estanque saturado podría tener un gradiente estable sin difusión.

Los cloruros de magnesio y sodio satisfacen solamente los criterios 1, 2 y 3; Otras sales que tienen excelente dependencia de la temperatura no satisfacen las condiciones necesarias restantes.

#### 2.4 Papel de la Zona Convectiva Superior

La capa convectiva en la superficie es el resultado de factores tales como el viento y las variaciones en la entrada y salida de calor en la superficie del estanque. Minimizando estos efectos, mediante cubiertas transparentes o rompevientos, la región convectiva en la superficie disminuye y prácticamente desaparece.

Por el contrario, si la velocidad e intensidad del viento se incrementan, la capa convectiva de la superficie crece en tal forma que el espesor de la zona de gradiente se reduce, llegando en ocasiones a romper la estabilidad del estanque. Es posible también que vientos fuertes y prolongados induzcan oscilaciones en todo el estanque, lo que puede dar origen a otros fenómenos, tales como la convección cerca de las paredes del estanque, que lleven a la total desestabilización del sistema. Se han llegado a observar estanques solares con capas mezcladas hasta de 50 cm de espesor en la superficie, después de tormentas fuertes.

La capa convectiva superior es una característica indeseable de los estanques solares, ya que puede llegar a disminuir la eficiencia del sistema. Al ocurrir la convección en la parte superior, la capacidad aislante del agua se pierde; por otro lado, ya que casi la mitad de la radiación solar se absorbe en los primeros centímetros de la columna de agua, lo cual produce un efecto pseudoaislante en la capa no convectiva al ocurrir la convección, toda esa energía se pierde inmediatamente al medio ambiente. Investigadores en Israel aseguran que un estanque solar de 120 cm de profundidad con una zona mezclada de 20 cm en la superficie, proporciona 30% menos energía que uno con las mismas dimensiones sin la capa mezclada de la superficie. Como se mencionó antes, las perturbaciones en la superficie del estanque y consecuentemente

la ZCS se pueden eliminar, pero el costo de los materiales y la atenuación de la radiación, causada por los mismos, pueden resultar contraproducentes.

## CAPITULO 3

### JUSTIFICACION Y OBJETIVOS DEL PRESENTE TRABAJO

#### 3.1.- Efecto de la lluvia sobre el comportamiento del estanque

Durante los primeros meses de operación, el pequeño estanque construido en el IIE alcanzó una temperatura máxima de 46 °C en el fondo. Como ya hemos dicho, después de afrontar la temporada fuerte de lluvias, la zona convectiva superior alcanzó un espesor de 80 cm; lo que provocó el rápido enfriamiento del estanque. La figura 5 muestra los perfiles de temperatura y concentración al inicio de la temporada de lluvias.

Mediante una correlación entre la cantidad de lluvia que cae y el comportamiento de la capa superficial, se podría concluir que la lluvia podría tener un efecto negativo sobre el comportamiento del estanque (4), y podría crear serios problemas de mantenimiento en estanques situados en áreas tropicales.

El clima en la ciudad de Cuernavaca está clasificado como tropical lluvioso, con una temperatura media superior de 22 °C, y un promedio de 18 °C durante el mes más frío del año; el

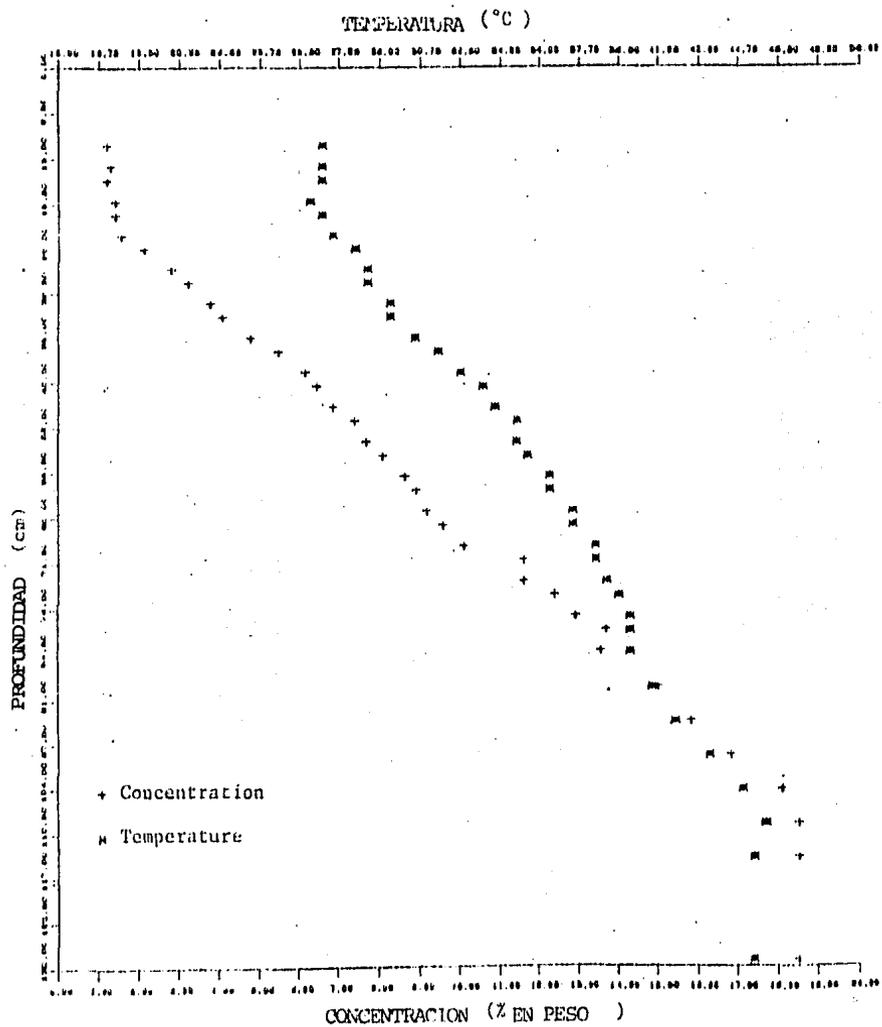


Fig. 5 Perfiles típicos de Temperatura y Concentración del es tanque solar del IIE. (May 81)

mes caliente ocurre antes de Junio.

La precipitación ocurre principalmente durante los meses de verano y el total anual es en promedio de 1140 mm. La fig 6 muestra la precipitación pluvial en la ciudad durante los primeros ocho meses de 1983.

La evaporación anual excede en aproximadamente 600 mm a la precipitación, siendo mayor durante los meses de marzo, abril y mayo, como se muestra en la fig 7.

La información presentada en las figuras 5 y 6 se obtuvo de una estación climatológica localizada aproximadamente 7 km al norte del sitio del estanque y la altitud es alrededor de 500 m mayor. Estos datos solo se dan para ilustrar las tendencias generales en el área. Las velocidades del viento en el sitio del estanque son muy bajas, del orden de 1.5 m/seg en promedio, excepto durante los meses de invierno en los que se pueden medir valores pico hasta de 10 m/seg.

En la fig 8, tomada de la referencia 4, aparece el comportamiento de la zona convectiva superior y el movimiento de la zona de interfaz entre la ZCS y la ZNC. Las variaciones en la posición de la interfaz se atribuyen principalmente a la evaporación durante la época seca, y a la precipitación pluvial (o a una combinación de ambas) durante la época de lluvias. Los efectos del viento se consideran mínimos, dadas las bajas velocidades en el lugar del estanque. Sin embargo las caídas mas fuertes en la posición de la interfaz ocurrieron despues de los periodos de hasta 3

CUERNAVACA, MORELOS  
PRECIPITACION PLUVIAL  
1983

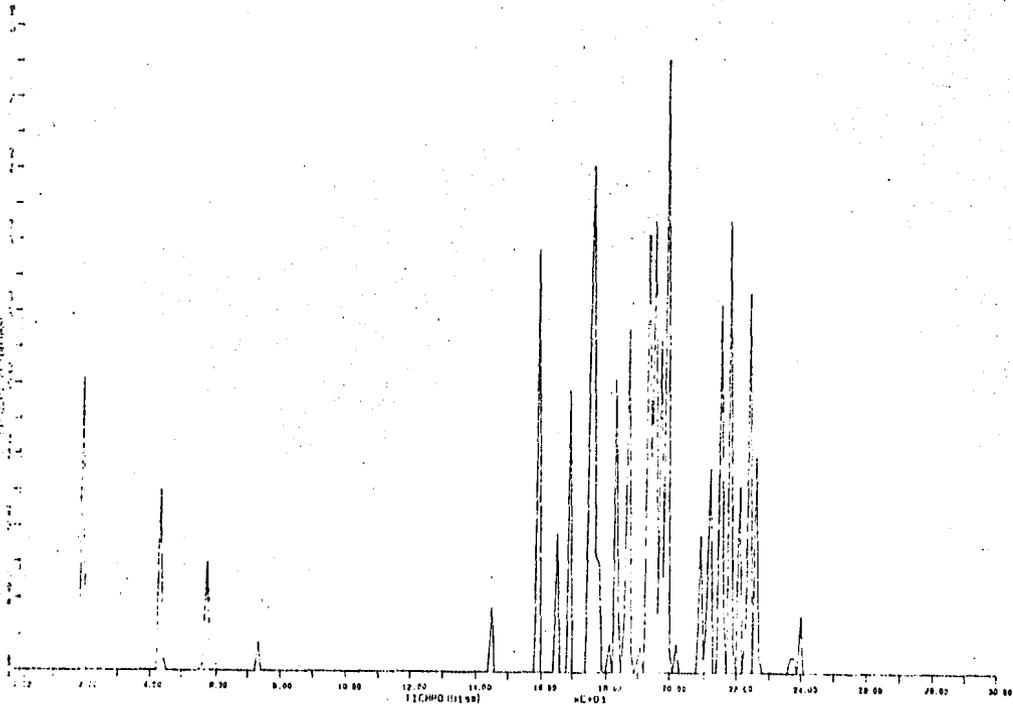


Fig. 6 Precipitación Pluvial en Cuernavaca Mor.

CUERNAVACA, MORELOS  
EVAPORACION  
1983

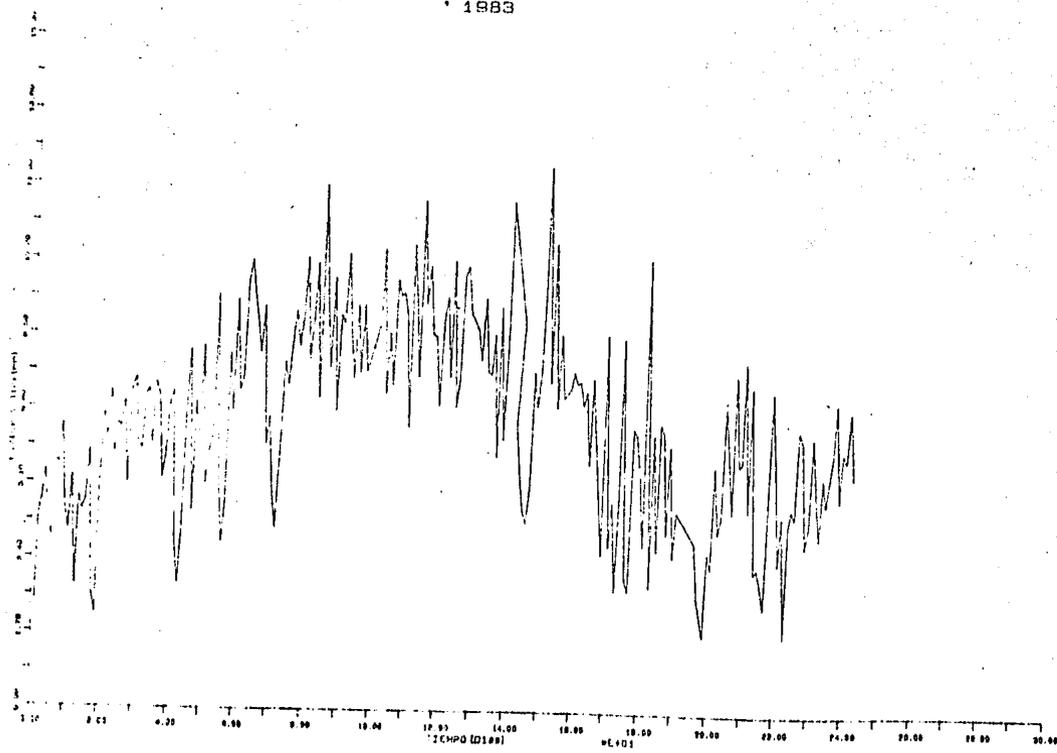


Fig. 7 Evaporación en Cuernavaca Mor.  
33

ESTANQUE SOLAR EXPERIMENTAL I.I.E  
COMPORTAMIENTO DE LA ZONA CONVECTIVA SUPERIOR  
Y MOVIMIENTO DE LA INTERFAZ ZCS / ZNC

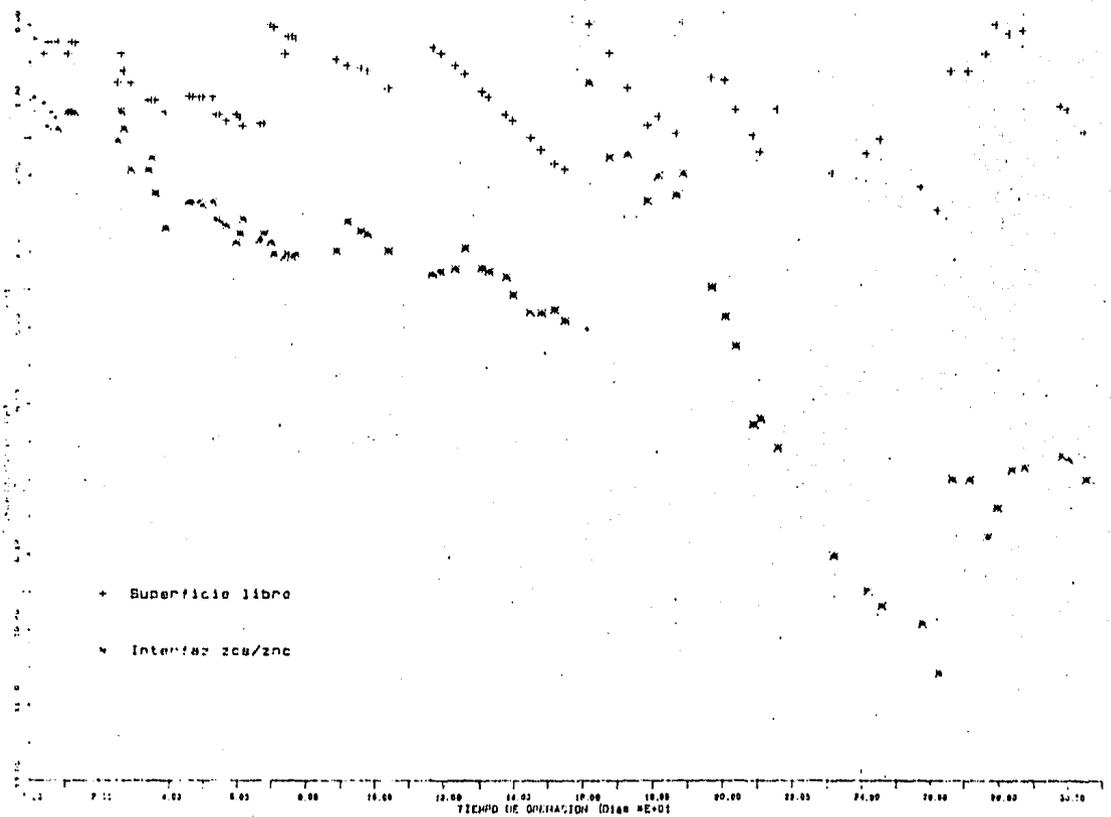


Fig 8 Comportamiento de la ZCS y movimiento de laZI  
34

días consecutivos de lluvias y nublados.

### 3.2 Parámetros que intervienen en el Proceso

Dado el cúmulo de experiencias obtenidas con el estanque experimental, lo que induce a pensar que efectivamente la lluvia actúa como elemento destructor del gradiente, existe la necesidad de aislar el fenómeno para estudiarlo a fondo. No se puede afirmar que el efecto y las variaciones de la ZCS, registradas durante esas experiencias se atribuyen totalmente a la lluvia; pues existieron otros fenómenos cuya influencia pudo ser considerable. Por lo tanto es de vital importancia seleccionar los parámetros que deben fijarse a fin de tener control sobre éstos y llegar a resultados que respondan únicamente al fenómeno de la lluvia.

Es posible que la erosión de las capas que forman el gradiente sea resultado de la acción de turbulencias que se propagan a través de la ZCS, provocadas por la penetración de las gotas con determinada velocidad y masa, contenidas en una lluvia de cierta duración. Esto implica la necesidad de conocer el efecto de la velocidad de gotas y el diámetro de las mismas sobre el comportamiento del estanque. De igual importancia resulta conocer el tiempo de duración de la lluvia, para conocer la cantidad total de agua que recibe el estanque y determinar el transporte de momentum hacia el

interior del gradiente.

Dada la imposibilidad de controlar estos parámetros en la naturaleza se optó por realizar experimentos a nivel de laboratorio.

Los resultados de dichos experimentos han de dar lugar a planteamientos más ciertos sobre el efecto de la lluvia en la zona convectiva superior de un estanque solar y cimentarán de una manera confiable el desarrollo de una posible teoría, misma que habrá de nutrirse de una cantidad considerable de experimentos bajo condiciones controladas.

### 3.3 Objetivos del presente trabajo.

Los objetivos obedecen básicamente a tres aspectos primarios: El primero es la construcción de un sistema que, en unión de elementos primarios y auxiliares, nos permita simular las condiciones en que se presenta el fenómeno de la lluvia sobre un estanque solar.

La caracterización de los equipos es imprescindible para tener una alta confiabilidad de que los resultados puedan ser cuantificados.

Esta parte incluye el montaje de equipos que obedecen a técnicas de observación visual y medición cuantitativa del comportamiento del gradiente en el estanque solar.

El segundo aspecto es el referente a la realización de experimentos mediante el uso del equipo ya caracterizado y calibrado.

Por último se hará una interpretación lógica de los resultados obtenidos en dichos experimentos. Se sacará en conclusión si efectivamente existe un efecto negativo de la lluvia sobre el gradiente y se harán recomendaciones pertinentes sobre los aspectos a superar sobre el presente trabajo.

## CAPITULO 4

### METODOLOGIA DE TRABAJO

#### 4.1 Descripción de los experimentos realizados

Para determinar el efecto de la lluvia sobre un estanque solar, se debe analizar el fenómeno aislado de otros que pudieran interferir en los resultados.

Para llevar a cabo los experimentos se construyó un modelo de estanque solar de dimensiones 0.45 m x 0.45 m x 1.50 m, en un material plástico transparente, creando una zona estratificada y una convectiva superior a manera de simular en profundidad un estanque a plena escala.

Sobre este modelo se descargó una lluvia artificial, de características conocidas, producida por un equipo diseñado y construido especialmente con este propósito.

Se midió el desplazamiento de la zona de interfaz entre la ZCS y la ZNC, determinando los perfiles de concentración antes y después de los experimentos.

La temperatura es sumamente importante para un estanque solar, pues aún cuando representa un índice de aprovechamiento y buen funcionamiento de esta tecnología,

también actúa como un agente desestabilizador del gradiente. En los experimentos realizados se optó por trabajar en condiciones lo más isotérmicas posibles, por lo que el modelo físico de estanque solar construido se mantuvo a la sombra durante los experimentos y alejado de fuentes intensas de calor. La temperatura ambiente se mantuvo en un rango lo más estable posible. Se eliminaron perturbaciones por viento al evitar corrientes y se constató que la evaporación es baja en periodos cortos de tiempo dentro del laboratorio.

La placa de goteo construida para generar la lluvia, acoplada a un sistema hidráulico, fué caracterizada con la ayuda de técnicas de fotografía y análisis de imágenes por computadora. Una vez conseguido esto se fijaron las condiciones iniciales para realizar varias corridas de un sólo experimento.

Dadas las restricciones de tiempo para los experimentos que aquí se reportan se seleccionó únicamente una condición de lluvia para un tamaño y velocidad de las gotas incidentes y se varió el tiempo de duración de la precipitación.

Antes y después de cada corrida se tomaron lecturas del estado del gradiente de concentración, utilizando para este efecto un sensor de conductividad eléctrica, cuyo diseño y construcción serán descritos en capítulos posteriores.

Para visualizar los fenómenos que ocurren en el interior del estanque se utilizó la técnica de estudio de sombras, basada

en los cambios del índice de refracción de la luz al variar la concentración en la salmuera. Esta técnica será descrita en detalle mas adelante.

El empleo de esta técnica resulta muy útil para observar visual e instantáneamente los resultados de los experimentos. El lapso de tiempo transcurrido entre una corrida y otra fué de aproximadamente 24 horas. Los resultados cuantitativos del cambio de concentración en el gradiente y en especial en la zona convectiva superior y en la zona de interfaz, dados por el sensor de conductividad en volts, fueron ajustados a la curva de calibración del mismo para obtener la información en % de concentración salina.

El trazo de gráficas de profundidad contra concentración se efectuó para tener la historia de los cambios ocurridos en la zona de interfaz. Finalmente se hizo una correlación entre los parámetros de la lluvia y la magnitud y la tasa de cambio de la posición de la interfaz entre la ZCS y la ZNC.

## 4.2 Descripción del método de generación de lluvia

### 4.2.1 Generalidades

En la naturaleza, la precipitación o lluvia se produce como resultado de la condensación que ocurre al enfriarse el aire hasta la temperatura de rocío y presentarse los núcleos apropiados para iniciar el proceso de la formación de gotas dentro de la nube (5). Esta disminución en la temperatura normalmente se debe a un desplazamiento hacia arriba de una gran masa de aire.

La condensación de las nubes probablemente no tendría lugar sin una pérdida considerable en el grado de sobresaturación. A medida que la humedad relativa excede el 100% , la condensación ocurre primero sobre el núcleo higroscópico mayor, pero si continúa, la condensación, reúne también a innumerables núcleos pequeños, con el resultado de que las gotas individuales de la nube son también pequeñas y no alcanzan a caer a tierra como lluvia, pues hasta un ligero ascenso de aire puede mantenerlas suspendidas.

Aún si cayeran con un nivel bajo de condensación, podrían ser evaporadas antes de alcanzar el suelo. Se comprende esto ya que puede haber muchos días con nubes en los cuales no ocurra precipitación.

El factor principal del proceso de precipitación es la combinación de grupos de pequeñas gotas de nube en gotas grandes capaces de caer a la tierra. Se han propuesto dos mecanismos de precipitación que provocan esta combinación para formar la lluvia:

El primer mecanismo es el resultado de la inestabilidad de la nube debida a la coexistencia de gotas de agua y partículas de hielo en una nube a temperaturas abajo de 0°C.

Para que ocurra una cantidad considerable de precipitación en ese instante, el aire ascendente debe elevarse arriba del nivel de congelamiento, donde algunas de las gotas líquidas se transformarán en hielo y donde también se puede resistir la sublimación directa (hielo a vapor de agua).

La diferencia en la presión de vapor en el contorno de las gotas líquidas y alrededor de las partículas de hielo, trae como consecuencia la evaporación de las gotas líquidas y la consecuente condensación sobre las partículas de hielo.

Cuando el agua continúa acumulándose alrededor de los núcleos de hielo la gota alcanza un tamaño tan grande que no pueda ya ser sostenida por las corrientes ascendentes. Entonces empieza a caer primero dentro de la nube y después a través del aire inferior hacia la superficie de la tierra o agua. A menos que se rompa por la velocidad de su descenso, la gota continúa acrecentándose hasta que deja la nube.

La mejor evidencia de que este mecanismo opera como se describe es la repentina liberación de precipitación cuando una nube cumulus crece y forma una cumulonimbus, y después alcanza el nivel de glaciación. La glaciación de la parte superior de la nube cambia su forma, de la típica de hervor a una de figura plana, y se produce la precipitación.

El segundo mecanismo que se cree causa la precipitación ocurre sin la presencia de partículas de hielo. Involucra simplemente el choque de gotas de varios tamaños, choques que se producen al estar cayendo a diferentes velocidades dentro de la nube. Así, la tasa de crecimiento con este proceso depende bastante del tamaño, la distribución y la concentración de las gotas.

Una gota de lluvia bien determinada contiene agua en cantidades alrededor de 5 a 10 millones de partículas de las que constituyen la nube, y cae aproximadamente doscientas veces más rápido que dichas partículas.

Los parámetros importantes de una tormenta lluviosa son cuatro: Intensidad, duración, frecuencia de ocurrencia y extensión de área.

La intensidad de lluvia y su duración son de vital interés y, como una regla, la intensidad principal decrece al incrementarse la duración. El promedio de tiempo dentro del

cual una lluvia (de rango o intensidad específicos) puede suponerse que ocurre una vez en un periodo de tiempo dado; se conoce como frecuencia o intervalo de ocurrencia y su determinación se basa en métodos estadísticos y teorías de probabilidad.

El promedio total de altura de una lluvia, sobre el área de una tormenta, normalmente disminuye con el aumento del área tributaria; pero su intensidad se incrementa con la disminución de la duración de la lluvia.

Las concentraciones de gotas de lluvia típicamente se encuentran en un rango de 100 a 1000 por metro cúbico; sin embargo considerando gotitas de llovizna, generalmente es más numerosa (6).

Las gotas de lluvia raramente tienen diámetros mayores de 4 mm, porque si crecen en tamaño empiezan a ser inestables y se dispersan. La concentración de gotas de lluvia generalmente decrece cuanto más se incrementan los diámetros.

Algunas fuentes revelan que el tamaño máximo al que una gota de lluvia puede crecer es alrededor de 5 mm en diámetro, y su velocidad de caída llega a ser de 8 m/seg; arriba de éste tamaño y velocidad las gotas comienzan a romperse.

Se asegura que en general las gotas de lluvia son normalmente grandes, de 5 mm de diámetro, y caen en aire tranquilo a velocidades de 3 m/seg.

Por otro lado se plantea la posibilidad de la existencia de gotas mayores, de 6 mm de diámetro, cuya velocidad final alcanzada puede ser de 10 m/seg y pueden causar una compactación y erosión considerable en el suelo por la fuerza de su impacto (7).

En la fig 9 se presentan las características de las gotas de lluvia de acuerdo a lo que se reporta en la literatura. La dispersión de los datos es evidente, por lo que, con propósitos del presente estudio, se definió la región triangular sombreada como el lugar de coordenadas con mayor probabilidad de representar las condiciones de la lluvia en la naturaleza.

#### 4.2.2 Generación de lluvia en el laboratorio

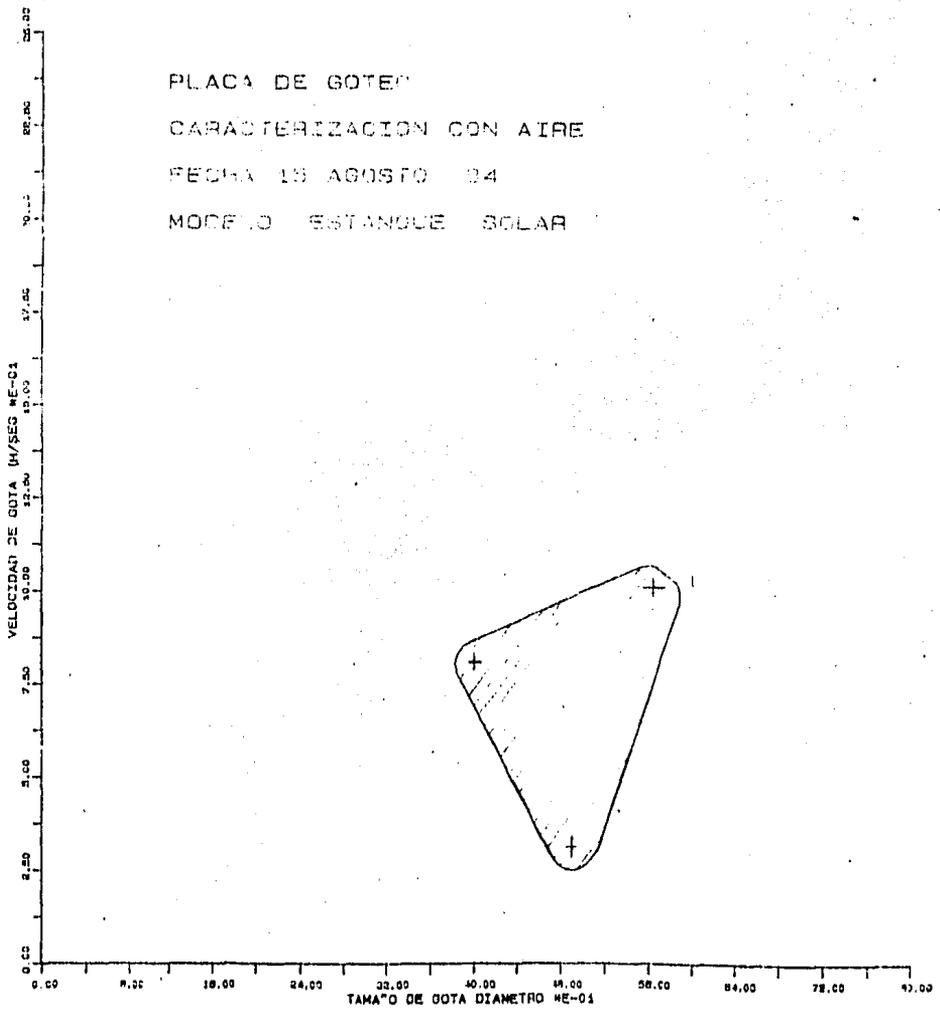
Para estudiar la influencia de la lluvia sobre el estanque en condiciones controladas, se diseñó y construyó un equipo para generar lluvia artificial con gotas cuyas características cayeran dentro del rango que abarca la zona sombreada de la fig 9. El equipo de referencia cuenta con dos elementos principales: una placa de goteo y un circuito hidráulico, como se muestra en el diagrama de la figura 16.

La placa de goteo tiene por objeto producir gotas de agua de un determinado tamaño para simular las condiciones de la lluvia natural dentro del laboratorio. La diversidad de datos encontrados en la bibliografía demuestra que el fenómeno es demasiado aleatorio. Pretendemos pues situarnos dentro del rango que abarcan los datos encontrados.

Inicialmente se tomaron lecturas de los gastos arrojados por la placa de goteo, manipulando éste con la válvula reguladora y fijándolo con la ayuda del manómetro inmediato.

El circuito hidráulico tiene los elementos necesarios para alimentar a la placa de goteo así como para ayudar en el manejo de las salmueras. Los recipientes de recirculación cuentan con las conexiones elementales para hacer llegar el agua a la placa y recircular la sobrante; o si se prefiere, forzar el gasto hacia la placa a la máxima presión

Fig. 9 Rango de parámetros de la lluvia natural.



Proporcionada por la bomba sin recirculación.

Se utilizó un compresor de un paso para alimentar a la placa de aire comprimido con el objeto de provocar el rompimiento de los chorros a la salida de los orificios de la placa provocando la producción de gotas, además el aire ayudó también a reducir el gasto de agua que llegaba a la placa.

Los resultados de estas mediciones se encuentran en el apéndice A. Se eligieron cuatro condiciones del sistema, tomando como indicativo la estabilidad de éste, para ser caracterizadas por medio de la técnica fotográfica que posteriormente se describe. Los parámetros que se controlaron para fijar estas condiciones fueron la presión de agua y la presión total al inyectar el aire, el gasto fué establecido antes para cada condición.

Fueron fotografiadas las gotas y analizadas las fotografías por medio de un equipo ZEISS analizador de imágenes. Con una técnica similar se determinó la velocidad promedio de las mismas. La fig 18 muestra un arreglo de los equipos utilizados.

#### 4.3 Descripción del método de visualización del flujo convectivo

##### Fotografía de Sombra para Observación del Gradiente

Se usa esta técnica para observar visualmente la mezcla convectiva doblemente difusiva dentro del sistema termosalino (7.1).

El sistema óptico consiste de una lámpara de halógeno y tungsteno como fuente luminosa que emite luz difusa y colimada. Siguiendo el diagrama de la figura 10, la luz pasa a través de una lente (L1) con una longitud focal de 37 cm, que concentra un haz sobre la lente condensadora (L2). Una Pupila A, localizada sobre el punto focal de L2, bloquea efectivamente toda la luz proveniente de la fuente, excepto la luz enfocada sobre f2, la cual es la porción colimada.

Después de pasar a través de la pupila, la luz diverge y pasa a través de L3. L3 es una lente fresnel de 76 cm x 101 cm con una longitud focal de 137 cm. Esta lente está colocada de tal forma que su punto focal se sitúa sobre la pupila A, provocando que todos los rayos de luz que emanan de A salgan paralelos al eje óptico al pasar a través de L3.

La luz paralela se propaga a través del modelo físico del estanque solar, y las variaciones en el índice de refracción de la solución salina, causadas por las variaciones de densidad, refractan la luz paralela de una manera ordenada.

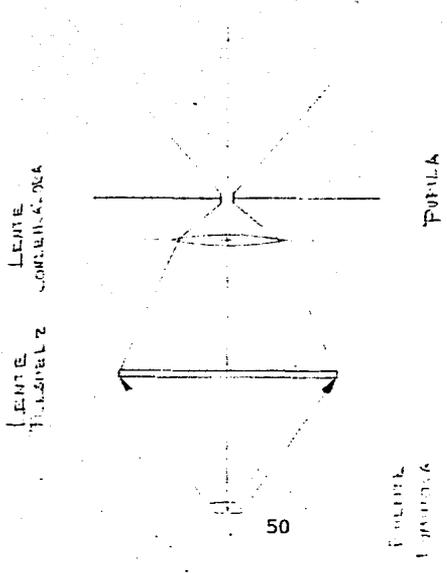
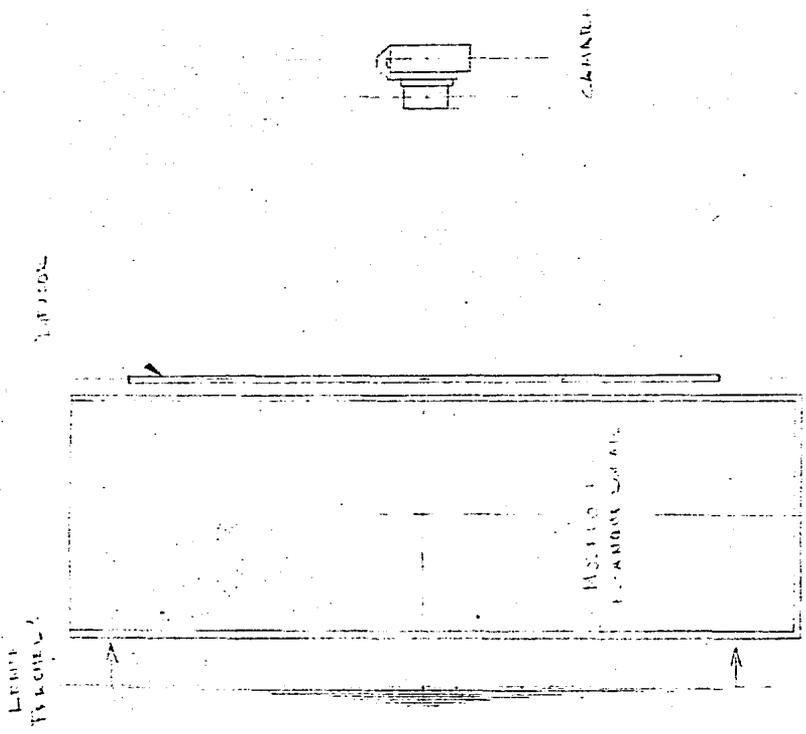


Fig. 10. Aparato para la observación de las células.

Al dejar el medio salino, la luz incide sobre una pantalla translúcida. Sobre esta pantalla se proyectan las variaciones en la intensidad de la luz de tal forma que muchos fenómenos que ocurren en el fluido pueden ser observados a simple vista y fotografiados con una cámara fotográfica.

Un medio cuyas propiedades son completamente constantes en cada plano perpendicular a una dirección elegida se conoce como un medio estratificado (18).

La técnica de fotografía de sombra para el estudio de fluidos estratificados se basa en las variaciones del índice de refracción del fluido, ocasionadas por las variaciones de densidad con respecto a una coordenada espacial perpendicular al eje óptico. El índice de refracción es una razón de la velocidad de propagación de la luz en el vacío y la velocidad de propagación de la luz en un material determinado atendiendo también a la longitud de onda de la luz empleada (15).

En el caso del estanque las variaciones de densidad son a lo largo de la coordenada vertical  $z$ , las cuales cuando el fluido está quieto producen bandas luminosas horizontales de distintas intensidades, como se indica en la figura 11. Una fotografía típica de un estanque solar producida mediante esta técnica muestra una región ancha de alta intensidad

(banda clara), y una de baja intensidad (banda oscura), en las zonas que corresponden a la interfaz entre las tres capas que lo constituyen, separadas por otro campo de mediana intensidad, de tono gris neutro. El tono gris es representativo de una región donde la derivada de la densidad ( $d\rho/dz$ ) tiene un valor constante, por lo que la segunda derivada ( $d^2\rho/dz^2$ ) tiene un valor igual a cero.

Cuando  $d^2\rho/dz^2$  no es igual a cero, como ocurre en las interfaces superior e inferior, la distribución de densidad no es lineal, por lo que las refracciones son distintas causando una banda oscura y una banda clara, de acuerdo a lo siguiente:

Banda oscura cuando  $d^2\rho/dz^2 > 0$

Banda clara cuando  $d^2\rho/dz^2 < 0$

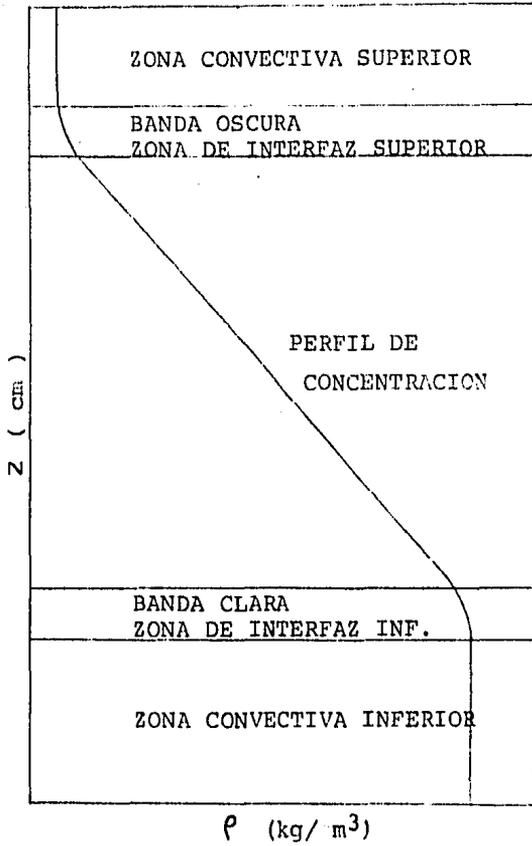


Figura 11 Perfil de concentración.

#### 4.4 Descripción del sistema de medición y adquisición de datos

Para obtener resultados cuantitativos de los experimentos se utilizó un medidor de conductividad eléctrica que llamamos salinómetro. Este aparato fué construido con una alta resolución espacial (unos cuantos milímetros) y abarca prácticamente todo el rango de concentraciones de cloruro de sodio en solución. Posteriormente se dan los detalles de su construcción. La alta resolución permite desplazar la punta dentro de la solución sólo unos cuantos milímetros para obtener lecturas en puntos consecutivos. Estas lecturas se obtienen mediante un multímetro digital para su análisis posterior.

El salinómetro está montado en una base de tubo de vidrio doblado a  $90^\circ$ , lo que permite mantener la punta siempre en posición horizontal, cuando se desplaza verticalmente.

Una escala fija en la pantalla translúcida permite colocar el sensor en el lugar indicado mediante la proyección de su sombra en la misma.

Así se recorre verticalmente u hacia abajo parte del gradiente, registrando los voltajes, antes de hacer penetrar la lluvia sobre la cuba.

Durante el tiempo de duración de la lluvia el salinómetro permanece fijo en el sitio del gradiente hasta donde se

desplazó, y una vez terminada la lluvia comienza a subir registrando los voltajes, poniendo énfasis en la zona de interfaz y la zona convectiva superior.

Cuando sale de la cuba se le retira todo vestigio de sal lavándolo con agua destilada y permanece sumergido en ésta hasta ser nuevamente usado, previniendo así la degradación de los electrodos.

Una serie de ductos conectados a agujas hipodérmicas situadas dentro del gradiente dan información del estado del mismo, al existir un equilibrio entre la carga hidrostática producida por la salmuera dentro de la cuba hasta el punto correspondiente a la posición de la aguja, y la carga de la salmuera contenida en el ducto, dando origen a un perfil formado por los niveles de la salmuera en el interior de los ductos. Si existe el perfil de niveles en los ductos, entonces hay la certeza de que existe también un perfil de concentraciones dentro de la cuba, y las variaciones que éste presente también se manifestarán en el perfil de niveles.

### 1.5 Descripción del método de estratificación de la cuba

Dadas las dimensiones de la cuba se eligió para su llenado el método de capa por capa. Para esto, fué necesario preparar las salmueras fuera de la cuba, en el equipo destinado para ello (recipientes de recirculación y circuito hidráulico).

Se fijaron las alturas destinadas a cada capa, comenzando en el fondo con la ZCI. Utilizando la bomba se llevó a cabo el mezclado de la sal en agua a la concentración de la ZCI. Se vació a la cuba por gravedad una cantidad predeterminada de salmuera para constituir esta zona. Posteriormente se fueron agregando cantidades suficientes de agua limpia a los recipientes para disminuir la concentración de la salmuera y obtener las concentraciones correspondientes de cada capa.

Previo a cada nueva dilución, se vació por gravedad a la cuba una cantidad de salmuera suficiente para la formación de una capa. El vaciado se hizo sobre una capa de poliestireno ligero para evitar que la velocidad de caída de la salmuera destruyera las capas al distribuirse en ella.

Después de crear todas las capas hasta la ZCS, se dejó reposar la salmuera durante 72 horas para que se estableciera el perfil lineal de concentración. En la figura 21 se muestra el gradiente en los primeros 48 cm de la cuba antes de iniciar los experimentos.

#### 4.6 Uso del equipo

Para cada uno de los experimentos realizados en el equipo anteriormente descrito se siguió el procedimiento que a continuación se describe:

- 1.- Se alineó el sistema óptico sobre una de las caras del modelo físico del estanque solar, previamente estratificado con una capa de gradiente no convectiva de 110 cm, y una zona convectiva inferior de 20 cm.
- 2.- Se determinó el perfil de concentraciones en la zona mediante la toma de lecturas del voltaje dado por el sensor. Esto nos dió las condiciones iniciales de concentración. El cero de la escala se verificó al sumergir el sensor en agua destilada.
- 3.- Se verificaron las características del agua a emplear para la producción de gotas, midiendo el voltaje del sensor, el pH y densidad relativa.
- 4.- Se revisó el sistema de tuberías y recipientes. Se estableció control sobre las válvulas que deben abrirse y aquellas que deben estar cerradas, verificando el nivel de agua en los recipientes. Se revisó la línea de aire comprimido a la placa.
- 5.- Por último, al poner en marcha la bomba y abrir

la válvula de la tubería que alimenta a la placa de sotas, se esperó un lapso de tiempo pequeño (1 o 2 min) hasta que se establecía el flujo y después con la válvula se controló la presión efectiva del agua a la entrada de la placa. Una vez obtenida esta presión, se ponía en marcha el compresor y se regulaba la presión total de la mezcla, con la ayuda de la válvula de aguja, destinada para ello. Todo esto se hacía previa selección de estas condiciones y el régimen de lluvia.

## CAPITULO 5

### DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL SISTEMA PARA GENERACION DE LLUVIA ARTIFICIAL

#### 5.1 Diseño y cálculo del sistema hidráulico

El diseño se basó en la ecuación de Bernoulli (9) para calcular la altura manométrica a la que estaría sujeta la bomba, para disponer de la presión y flujo suficientes para alimentar a la placa de nebulización en forma adecuada. Las pérdidas por rozamiento en la tubería y accesorios se calcularon por el método de la longitud equivalente.

Para realizar los experimentos era necesario contar con un rango amplio del caudal y una mínima variación de éste una vez establecido. Por otro lado la presión requerida no era muy alta, pues se trata de un sistema realmente pequeño. La bomba seleccionada fué del tipo centrífuga horizontal de flujo radial, por ser ésta la más común en el mercado y además cumplir con las condiciones requeridas.

Una de las condiciones más importantes para estratificar una columna por densidad es obtener mezclas homogéneas evitando al máximo la presencia de partículas de cloruro de sodio no

disueltas. Con este fin se decidió realizar el mezclado con ayuda de la bomba, eliminando además la necesidad de contar con equipo auxiliar y la pérdida de tiempo inevitable en preparar cada cara del gradiente.

Por tanto la bomba debía ser resistente a la corrosión causada por la salmuera de alta concentración. Por esto se decidió adquirir en el mercado una bomba fabricada en acero inoxidable.

Todas las tuberías y conexiones que forman parte del sistema, así como los recipientes para recirculación, debían también ser resistentes al ataque de la salmuera.

Debido a su excelente comportamiento bajo ambientes salinos (10), se eligió tubería de polivinilo (PVC), ya que se cuenta también con una línea amplia en conexiones, además de la economía y la sencillez para el montaje.

Se usaron válvulas de bronce tipo compuerta en su mayoría. Sólo en aquellos puntos donde se requería un mejor control del flujo se optó por válvulas del mismo material del tipo aguja; estos puntos son: la entrada de aire a la placa de soteo y la alimentación de salmuera a la cuba. Cada válvula está colocada estratégicamente para lograr un sistema versátil que nos permite manipular los flujos que intervienen en el proceso (aire, salmuera y agua limpia). La figura 12 muestra un arreglo general del sistema.

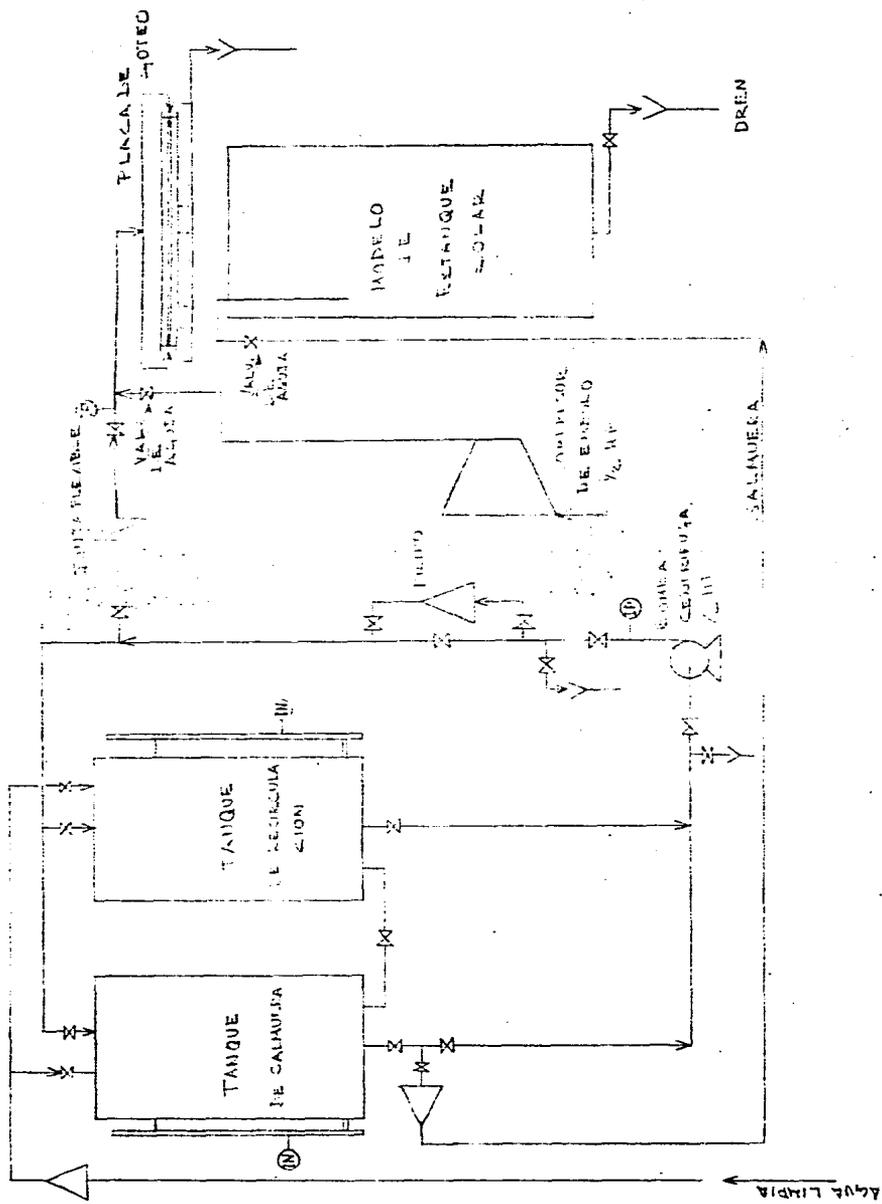


Fig. 12 ALLEGO SUELEN DEL SISTEMA  
CENTRIFUGO

Los indicadores de nivel en los recipientes de recirculación, dan información del líquido contenido, y previenen que la bomba llegue en alguna ocasión a trabajar en vacío y provocar cavitación.

Para asegurar que las salmueras no contengan partículas que accidentalmente lleguen a los recipientes, ya sea contenidas en la sal o por otro medio, se fabricaron filtros utilizando conexiones de PVC y malla serflica como elemento cartador, ya que pruebas anteriores demostraron excelentes resultados. Los filtros están en línea con la tubería y únicamente a la descarga de la bomba se conecta uno en by pass, para ser utilizado sólo en caso necesario y sin arriesgar una pérdida considerable de presión.

Los cálculos y comentarios relacionados con el diseño del circuito hidráulico se presentan en el apéndice B.

La cuba que sirve de recipiente al modelo físico del estanque se considera parte del sistema hidráulico y las características del experimento a realizar requieren de ciertas condiciones que deben contemplarse al elegir los materiales y dimensiones para su construcción. Uno de los factores más importantes es la observación visual del comportamiento de la zona no convectiva y para eso se necesita de un material que permita el paso de la luz sin

distorsiones y que además muestre un excelente comportamiento en un medio altamente salino.

Debido a lo anterior se eligió placa de acrílico plastidlas para construir el modelo; este material tiene una buena transparencia, transmitiendo hasta un 92% de luz (11); y por otro lado tiene una resistencia al impacto superior a la del vidrio, que sería el mejor material en cuanto a su transparencia.

El acrílico tiene una temperatura de formado superior a 140 °C, mientras que la temperatura ambiente promedio en el IIE es de 22 °C. Se garantiza que todo efecto térmico sobre el material es secundario a temperatura menor de 70 °C.

Las dimensiones debrían ser tales que permitieran su manejo y disponibilidad para colocar el equipo periférico dentro de un área reducida como es el laboratorio.

La placa de acrílico es soluble en cloroformo y con este reactivo se prepara una mezcla que actúa como fundente y a la vez como material de aporte para lograr una soldadura que da excelentes resultados contra posibles fugas en la cuba. Para reforzar la resistencia de esta unión a la corrosión, se recubrió con una capa uniforme y consistente de sellador Dow Corning 732RTV cuya composición es prácticamente inalterable en un ambiente de alta salinidad.

Aún cuando las propiedades mecánicas del plastislas demuestran alta resistencia a la tensión y a la flexión, se reforzó la cuba con cinturones de aluminio colocados estratégicamente a diferentes alturas. Estos cinturones fabricados con solera de aluminio tienen la función de contrarrestar el efecto del empuje sobre las paredes debido a la carga de la presión hidrostática.

Los cálculos y detalles de la cuba pueden encontrarse en el apéndice C.

## 5.2 Diseño y construcción de la placa de soteo

El generador de lluvia se construyó con dos placas de acrílico de 10 mm de espesor cada una, cuadradas, de 47 cm por lado, colocadas en forma paralela entre sí, con una separación entre sus caras de 3 mm, empleando tira del mismo material en la periferia, para completar un sistema sellado de forma cuadrada.

Las gotas de lluvia se obtuvieron por medio de orificios de 1 mm de diámetro practicados en la placa inferior con una distribución cuadrada, con una separación entre uno y otro de 2.54 cm y ocupando en total un cuadro de 36 cm x 36 cm. El número total de orificios es de 256 los cuales se avellanaron de forma adecuada para reducir la resistencia que encuentra el agua al penetrar en ellos y se hizo lo mismo en la salida para evitar lidamientos capilares cuando se manejan gastos reducidos.

La alimentación de agua se lleva a cabo por cuatro tuberías de 7 mm de diámetro, colocadas en la mitad de cada lado de la placa con lo que se obtuvieron cuatro chorros iguales que al chocar producen tal turbulencia que la distribución de agua en toda la sección de la placa es prácticamente uniforme; lo que se comprobó colocando una gradilla en diferentes posiciones hasta barrer toda el área. La distribución es uniforme exceptuando las zonas inmediatas a cada sitio de alimentación donde se presenta una disminución. Los detalles

de construcción de la placa pueden verse en la figura 13.

La distribución del agua dentro de la placa se basa conceptualmente en el flujo a través de dos placas paralelas (12) y en el choque de chorros simétricos, tanto en situación geométrica como sus parámetros de gasto, velocidad y presión.

Una vez construida, la placa fué caracterizada como se describe posteriormente, obteniéndose las correlaciones de gasto contra presión que se muestran en las gráficas de las figuras 14 y 15.

La placa está soportada por un mecanismo simple de corredera, que le concede dos grados de libertad, permitiéndole desplazamientos horizontales y verticales, con el objeto de barrer toda el área al aplicar la técnica de observación para su caracterización.

Parte integral de la placa de soteo es un dispositivo obturador que permite controlar el tiempo de inicio y terminación del periodo de lluvia e impedir que caiga agua sobre la cuba antes de que se establezcan las condiciones de operación. Este dispositivo consta de dos placas deslizables de acrílico, 3 mm de espesor, las cuales descartan el agua captada a un cabezal de tubería PVC, 2 puld Ø, que sirve como canal y la lleva al dren.

El conjunto está soportado por un marco de acrílico, 10 mm de

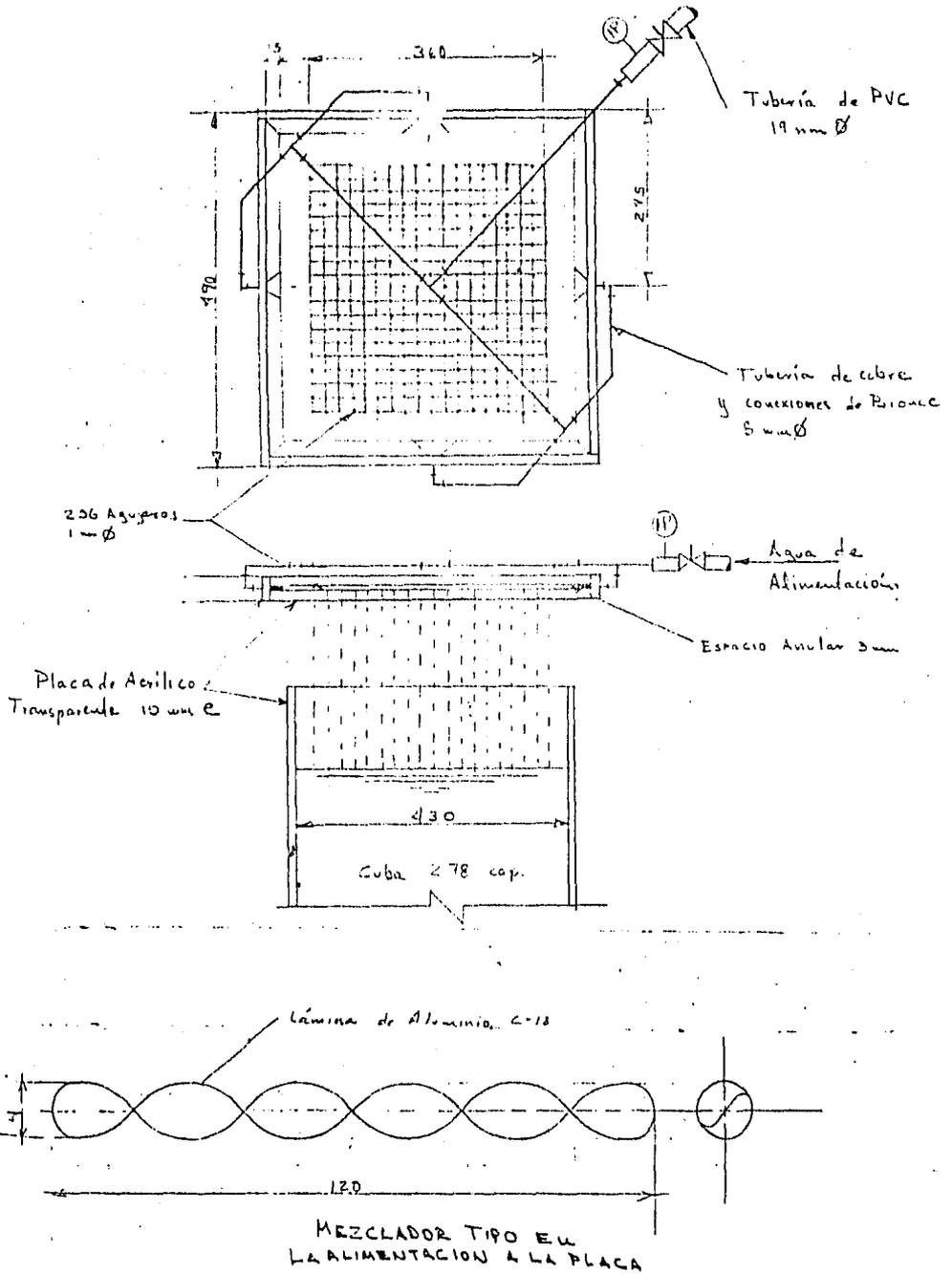


fig. 13. DETALLES PLACA DE GOTEO

espesor, el cual se sujeta rígidamente a la placa de soteo.

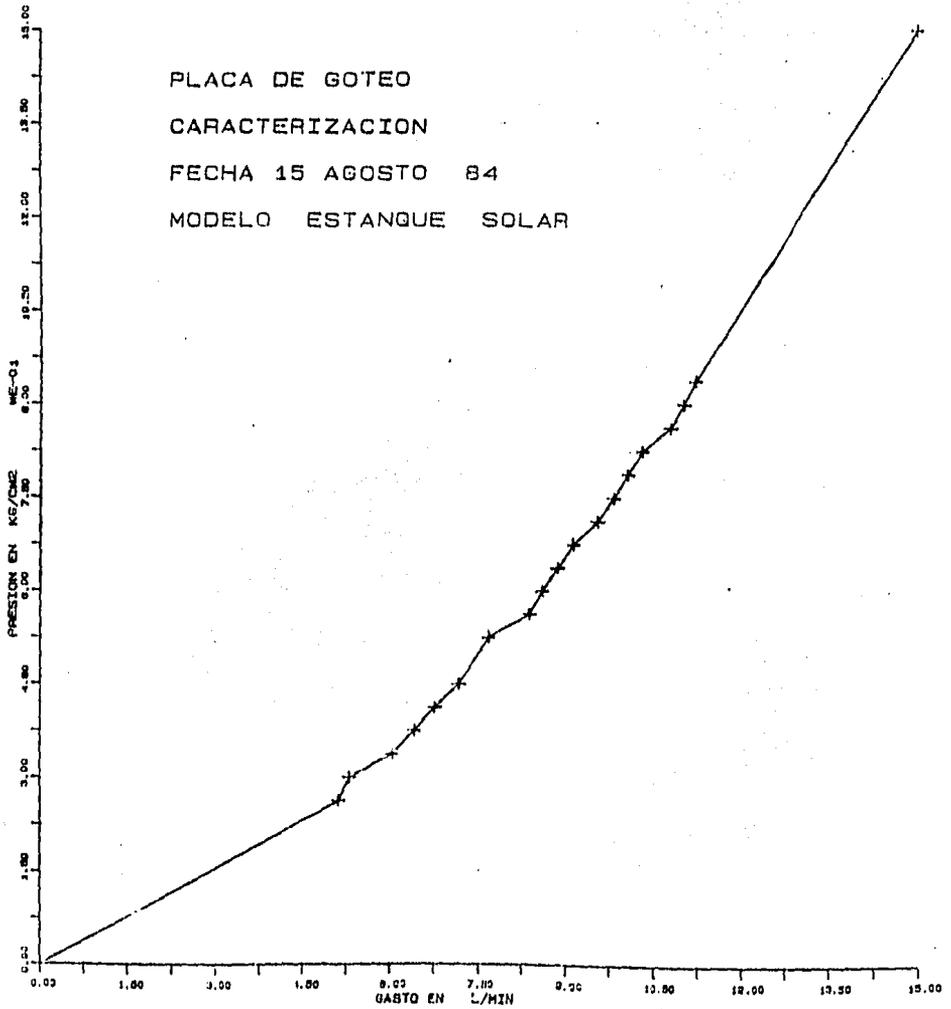
Se inyectó aire comprimido a la línea que después se bifurca para alimentar por los cuatro lados. Una válvula de aguja es usada para regular la cantidad de aire que se mezcla con el agua rumbo a la placa y se tuvo una disminución sustancial en el gasto de agua; ya que, como se dijo antes, hubo una mezcla de ambos fluidos, presente dentro de la placa, hasta el instante de la salida en cada orificio.

Al probar el sistema se observó tal turbulencia que impedía la salida de gotas en la zona cercana a los lugares de alimentación, aunque también existía distribución de aire en forma de bolsas, que ocupaban lugar tanto en el centro de la placa como en las esquinas, impidiendo que éstas áreas trabajaran normalmente. La figura 14 muestra el comportamiento del sistema bajo estas condiciones.

El uso de mezcladores estáticos en forma de espiral, colocados dentro de cada una de las cuatro tuberías de alimentación, dió por resultado que la mezcla fuera mas uniforme, y variando tanto el gasto de agua como de aire, se obtuvieron condiciones satisfactorias. Un mezclador tipo puede observarse en la figura 13.

Las bolsas que se formaban y que impedían la salida de gotas en algunas zonas, desaparecieron notablemente con el uso de los mezcladores, dando lugar a pulsaciones en las burbujas de aire, que ocasionalmente empujan a las gotas en turno.

Fig 14 Comportamiento del simulador  
de lluvia



Además se tiene una generación de gotas, no chorros, mas aleatoria; simulando aún mas el fenómeno natural. El comportamiento final del equipo con las modificaciones puede verse en la figura 15.

Como puede apreciarse al comparar las gráficas de las figuras 14 y 15, existe una diferencia muy marcada en el comportamiento de la placa. Utilizando solamente agua obtuvimos un comportamiento mas uniforme del costo arrojado, mientras que introduciendo una mezcla de aire y agua el comportamiento no es tan lineal. Sin embargo hemos elegido este último método para simular las condiciones de la lluvia debido a que tenemos las siguientes ventajas: se redujo apreciablemente el gasto para una determinada presión dentro de la placa y esta presión está en proporción directa con la velocidad de las gotas obtenidas, es decir, a mayor presión mayor velocidad de salida de las gotas. Otra ventaja es la obtención de gotas y no de chorros como ya se dijo antes. Además, como se verá después con la aplicación de las técnicas de cuantificación de las gotas, se logró aumentar el tamaño de las mismas en acorde con los datos encontrados en la bibliografía. Por último cabe mencionar que el rango de presiones en el que trabajamos cae en la parte mas estable de la curva de la figura 14.

Solamente contamos con el manómetro anterior a la placa para cuantificar la mezcla de ambos fluidos, siendo necesario

establecer una presión para uno y posteriormente una presión total puntual para ambos. El análisis teórico de esta parte, incluyendo a la placa, queda fuera del objetivo principal de este trabajo.

Una vez elegidas las condiciones de gasto y presión para las cuales se comporta mas estable el sistema, se procedió a cuantificar las gotas obtenidas, con ayuda de la técnica fotográfica que se describirá en la siguiente sección.

### 5.3 Caracterización de la Placa de Goleo

Recorriendo toda el área y a diferentes alturas, deslizando siempre la placa con respecto del eje óptico fijo, se tomaron fotografías y se analizaron con ayuda del analizador de imágenes, disponible en el IIE.

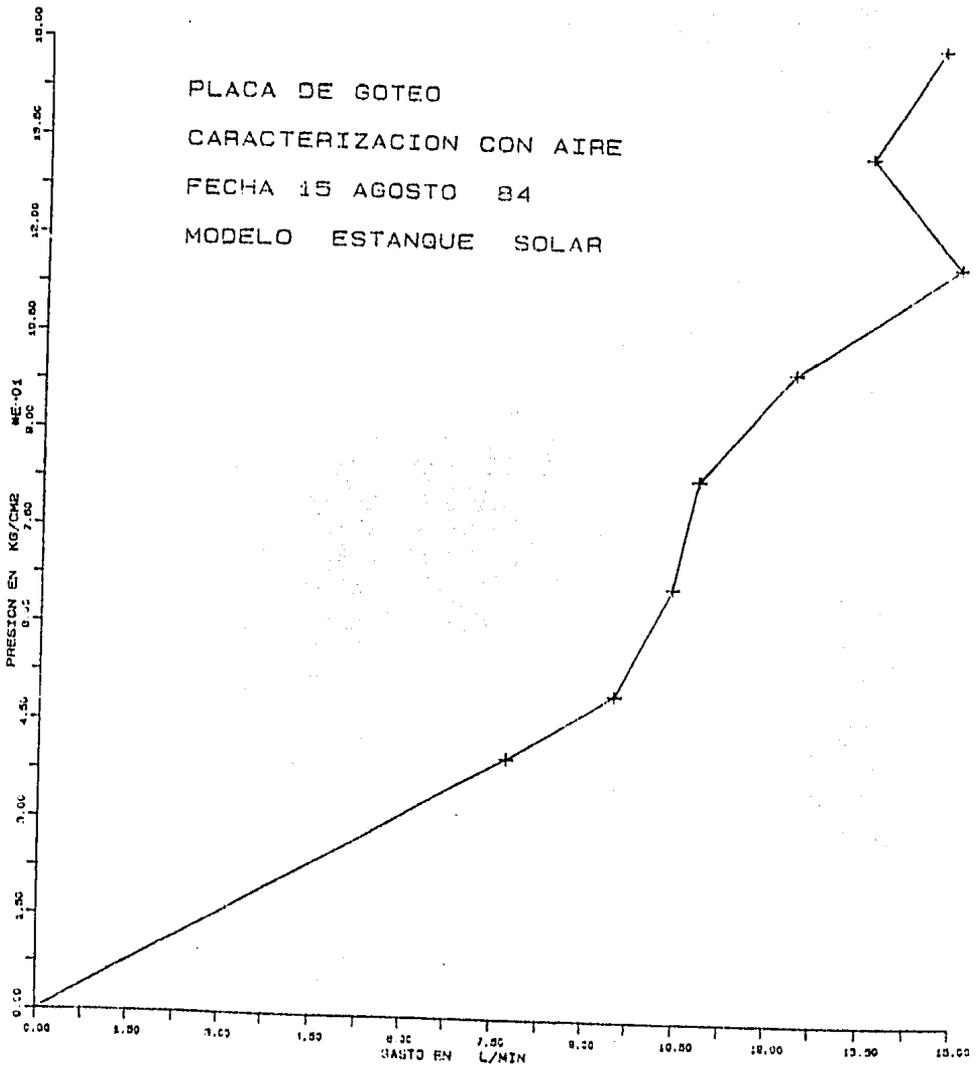
Este equipo consta de una lente que magnifica el tamaño del negativo, acoplada a una cámara de televisión que envía la señal a una pantalla. Los controles que gobiernan esta pantalla permiten variar la intensidad con que es iluminado el negativo, dando lugar a contrastes bien definidos entre los contornos de los objetos fotografiados y su alrededor. A partir de los contrastes de sombras en la pantalla, un programa de computadora recibe las señales y considera las zonas claras, que representan a las gotas, como esferas, y determinando su diámetro las cuantifica.

El sistema es versátil y permite la medición en forma individual para cada gota o en conjunto para todas las gotas captadas en un negativo.

Mediante procedimientos estadísticos agrupa las gotas en clases de acuerdo a su diámetro, desarrollando después gráficas de distribución de tamaños.

Dentro de las investigaciones realizadas por personal del IIE encaminadas al análisis de partículas en los atomizadores de

Fig 15 Comportamiento del simulador  
de lluvia modificado.



combustóleo (13), se han llegado a implementar técnicas de observación basadas en este concepto

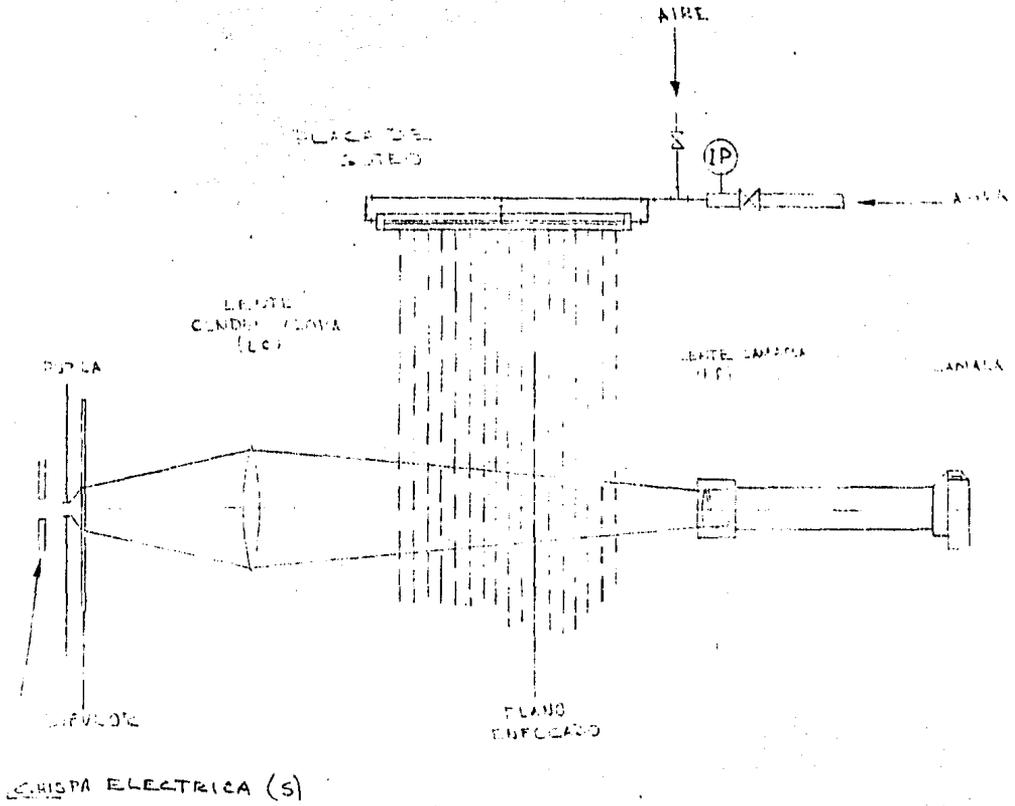
Esta técnica de observación es confiable en su aplicación, ya que no interacciona con las partículas, además permite conocer la distribución de tamaños mediante el análisis de las fotografías obtenidas y los componentes empleados para el sistema óptico experimental se encuentran fácilmente en el mercado.

Nos hemos basado en estas investigaciones para analizar las gotas producidas por el simulador de lluvia y así caracterizar la placa de goteo.

#### Descripción del sistema

En la fig 16 se muestra esquemáticamente el equipo experimental. Su función es producir en la película fotográfica la imagen de las sombras de las partículas, que son iluminadas por la fuente luminosa a través de la lente condensadora.

El sistema se compone principalmente por la fuente luminosa (s), la lente condensadora (lc), la lente fotográfica (lf) y la cámara fotográfica. Una descripción detallada de los elementos se encuentra en el apéndice F.



**Fig. 16 ARREGLLO TECNICA FOTOGRAFICA PARA LA  
 CARACTERIZACION DE LA PLACA DE GOTEO.**

#### 5.4 Resultados de la caracterización

Originalmente la alimentación a la placa se hizo con agua solamente y a través de un cabezal de 19 mm  $\emptyset$  tubería de PVC. El problema que surgió con este arreglo fue la inercia enorme al manejarse gases muy pequeños, de tal manera que con presiones de 0.1 y 0.2 kg/cm<sup>2</sup> se tenía una respuesta lenta en la placa. La distribución del agua no podía considerarse como uniforme.

Los resultados utilizando el equipo original, es decir, sin la introducción de aire comprimido ni la reducción en los diámetros de las cuatro tuberías de alimentación se presentan en la tabla 1.

En esta tabla se tienen dos parámetros que nos dan idea del tamaño obtenido de las gotas. El diámetro lineal (Diá Lin) es un valor promedio representativo del diámetro de las gotas y como existe una densidad de gotas pequeñas (70 micras aprox.) mayor que la densidad de gotas grandes (3.5 mm), que en última instancia son las que nos interesan, este valor tiende a ser pequeño debido a que se carga más hacia el diámetro de las gotas pequeñas por su mayor cantidad.

Por otro lado el diámetro de masa (Diá Msa) es un valor que representa un promedio de la masa de las gotas considerándolas como esferas. La computadora calcula estadísticamente este valor atendiendo al volumen de las gotas y como en este caso se carga más hacia las gotas

grandes el resultado es que tenemos un valor mayor que el diámetro lineal y más acercado a la realidad.

Debido a que el mayor número de gotas cartadas tiene un diámetro inferior a 1 mm, el diámetro de masa es más representativo para nuestro objetivo porque una gota de aproximadamente 3.5 mm de diámetro contiene cientos de veces el volumen de una gota de unas 70 micras, que es el diámetro más representativo de las gotas pequeñas. Nos interesan las gotas grandes pero el diámetro de éstas tiene que sujetarse a un conteo estadístico en donde también intervienen los diámetros de las gotas pequeñas. Entonces, aún cuando nos beneficia tomar en cuenta el diámetro de masa, éste se viene reducido por mayor número de gotas de diámetro menor de 1 mm.

**TABLA 1**

Presión kg/cm <sup>2</sup>	Punto cm	Gasto l/min	fotos	Part. (gotas)	Diá Msa micras	Diá Lin micras
0.2	A	4.6225	12	129	1762.37	1593.02
0.5	A	8.096	12	145	2784.4	1831.03
0.8	A	10.8167	12	145	2580.89	1810.61
0.2	B	4.6225	7	93	2269.67	1704.30
0.5	B	8.096	8	113	3231.13	1871.78
0.8	B	10.8167	14	307	2993.63	1664.96
0.2	C	4.6225	9	214	2766.18	1275.7
0.5	C	8.096	10	270	2659.87	1296.3
0.8	C	10.8167	11	234	3938.36	1376.07

Los resultados promedio de la tabla anterior son:

Presión	Velocidad	Gasto	fotos	Part	Diá Msa	Diá Lin
kg/cm <sup>2</sup>	m/seg	l/min		(gotas)	micras	micras
0.2	1.712	4.6225	28	436	2256.07	1524.34
0.5	1.641	8.096	30	528	2891.81	1666.37
0.8	1.744	10.8167	37	686	3126.63	1629.15

La velocidad de las gotas se determinó utilizando el mismo equipo pero variando el tiempo de exposición de la película con el fin de marcar el desplazamiento de la gota en un tiempo dado.

El parámetro Punto se refiere a la distancia que hay entre una marca sobre la corredera (A,B,C) y el centro de la placa. Como puede verse en la figura 13 referente a los detalles de la placa, existe una distancia de 18 cm desde el centro de la misma hasta la última hilera de orificios hacia cualquiera de los cuatro lados. El punto A está situado a 9 cm del centro de la placa, el punto B a 14 cm y el punto C a 17 cm.

Esto nos sirve para observar si existe una diferencia en la densidad de gotas en la zona central de la placa y su periferia, encontrándose una mayor densidad en la periferia. Es decir, aún cuando la distribución del agua parece uniforme

dentro de la placa, las turbulencias producidas por el choque de los cuatro chorros en el centro impide que en esa zona salga la misma cantidad de agua que en las orillas. En lo sucesivo se eligió esta zona periférica para tomar las fotografías, contando con la modificación en el cabezal de alimentación y además la inyección de aire comprimido. La tabla 2 muestra los resultados del sistema en su arreglo final, cuyo historial estadístico puede verse en el apéndice D.

Los parámetros Pres H<sub>2</sub>O y Pres Tot se refieren, respectivamente, a la presión de agua, que se fija primero, y a la presión total resultante de la mezcla de aire y agua que llega a la placa. Como puede verse, la inyección de aire fué favorable ya que se obtuvo una mayor variación del diámetro de las gotas, pero las velocidades resultantes son semejantes a los obtenidos con el equipo original. Se dá el diámetro lineal sólo como punto de comparación. Al reducir el gasto de agua que salía de la placa en forma de gotas, lógicamente se redujo el número de éstas. El esfuerzo por captar un mayor número de gotas para un mejor análisis estadístico puede verse en el mayor número de fotografías tomadas para cada condición.

TABLA 2

Pres H2O kg/cm2	Pres Tot kg/cm2	Gasto l/min	Vel m/seg	Fol.	Part (gotas)	Diá Msa micras	Diá Lin micras
0.3	0.5	4.190	1.763	43	148	2137.60	1317.57
0.36	0.7	4.357	1.729	89	242	4639.78	1714.88
0.50	0.8	5.237	1.791	72	235	3811.31	1478.72

La figura 17 muestra una gráfica en la que se representa una comparación entre los rangos de lluvia. El rango de parámetros de lluvia (velocidad y diámetro de gota) reportado en la bibliografía lo denominamos Natural y el Obtenido es el resultado del simulador de lluvia.

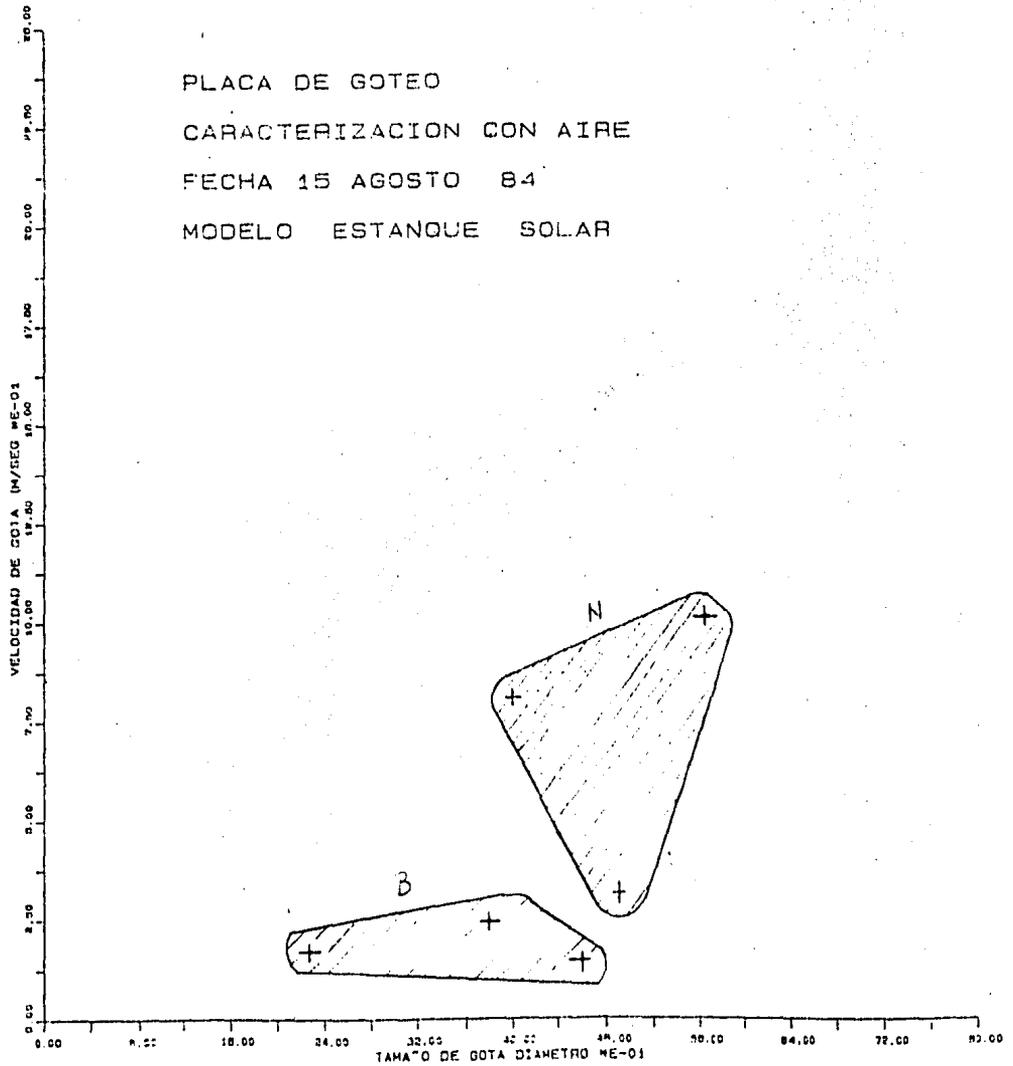
Podemos observar que las características de la lluvia artificial coinciden con la natural únicamente en el diámetro de gotas, mientras que la velocidad obtenida en el laboratorio es marcadamente mas baja que la reportada.

Existe la probabilidad de que una lluvia natural caiga dentro del rango que marca la literatura, sin embargo también existe la posibilidad de que esté fuera de él, ya sea debido a una diferencia en la velocidad de caída o en el diámetro de

Fig 17 Comparación de los rangos de lluvia.

N; Natural

B; Obtenido con el simulador



sotas. Definitivamente el variar la velocidad influirá directamente en el momentum contenido en cada sota y por tanto en el momentum total que entra al estanque.

## CAPITULO 6

### DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL SISTEMA DE MEDICION Y ADQUISICION DE DATOS

#### 6.1 Sistema de capilares

Con propósitos de verificación y redundancia se instaló un dispositivo que permite extraer muestras de salmuera de las diferentes zonas del estanque, las cuales pueden analizarse para determinar el perfil de concentraciones. Sirve también para dar información visual inmediata sobre el estado de la estratificación, como se mencionó anteriormente.

El dispositivo fué diseñado y construido con características adecuadas para permanecer por largo tiempo expuesto al ambiente salino, no causar perturbaciones a las capas y ser totalmente práctico en su manejo.

Consiste en una placa de acrílico de 10 mm de espesor, con perforaciones, a manera de orificios piezométricos, sobre las cuales van montadas agujas hipodérmicas de acero inoxidable. Estas se conectan a mangueras de plástico transparente cuya salida, en forma independiente para cada capa, permite obtener muestras en cualquier momento y sin causar perturbaciones al gradiente.

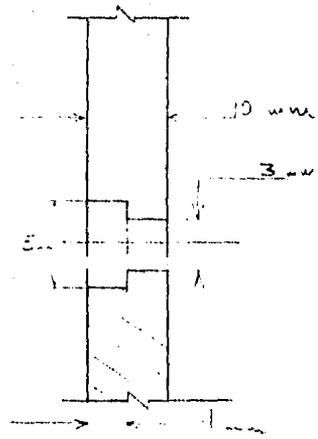
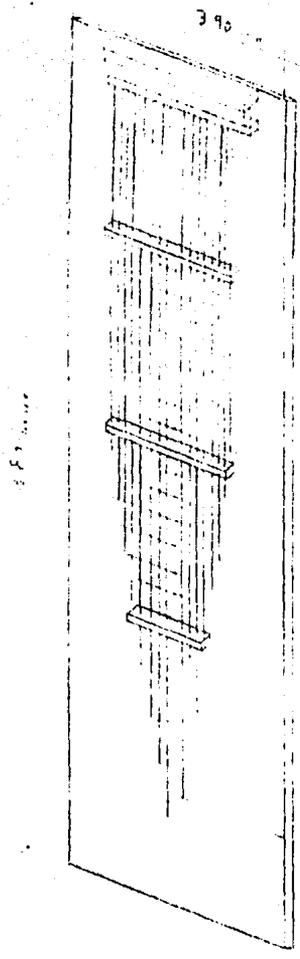
Para fijar las mangueras con las agujas a los orificios se usó fluorosilicon RC732 RTV, que se espera tenga un buen comportamiento en ese medio. La fig 18 muestra los detalles del sistema de muestreo.

## 6.2 Sensor de conductividad

El estudio de la microestructura de las capas en un estanque solar señala la necesidad de desarrollar un instrumento con una resolución espacial de aproximadamente 1 mm y capaz de medir concentraciones en el rango de 0% a 23% en peso de cloruro de sodio, y soportar periodos de inmersión en la salmuera para operación continua de aproximadamente 30 días.

La medición de la concentración en el gradiente y el contenido de sal en las regiones convectivas es imperativa para obtener una base de datos y poder estudiar los fenómenos que ocurren en la interfaz de las zonas. La medición de conductividad eléctrica de la solución es una alternativa obvia para este fin. Aunque las soluciones salinas son electrolíticas, es posible medir la salinidad (porcentaje en peso de sal en solución) como una función doble, de la conductividad específica (en mhos por centímetro) y la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Las mediciones normalmente se realizan con dispositivos llamados celdas de conductividad (usualmente electrodos



Orificio Piezométrico.

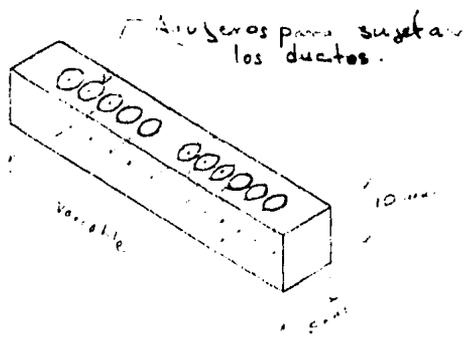


Fig. 18 Detalles Sistema de Capilares.

dobles).

Los sensores de conductividad comerciales tienen resolución espacial de varios centímetros y son utilizados normalmente para medir salinidades del 3% ó menores (por ejemplo muestras de agua de mar); por lo que son inadecuados para nuestros propósitos.

El sensor de electrodo puntual es una variación de las celdas de conductividad con electrodo doble, en el cual el segundo electrodo tiene varios cientos de veces el área superficial del primero (al contrario las áreas iguales usadas en las celdas de conductividad). Con esto el área superficial del electrodo puntual es mucho mas pequeña que la del electrodo secundario, y la misma corriente total fluye a través de ambos. Esto trae como consecuencia que la densidad volumétrica de corriente sea mucho mas alta en el electrodo puntual que en el electrodo secundario. Por tanto la conductividad total medida, es decir, la conductividad de la solución en la cercanía del electrodo puntual, es marcadamente mayor que en la cercanía del electrodo secundario, en aproximadamente la misma proporción existente entre las áreas. Para una proporción de áreas de algunos cientos de veces, el efecto de la conductividad de la solución en las cercanías del electrodo secundario es despreciable.

Este sensor se construyó en base al reporte emitido por Grimmer de Los Alamos National Laboratory, de los Estados Unidos (8). El sensor tiene un electrodo puntual y un electrodo secundario enrollado alrededor de la punta para proteger al electrodo puntual contra la corriente directa presente en el electrolito; durante las mediciones de conductividad. Ambos electrodos fueron construidos con alambre de 0.41 mm de diámetro (calibre 26) del mismo material. En la figura 19 se muestra el detalle del sensor.

#### 6.2.1 Sistema Electrónico

Fitzgerald (8) desarrolló un circuito electrónico que recibe las señales del sensor para medir la conductividad de un electrolito. Adaptado para usarlo en diversas soluciones salinas, este circuito se compone de un oscilador, un multiplicador y un amplificador operacional. En el apéndice E se dan algunos detalles de la construcción y operación del circuito.

El circuito fué construido en su totalidad por parte del personal especializado en electrónica del Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía del IIE.

Para determinar la salinidad a partir del voltaje dado por el circuito, se calibró el sensor utilizando un Juego de muestras buffer de referencia, las cuales fueron tituladas



mediante análisis volumétrico. Abarcan estas muestras todo el rango de concentraciones, desde 0.1% hasta 23% en peso. Los datos obtenidos de esta calibración se muestran en la figura 20. La curva que se muestra en la misma figura es el resultado de un ajuste mediante un polinomio de cuarto orden obtenido con la ayuda de un programa de computadora. El polinomio dado por la computadora siendo la mejor elección, nos sirve como patrón de comparación al cual se introducen los voltajes dados por el sensor entresándonos la concentración, al hacer el monitoreo del perfil de concentraciones antes y después de cada experimento. Los parámetros del polinomio se dan a continuación:

$$F(x) = C(0) + C(1)T + C(2)T^2 + \dots + C(M)T^M$$

Donde  $T = 0.416666666667 * x + (-2)$  y  $M = 4$

I	C(I)
0	2.53698621
1	2.42979494
2	1.45675579
3	0.75339197
4	0.14918199

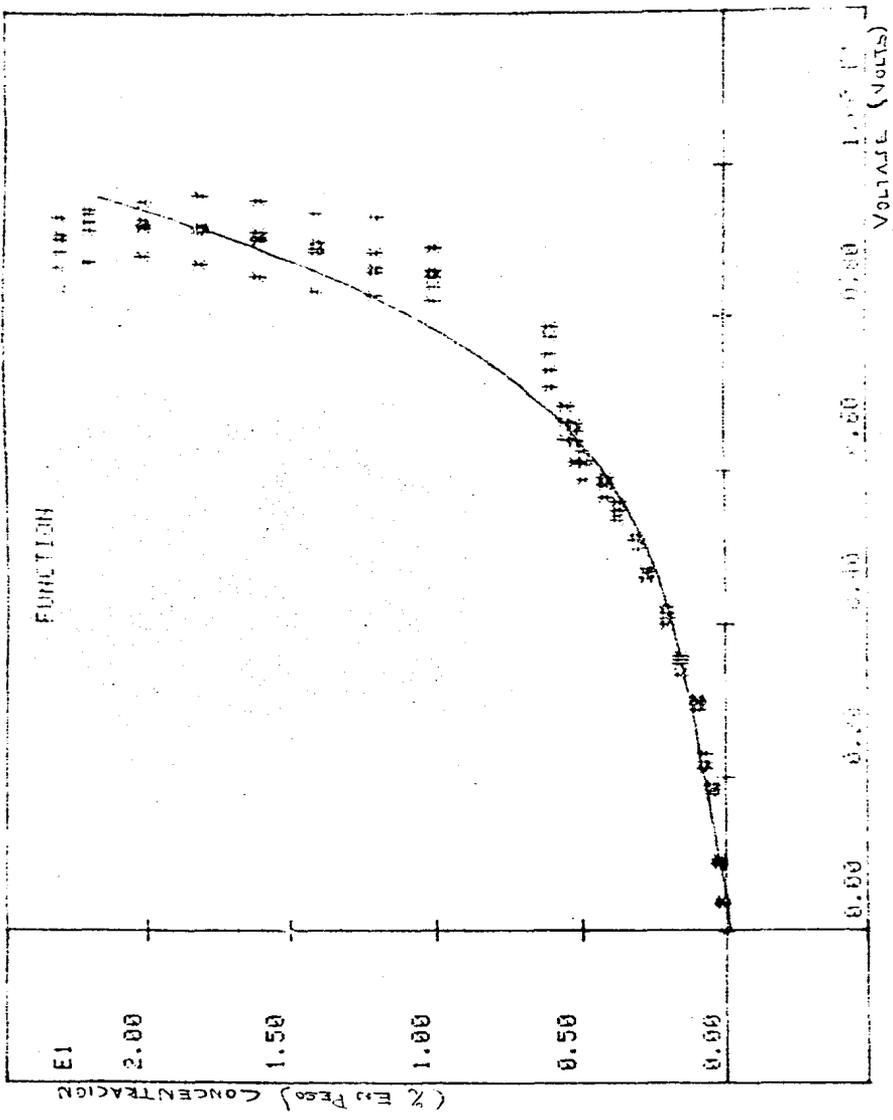


Fig. 2. Characteristics of the E2 sensor.

## CAPITULO 7

### ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA INFLUENCIA DE LA LLUVIA EN EL ESTANQUE

#### 7.1 Descripción de los fenómenos observados.

Se realizaron 17 corridas en total del primer experimento, para ello se optó por mantener constantes las condiciones del régimen de lluvia y variar únicamente el tiempo de duración con el objeto de comparar las respuestas obtenidas.

Antes y después de cada corrida se determinó la naturaleza del perfil de concentraciones, registrando los voltajes dados por el sensor. De igual manera se fotografiaron las imágenes que aparecieron en la pantalla translúcida, tanto en condiciones de reposo del estanque como durante el desarrollo del experimento. El tiempo de reposo entre una corrida y otra fué de aproximadamente 24 horas. La tabla 3 contiene la información concreta referente a todo el experimento.

**TABLA 3**

**Experimento 1**

No. de corrida	Fecha	Duración minutos	Hora de Inicio	Régimen de lluvia		Tiempo de reposo (horas)
				PH2O	Pt Kg/cm2	
1	7/10/84	5	12:35	0.5	0.8	
2	8/10/84	10	17:30	0.5	0.8	28:50
3	9/10/84	20	18:20	0.5	0.8	24:40
4	10/10/84	40	18:07	0.5	0.8	23:07
5	12/10/84	40	10:12	0.5	0.8	39:25
6	13/10/84	40	11:23	0.5	0.8	24:31
7	14/10/84	40	11:02	0.5	0.8	22:59
8	15/10/84	40	11:20	0.5	0.8	23:38
9	16/10/84	40	11:21	0.5	0.8	23:21
10	17/10/84	40	11:11	0.5	0.8	23:10
11	18/10/84	40	11:20	0.5	0.8	23:39
12	19/10/84	40	11:00	0.5	0.8	23:00
13	20/10/84	40	10:00	0.5	0.8	23:20
14	21/10/84	40	11:30	0.5	0.8	22:50
15	22/10/84	40	11:06	0.5	0.8	23:56
16	24/10/84	40	11:24	0.5	0.8	23:38
17	5/12/84	40	12:00	0.5	0.8	1007:56 41 días

Durante la formación del gradiente con el método ya descrito, se pudieron observar en la pantalla difusora líneas intensas que marcaban la frontera entre capa y capa; pero máximo se formaban dos líneas, correspondientes a la penúltima y última capas, siendo mas visible la línea que separaba la última capa. Estas líneas intensas duraban aproximadamente cuatro horas y se desvanecían.

El 24/09/84 se formó la última capa de 7 cm de espesor con agua pura y para el 28 del mismo mes se observó el perfil perfectamente formado en los ductos del sistema de capilares. La respuesta en los ductos es mas tardada debido posiblemente a los fenómenos de tensión superficial de la salmuera en las paredes interiores.

Se observó un fenómeno interesante cuando se estaba alineando el sistema de iluminación. Para ello se concentró sobre la cuba un haz de luz, de aproximadamente 5 cm de diámetro, con la fuente luminosa. El calor que provocaba el haz era perceptible colocando la mano sobre la pared de la cuba. Se podía observar perfectamente como el gradiente era atravesado por la luz, ya que la salmuera forma un medio lo suficientemente denso. El tiempo que duró este haz sobre la salmuera fué alrededor de 20 min y casi 30 min después empezó a aparecer dentro del estanque la formación de líneas que describían planos perfectamente diferenciables unos de otros.

Estas líneas horizontales eran de mayor longitud en el sitio que había sido atravesado por el haz luminoso, y se hacían más pequeñas cuanto más distantes estaban de ese punto, del cual se separaban tanto hacia arriba como hacia abajo formando una especie de rejilla de perímetro rómbico. Al colocar la pantalla las sombras proyectadas daban la impresión de que existía otro gradiente dentro del gradiente salino.

Este tipo de fenómenos han sido reportados en fechas recientes y se cree se trata de una característica particular de los sistemas termosalinos; es decir, sistemas en los que existe una diferencia entre la difusión térmica y la difusión salina la cual da lugar a la formación de pequeños gradientes internos.

Las condiciones iniciales del perfil obtenidas con el sensor de salinidad, previo al inicio del primer experimento se pueden apreciar en la fig 21. Después de hacer la lectura se mantuvo el sensor a una profundidad  $h = 33$  cm. La superficie del agua en la cuba antes del primer experimento estaba 2.7 cm por debajo del nivel del rebosadero con que cuenta la cuba para enviar los excedentes de la lluvia al dren. El cero de la escala en la pantalla coincide con el nivel del rebosadero.

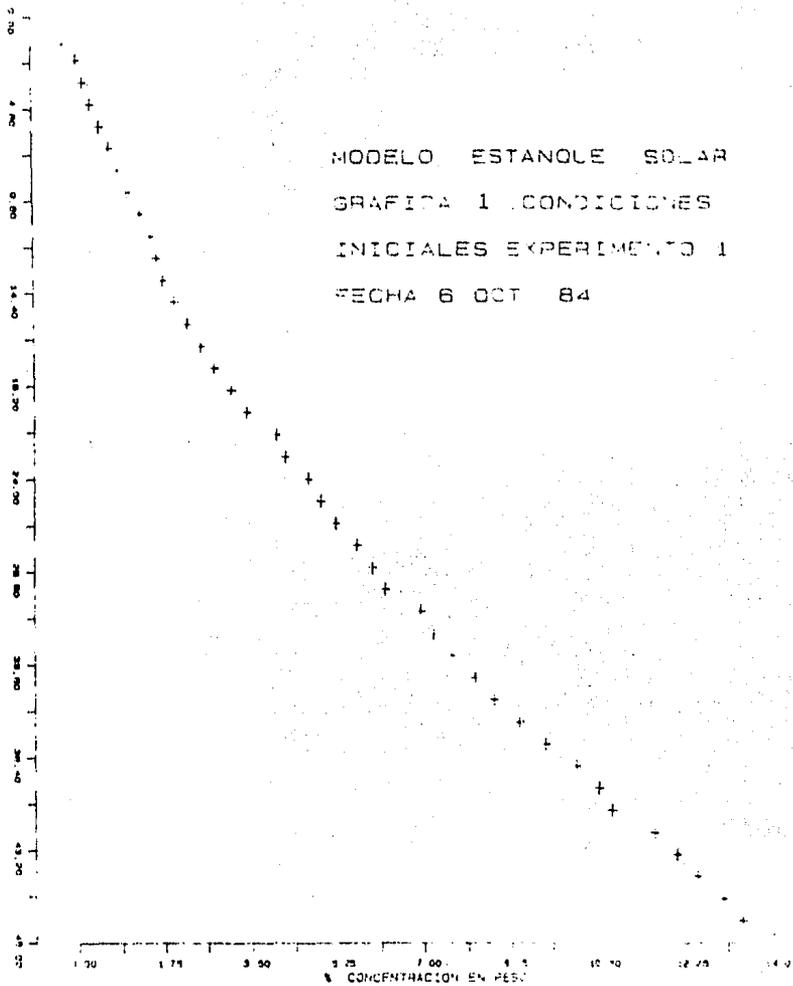


Fig 21 Perfil de concentración.

Las corrientes convectivas que se generan al penetrar las gotas son sumamente violentas y, a medida que avanza el tiempo, van penetrando mas abajo llevando la zona de interfaz hasta una profundidad  $h = 10.7$  cm.

Se pudo observar que las gotas dificilmente penetran mas allá de  $h = 5$  cm; sólo algunas gotas alcanzan esta profundidad ocasionalmente, y aún así las ondas turbulentas (apreciadas en la pantalla porque en este momento ya existen mezclas de fluidos de diferente densidad), llegan a una profundidad de aproximadamente  $h = 10.7$  cm donde son absorbidas por un frente que separa el gradiente de la zona turbulenta; foto 4. Este frente se manifiesta como una línea intensa que se fué desplazando lentamente hacia abajo, a costa del gradiente, a medida que aumentaba el tiempo de duración de la lluvia. Resulta impresionante la estabilidad del gradiente abajo de este frente, mientras que arriba de él se tiene una actividad turbulenta intensa.

Debido a la existencia original de una distancia entre la superficie del agua y el rebocadero, el agua de lluvia en el primer experimento se fue acumulando en la cuba hasta alcanzar el nivel cero. Esto creó un desequilibrio en el perfil formado en los ductos del sistema de capilares, saliendo desordenadamente el nivel en casi todos los ductos. La causa pudo haber sido que ahora la salmuera del plano

correspondiente a cada aguja tiene que soportar una columna de agua mayor que antes. Unas cinco horas después de finalizada la primera corrida estaba casi restablecido el perfil de los niveles en los ductos. Todos subieron aproximadamente 2.3 cm con respecto a su posición original.

Cuando terminaron los 5 min de lluvia, inmediatamente comenzaron a cesar las corrientes convectivas turbulentas, dando lugar a zonas bien definidas abajo (gradiente: tonalidad gris) y arriba (zona de interfaz: banda oscura) del frente que divide ambos. La línea intensa que representa el frente es aparentemente estática, pero en realidad va recuperando espacio, desplazándose hacia arriba muy lentamente, de tal manera que en 3 hr posteriores a la corrida subió 2 mm aproximadamente. También fué perdiendo intensidad hasta casi perderse y dar lugar a una banda oscura, como de 2 cm de espesor en 24 hr.

Una segunda línea, también intensa pero menos definida que la del frente, la cual marca el límite superior de la zona de interfaz, apareció unas cuatro horas después de haber terminado la corrida. Esta última línea no se movió, a diferencia del límite inferior que se contrajo hasta  $h = 10$  cm en un día.

Las condiciones iniciales de la segunda corrida se muestran

en la figura 23. Nótese que el espesor de la ZCS disminuyó hasta  $h = 5$  cm, entre la primera y segunda corridas. El tiempo de duración de la lluvia se incrementó a 10 min. Nuevamente las ondas turbulentas se transmitieron a través de la ZCS, llevando hasta una profundidad de  $h = 13$  cm, en donde nuevamente se formó un frente que absorbía la turbulencia. Fue peculiar el hecho que existiera un poco más de turbulencia por el lado donde baja el coaxial del sensor ya que también por ese lado se encuentra el rebosadero y parece que a consecuencia de esto el frente avanzaba primero por ese lado aunque muy lentamente. Sin embargo, su desplazamiento era casi uniforme y a los 7 minutos de iniciada la lluvia el frente estaba perfectamente definido como una línea muy intensa de unos 2 mm de espesor.

Observando a través de la pared de acrílico de la cuba se podía ver que las corrientes convectivas tenían una trayectoria bien definida. De las cuatro paredes rebotaban las ondas a la profundidad del frente y se encaminaban hacia el centro de la cuba; subían por ahí y casi al llegar a la superficie se desviaban violentamente en dirección al rebosadero. Se entiende que por el rebosadero no salía únicamente agua limpia de lluvia, sino una mezcla de agua limpia y salmuera, que era arrastrada desde la parte superior del gradiente hasta el rebosadero por las corrientes que se creaban debido al impacto de las gotas en la superficie de la

ZCS.

Para la tercera corrida la zona de interfaz estaba entre  $h = 10$  cm y  $h = 13.3$  cm, como se muestra en la figura 25. Esta vez se observó una dinámica diferente de la zona de interfaz. Avanzó el frente intenso hasta  $h = 15.5$  cm, teniendo al final de los 20 min un espesor de 5 mm, el cual fué disminuyendo paulatinamente contrayéndose por la parte superior desde  $h = 15$  cm hasta  $h = 15.5$  cm, es decir, aparentemente la zona de interfaz aumentó su espesor a costa del espesor del frente intenso, en aproximadamente 2 hr. Podríamos intuir que aún cuando ya no existían movimientos convectivos turbulentos, se mantenía cierta energía activa en la zona de interfaz, cuyo efecto produjo que el frente disminuyera muy lentamente en su espesor.

Por primera vez se notó la aparición de una banda menos intensa, pero visible, por debajo del frente, localizada entre  $h = 17.75$  cm y  $h = 18.75$  cm. Esta banda se observó aproximadamente al mismo tiempo que el frente intenso.

La duración de la lluvia fue de 40 min para la corrida número cuatro; durante el transcurso de los cuales se observan perfectamente en la pantalla las ondas turbulentas, y cómo iban penetrando poco a poco en el gradiente; al principio en forma desordenada, pero casi 25 min después en forma de una

banda bastante intensa, dando lugar a un frente un tanto diferente de los anteriores que actúa como un colchón y separa el gradiente de la zona totalmente convectiva.

Observando mas en detalle se apreciaban ciertas corrientes muy leves abajo del frente y cuya actividad daba lugar, muy probablemente, a la segunda banda clara que se observó por primera vez en la corrida anterior.

El frente se contrajo esta vez cuatro milímetros desde ambos límites hacia su centro en una hora.

El reposo del gradiente despues de cada corrida se planeó con el objeto de observar la respuesta del sistema, y por otro lado para tratar de simular una condición que se dá en la naturaleza.

Despues de dos dias el frente era casi imperceptible; sin embargo, la zona de interfaz era claramente visible como una banda oscura en comparación con las otras zonas, culminando en el límite superior con una línea mas o menos intensa y ramificada.

Se repitió el tiempo de duración de la lluvia; es decir, duró 40 min, a lo largo de los cuales se observó como fué avanzando lentamente la turbulencia hacia el fondo, erosionando el gradiente cada vez mas.

Como puede observarse en las fotografías 17 y 18, los contrastes en luminosidad de una y otra zona son bien marcados acentuándose al final de los experimentos:

Zona Convectiva Superior (ZCS):	Tonalidad clara
Zona de Interfaz (ZI):	Tonalidad oscura
Frente de Turbulencia:	Tonalidad intensamente clara
Gradiente Salino (ZNC):	Tonalidad gris

En general la técnica de estudio de sombras se comporta tal como lo indica la bibliografía (7.1)

Unos instantes después de interrumpirse la lluvia, continúan ciertos movimientos oscilatorios en el frente, los cuales van perdiendo intensidad, hasta dejar el arreglo de bandas de diferentes tonalidades casi completamente estático.

La banda menos intensa que el frente principal, pero que cada vez se define mas como un segundo frente dentro del gradiente, apareció nuevamente con unos 6 mm de espesor entre  $h = 22$  cm y  $h = 22.6$  cm.

Unos cinco minutos mas tarde comenzaron a aparecer líneas delgadas en forma desordenada pero tendiendo a situarse horizontalmente, a lo largo del espesor de la ZI. Esta zona alberga un gradiente mucho mas pronunciado que todo el perfil de concentraciones, como puede verse en las gráficas.

A partir de la corrida número cuatro se mantuvo constante el tiempo de duración de la lluvia con el objeto de observar la respuesta para una condición específica al término del experimento. Diariamente se llevó a cabo una corrida y las gráficas muestran el comportamiento del gradiente en cada una de ellas hasta el día 22 Oct 84 acumulándose hasta esta fecha un total de 15 corridas. El motivo de la interrupción fué la respuesta obtenida. Como lo demuestran las gráficas, el avance del frente turbulento fué disminuyendo paulatinamente hasta el grado de avanzar sólo 0.5 cm en 40 min de lluvia. Esto hace pensar en una respuesta de tipo exponencial y la gráfica que ilustra el avance lo comprueba. Para observar el avance después de un día de reposo se llevó a cabo otra corrida el 24 del mismo mes. Por último el reposo del estanque duró hasta el 5 de Dic. en que se hicieron incidir otros cuarenta minutos de lluvia. Esta vez aún cuando el gradiente estaba prácticamente recuperado, la actividad convectiva al penetrar las gotas cayó directamente hasta una profundidad de  $h = 14.5$  cm aproximadamente. Es decir al inicio de la lluvia las ondas turbulentas aparecieron a esta profundidad y alcanzaron finalmente una profundidad de  $h = 17.7$  cm. Cabe mencionar que el avance del frente turbulento toma valores diferentes, siendo generalmente mayor al iniciar la lluvia. En este caso se registraron valores hasta de un centímetro en tres y medio minutos, cosa que nunca antes se había presentado sobre todo tomando en cuenta la profundidad

a la que se registró este avance.

Después de casi un mes y medio de inactividad en el gradiente, salvo la evaporación, el frente de sal invadió casi toda la ZCS. El sensor detectó cierta concentración aún muy cerca de la superficie.

La superficie del agua bajó hasta una profundidad de casi 4 cm con una tasa de evaporación de 0.86 mm por día.

## 7.2 Análisis de la Información.

A manera de resumen se presenta la tabla 4. La zona de interfaz tiene una posición Inicial y una Final correspondiente a cada corrida y también presenta un espesor diferente al inicio y al término del periodo de lluvia. La diferencia en la posición inicial y final es clara por el avance logrado por el frente, pero el espesor diferente no es tan obvio; El espesor de la zona de interfaz al inicio de una nueva corrida es mayor que al término de ésta. Creemos que esto se debe en el primer caso principalmente a la difusión de sal hacia la superficie del estanque durante el tiempo de reposo, lo cual indica que existe una recuperación del gradiente de concentraciones al final de la lluvia.

La sal que se difunde invade la zona convectiva superior durante el reposo del estanque de tal forma que en ausencia de otros factores externos puede causar la desaparición de la zona de interfaz y sumar la ZCS al gradiente de concentraciones para conseguir una total recuperación del mismo cuando el tiempo de reposo es tan prolongado como en el caso de la corrida número 17; que tuvo un tiempo de reposo de casi 41 días. La recuperación es en realidad parcial pues el gradiente se va debilitando cada vez que pierde sal en forma acelerada o pausada y ésta no se recupera.

La zona convectiva superior durante la lluvia es una capa con

espesor cada vez mayor en la que se transporta el momentum hacia la zona de interfaz, y a su vez sirve como medio de transporte de la sal cedida por el gradiente bajo la erosión causada por la turbulencia, que se va hacia la superficie y sale mezclada con el agua de lluvia por el rebosadero.

La Zona de Interfaz requiere para su existencia la existencia de una zona convectiva superior en el estanque y es una zona con un gradiente salino muy fuerte; es decir, en ella existe un cambio de concentración bastante pronunciado para un espacio pequeño dando como resultado la formación de infinidad de planos de diferente concentración en un espesor de unos cuantos centímetros. Durante la lluvia es tal la turbulencia de la ZCS que prácticamente todo el espesor de la ZI tiene la misma concentración, pues está invadida por las corrientes turbulentas de salmuera en forma desordenada. Al término de la lluvia la mayor parte de la sal cedida por el gradiente queda contenida en la ZI y empiezan a formarse esos planos sumamente delgados con diferente concentración y, como en la ZCS la existencia de sal es mínima, comienza inmediatamente la difusión llevando a crecer en poco tiempo el espesor de la Zona de Interfaz.

El frente intenso se presenta cuando la lluvia tiene cierto tiempo de incidir sobre la cuba (de 5 a 7 min). Inicialmente cuando aparece forma una línea de uno o dos mm y poco a poco

va aumentando su espesor hasta convertirse en una banda que se mueve mucho más lento que la ZI, aumentando o disminuyendo su espesor en forma desordenada actuando como una onda que sirve de intermediaria entre la ZI totalmente turbulenta y el gradiente totalmente estable. Cuando termina la lluvia alcanza un espesor determinado y forma una banda totalmente horizontal y aparentemente inalterable. El espesor final alcanzado por el frente parece estar en proporción con el avance sobre el gradiente pues en los últimos corridas su espesor fué muy pequeño y, como se observa en la tabla 4 el avance en la parte final del experimento también fué muy pequeño excepto en la última corrida en la que tuvo un papel muy importante el tiempo de reposo.

Cuando comenzó a aparecer el segundo frente no se veía turbulencia abajo del frente intenso original; sin embargo, a medida que avanzaba el experimento era mucho más visible este segundo frente y ya se observaba cierta actividad de la parte de gradiente comprendida entre ambos. Cuando el frente intenso perdía espesor en las últimas etapas del experimento, el segundo frente era cada vez menos visible.

En la figura 56 se resumen los resultados de los experimentos mediante una curva del tipo exponencial que muestra el avance de la zona de interfaz a medida que el tiempo efectivo de lluvia se incrementó. De estos experimentos se puede deducir que el avance en la posición de la interfaz parece depender

de varios factores, entre los que se cuenta la profundidad a la que se encuentra la interfaz al iniciarse la lluvia, el tiempo de duración de ésta y la condición del gradiente. Al principio de los experimentos, cuando el gradiente se extendía prácticamente hasta la superficie del estanco, el avance fué muy notorio y a medida que aumentaba el espesor de la ZCS, el avance fué cada vez menor. Para la última corrida el espesor de la ZCS disminuyó notoriamente, de 30 cm a casi 12 cm, debido a la difusión de la sal del gradiente. Sin embargo el gradiente se había debilitado en su parte superior, y al ocurrir la lluvia, el avance de la interfaz fué comparable en magnitud al de la primera corrida del experimento.

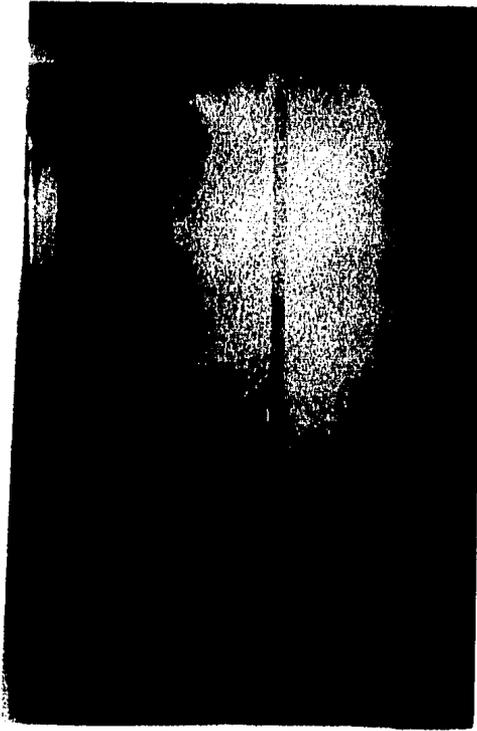
En la tabla 4 se dá un parámetro llamado tasa de erosión y nos indica el desplazamiento del frente turbulento por unidad de tiempo. Los valores que aparecen representan el promedio correspondiente a cada corrida del experimento, sin embargo, la tasa de erosión alcanzó valores mayores en algunas ocasiones, sobre todo al iniciar la lluvia en cada corrida. Analizando mas en detalle el comportamiento de la tasa de erosión, podemos observar que con los valores que toma se puede trazar una curva semejante a la que se encuentra en la figura 56 que corresponde al avance del frente y que es del tipo exponencial. Es decir, podríamos asumir que esta última curva esta formada de pequeñas curvas exponenciales

correspondientes al comportamiento de la tasa de erosión durante cada corrida, pues al iniciar la lluvia la tasa de erosión tomaba valores mayores que al finalizar y por otro lado dichos valores eran cada vez mas pequeños conforme crecia la zona convectiva superior.

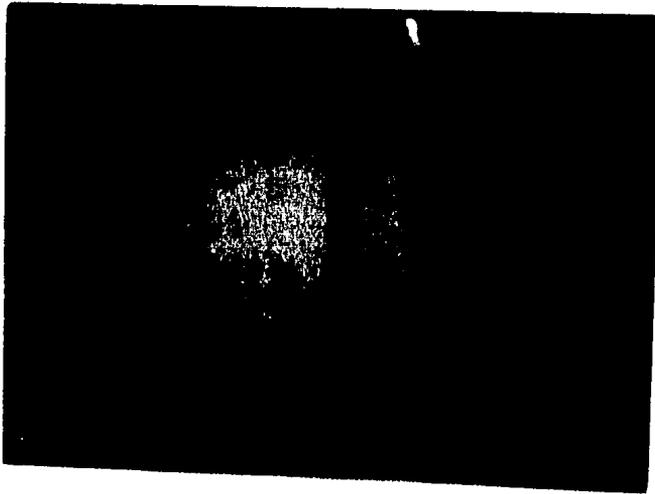
**TABLA 4**

No. de corri- da	Zona Interfaz		Frente Intenso		2o. F. I.		Avance del F.	Tasa de Erosión	
	Posic Ini-Fin h(cm)	Espe- sor (cm)	Posic Final h(cm)	Espe- sor (mm)	Pos h	Esp mm			
1	10.6	3.6	10.8	1.0			7.9	1.58	
2	10.5	13.0	4.5	2.5	13.3	2.5	2.5	0.25	
3	13.0	15.0	4.0	2.5	15.5	5.0	18.8 10	2.25	0.113
4	15.0	17.2	4.0	2.7	18.0	9.0	20.8 10	2.5	0.063
5	17.0	18.9	4.5	2.4	19.4	5.0	22.4 10	1.4	0.035
6	19.0	20.0	4.8	2.5	20.8	8.0	23.3 5.5	1.4	0.035
7	19.8	21.1	4.0	2.6	21.7	6.0	24.4 6.0	0.9	0.023
8	20.8	21.8	4.5	2.5	22.3	5.0	25.2 7.0	0.6	0.015
9	21.2	22.5	4.0	2.8	23.0	5.0	25.8 6.0	0.7	0.017
10	22.5	23.1	5.0	2.9	23.6	5.0	26.3 5.5	0.6	0.015
11	23.5	23.8	5.3	3.0	24.2	4.0	27.0 5.0	0.55	0.014
12	23.5	24.1	4.5	2.9	24.5	4.0	27.3 5.0	0.35	0.009
13	24.0	24.5	5.0	2.8	24.8	3.0	27.7 4.0	0.3	0.008
14	24.0	24.8	4.3	2.8	25.2	4.0	28.2 5.0	0.4	0.010
15	24.8	25.2	4.6	2.7	25.4	2.0	28.3 5.0	0.2	0.005
16	24.5	25.0	4.5	2.8	25.4	2.5		0.0	0.0
17	12.0	17.7	4.0	1.9	18.0	3.0	20.9 7.0	6.0	0.150

Fotografía 3

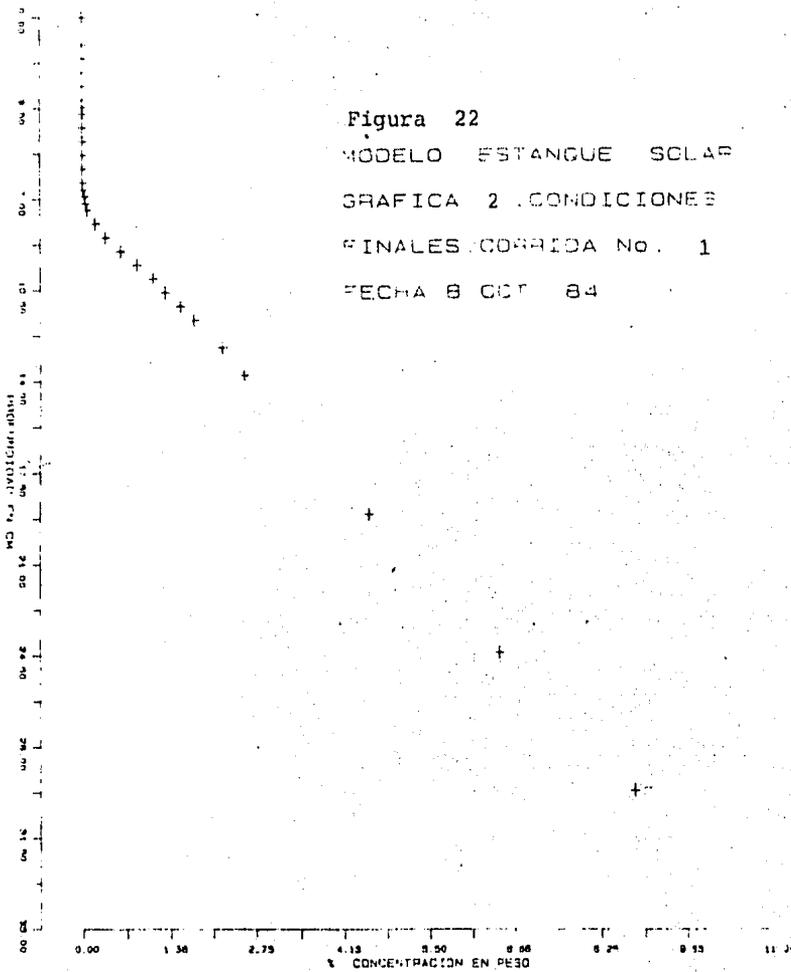


Fotografía 4

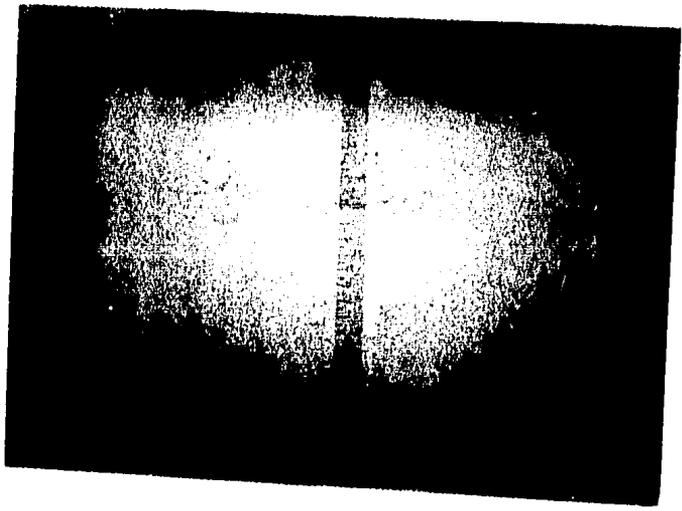


CONDICIONES INICIAL Y FINAL CORRIDA 1

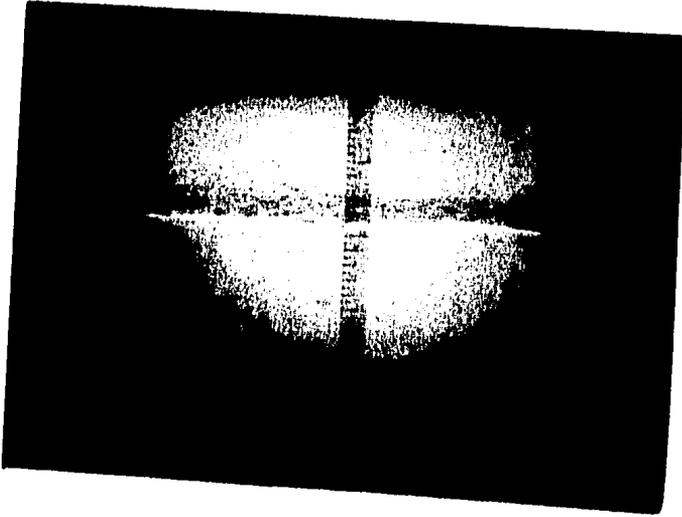
Figura 22  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 2 .CONDICIONES  
 FINALES CORRIIDA No. 1  
 FECHA 8 OCT 84



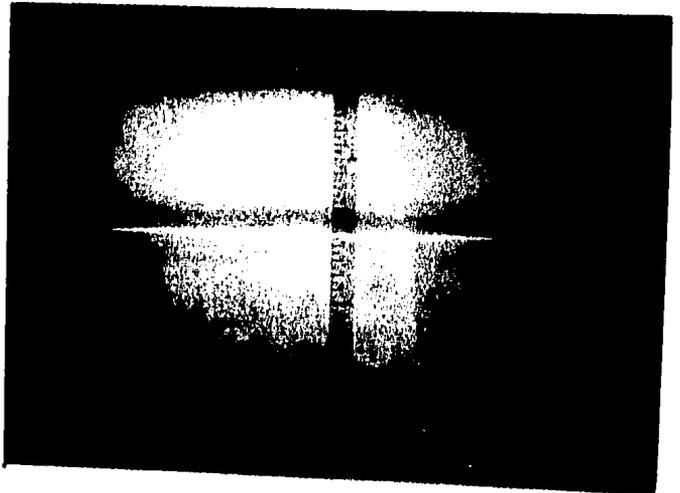
Fotografía 5



Fotografía 6



Fotografía 7



ECUENCIA DE LA CORRIDA 2

Figura 23

MODELO ESTACION SOLAR

GRAFICA 3 .COND. ... LES

INICIALES. CORRIDA 2

FECHA 8 OCT 64

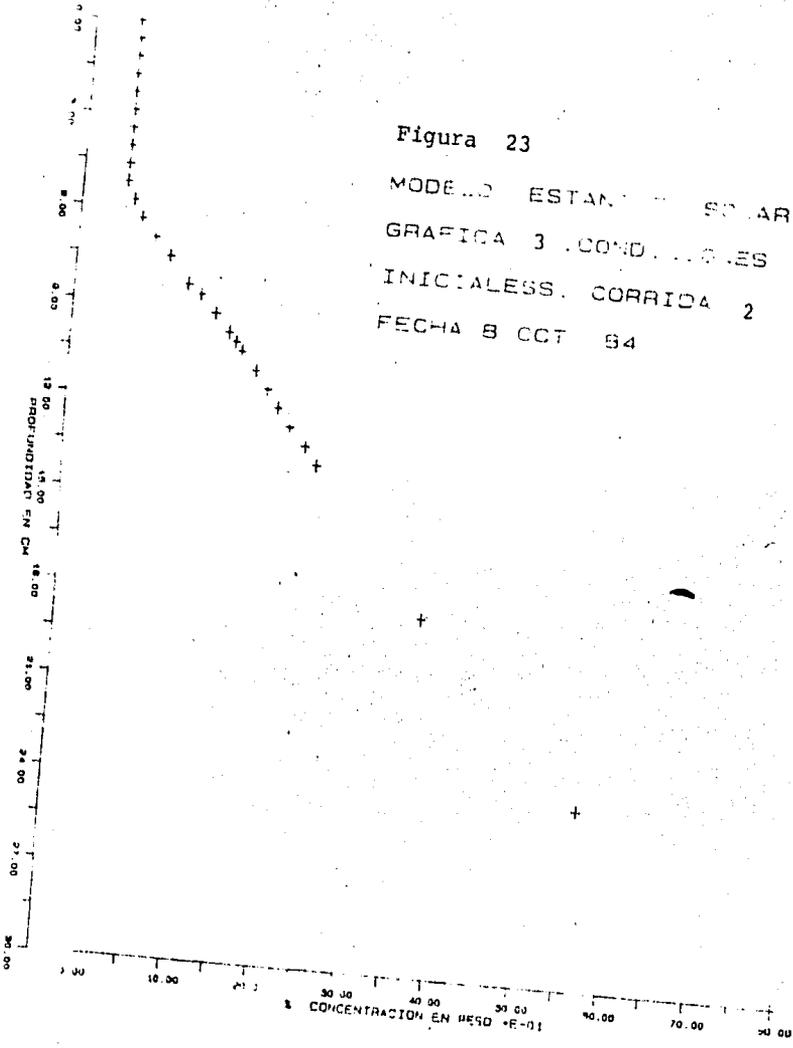
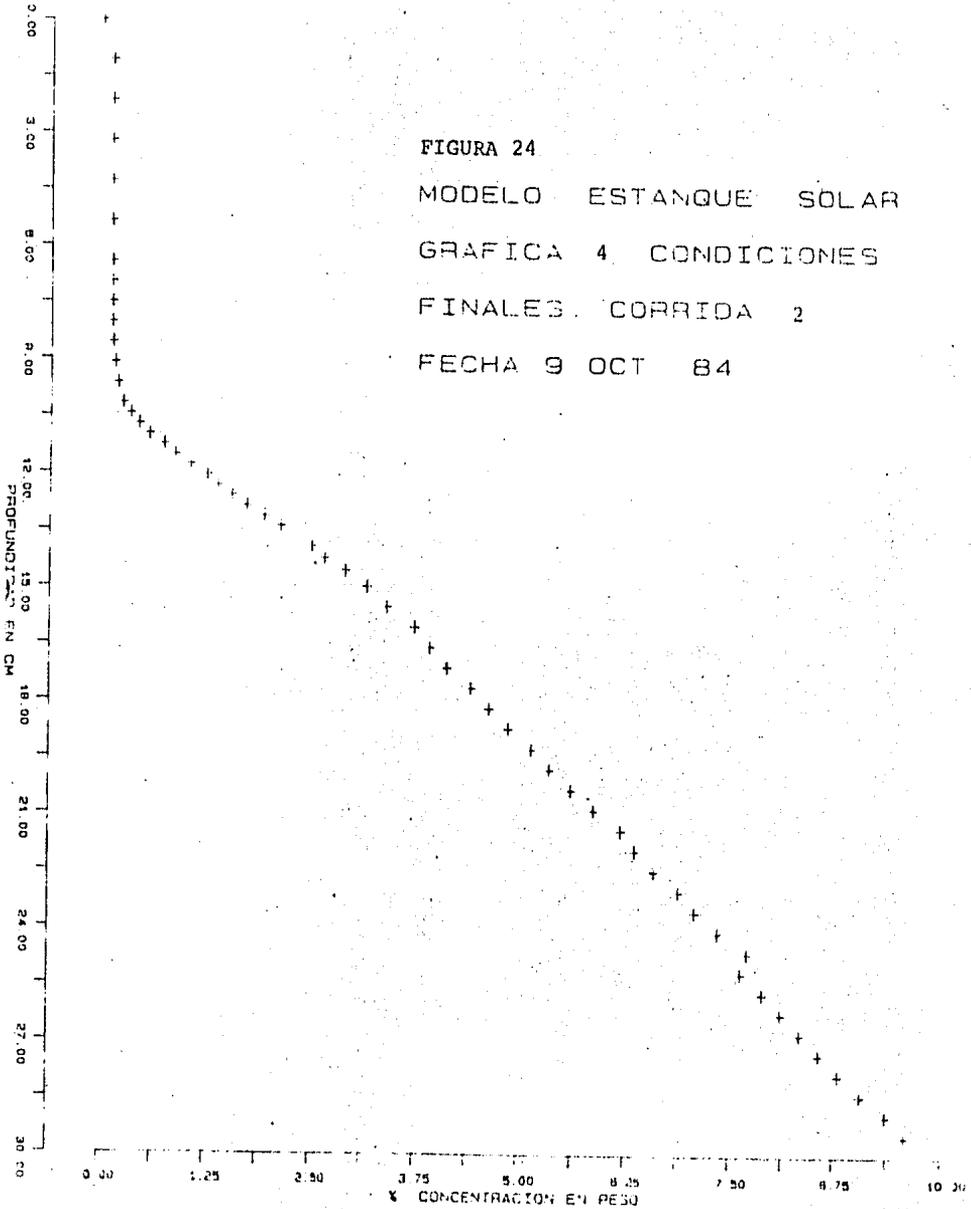


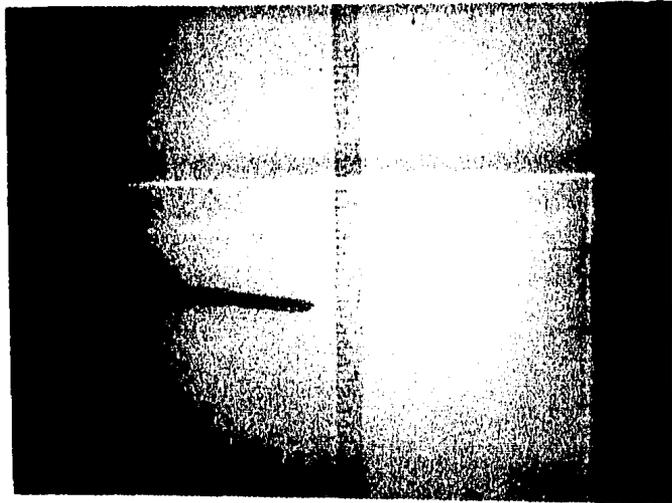
FIGURA 24  
MODELO ESTANQUE SOLAR  
GRAFICA 4. CONDICIONES  
FINALES. CORRIDA 2  
FECHA 9 OCT 84





Fotografía 9

COMPORTAMIENTO DEL GRADIENTE ANTERIOR Y POSTERIOR  
A LA CORRIDA 3 . EL SENSOR SE SITUA A UNA DETER  
MINADA PROFUNDIDAD DURANTE LA CORRIDA.



Fotografía 8

00 00  
 2 50  
 5 00  
 7 50  
 10 00  
 12 50  
 15 00  
 17 50  
 20 00  
 22 50  
 25 00

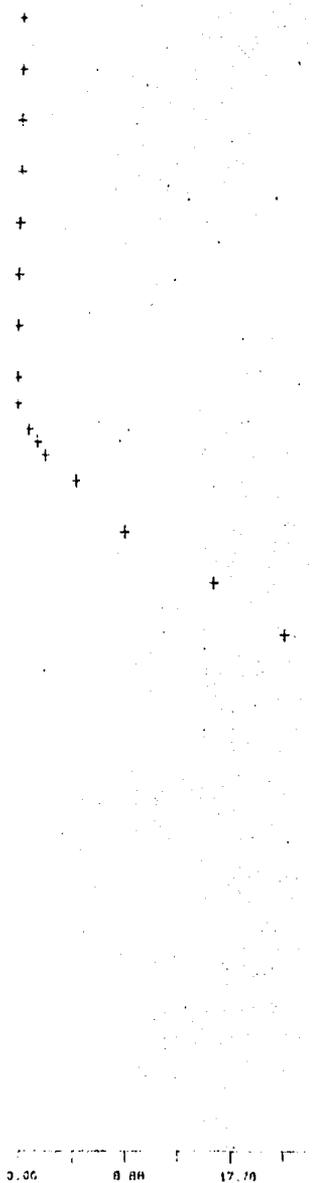
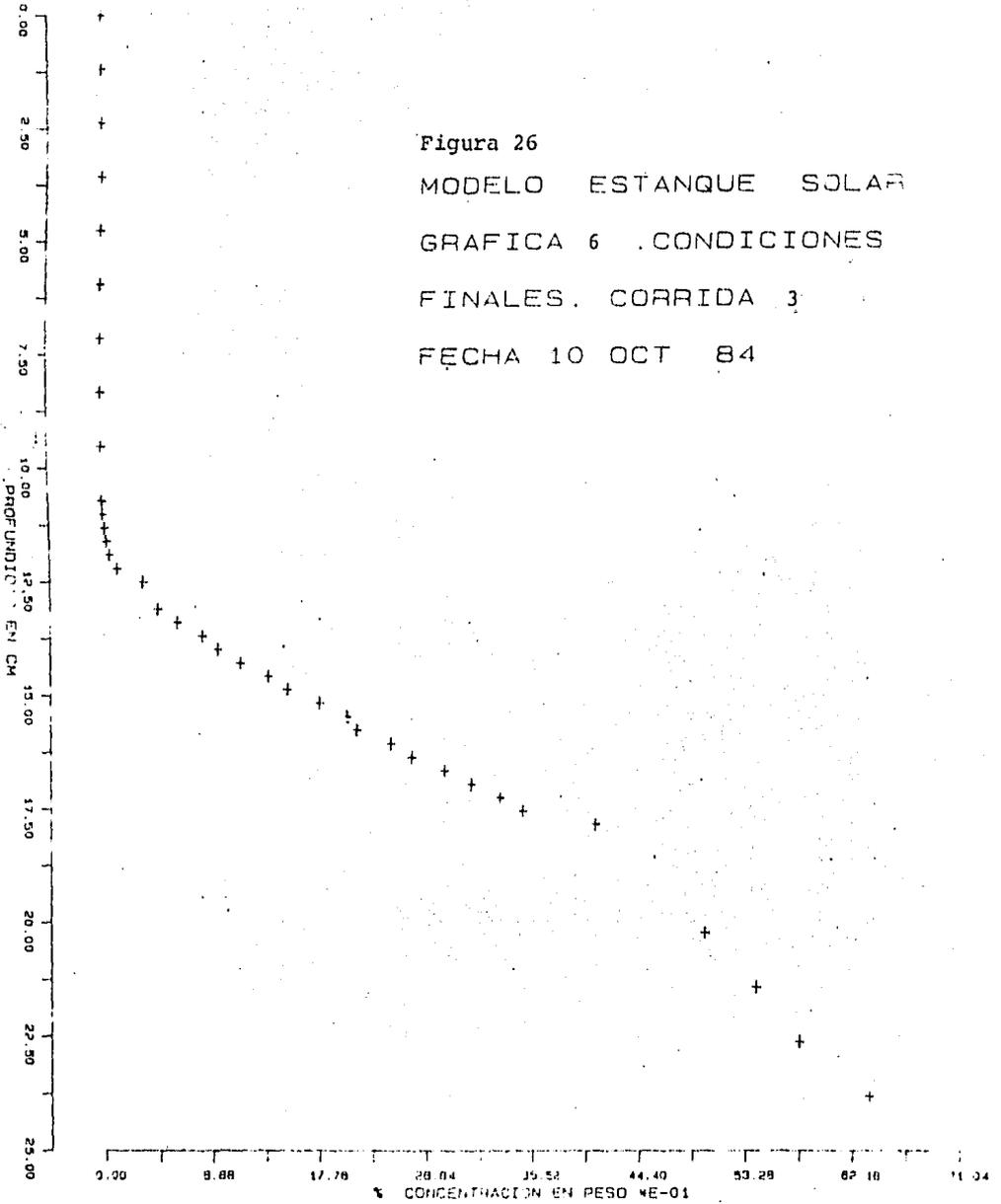


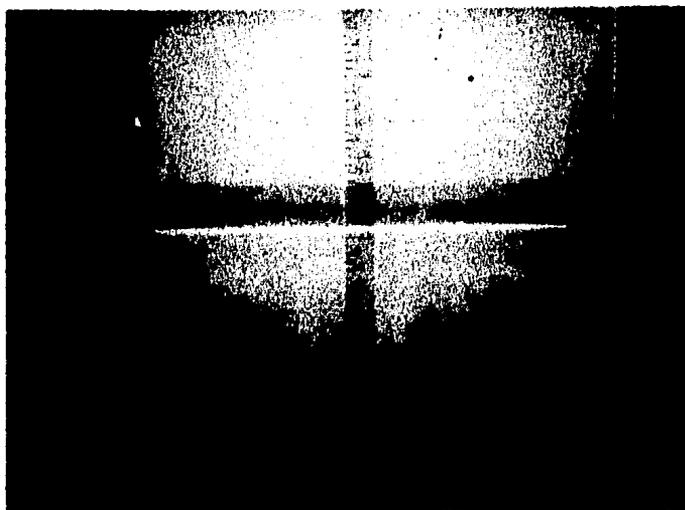
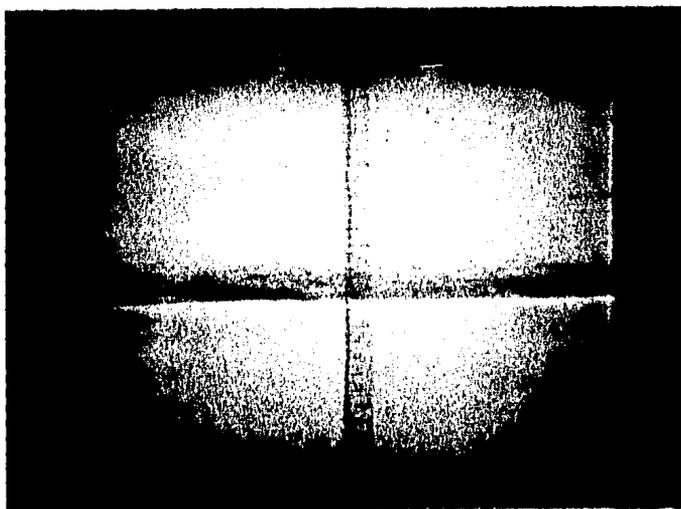
Figura 25  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 5 .CONDICIONES  
 INICIALES. CORRIDA 3  
 FECHA 9 OCT 84

3.00 8.88 17.76 26.64 35.52 44.40 53.28 62.16 71.04  
 % CONCENTRACION EN PLSO #E 01

Figura 26  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 6 .CONDICIONES  
 FINALES. CORRIDA 3  
 FECHA 10 OCT 84



Fotografía 10



Fotografía 11

NOTESE LA PENETRACION DE LAS GOTAS DURANTE LA CORRIDA 4  
Y LA POSICION DE LA ZONA DE INTERFAZ UNA HORA DESPUES DE  
TERMINADA LA MISMA.

Figura 27  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 7 .CONDICIONES  
 INICIALES. CORRIDA 4  
 FECHA 10 OCT 84

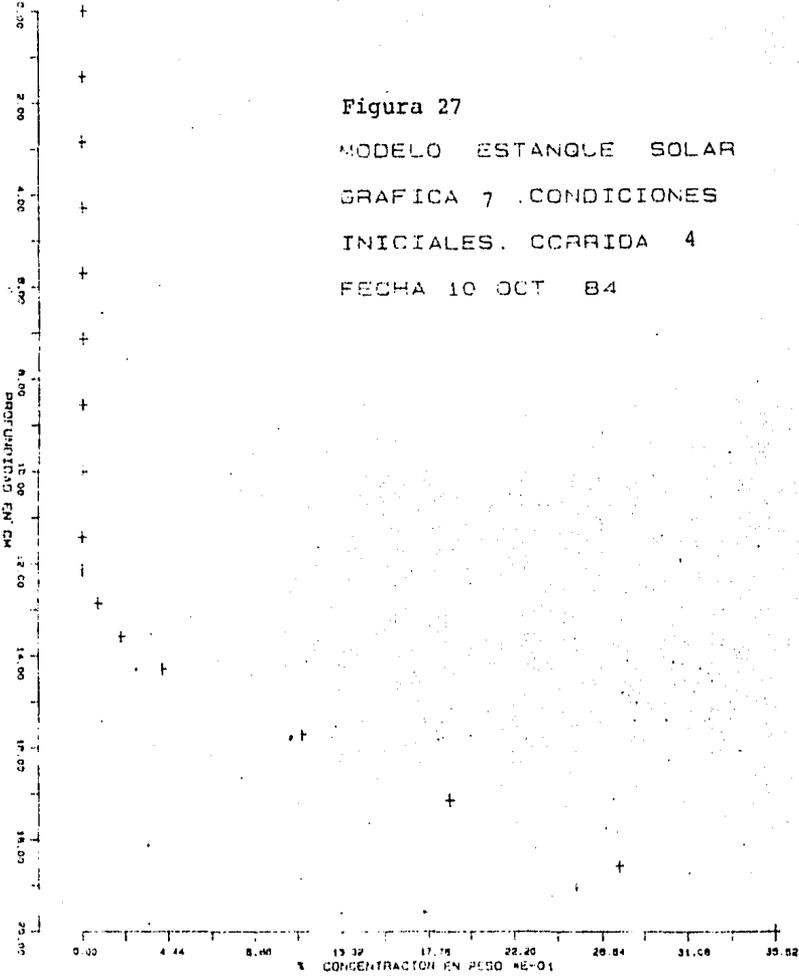
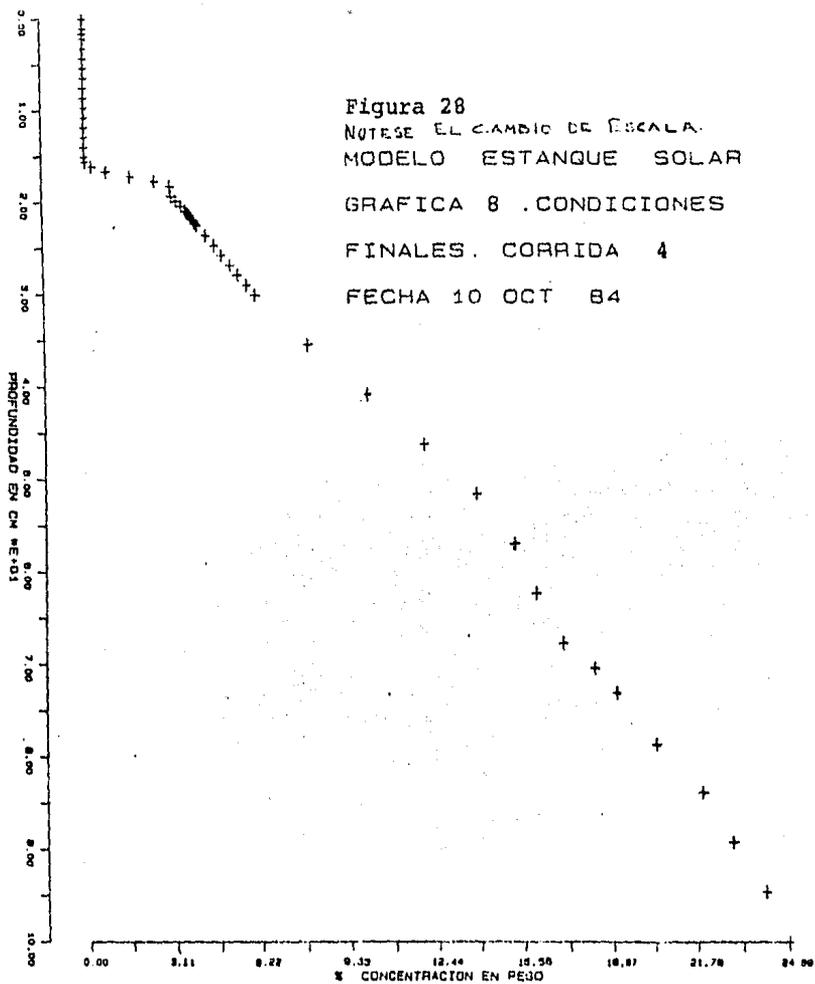
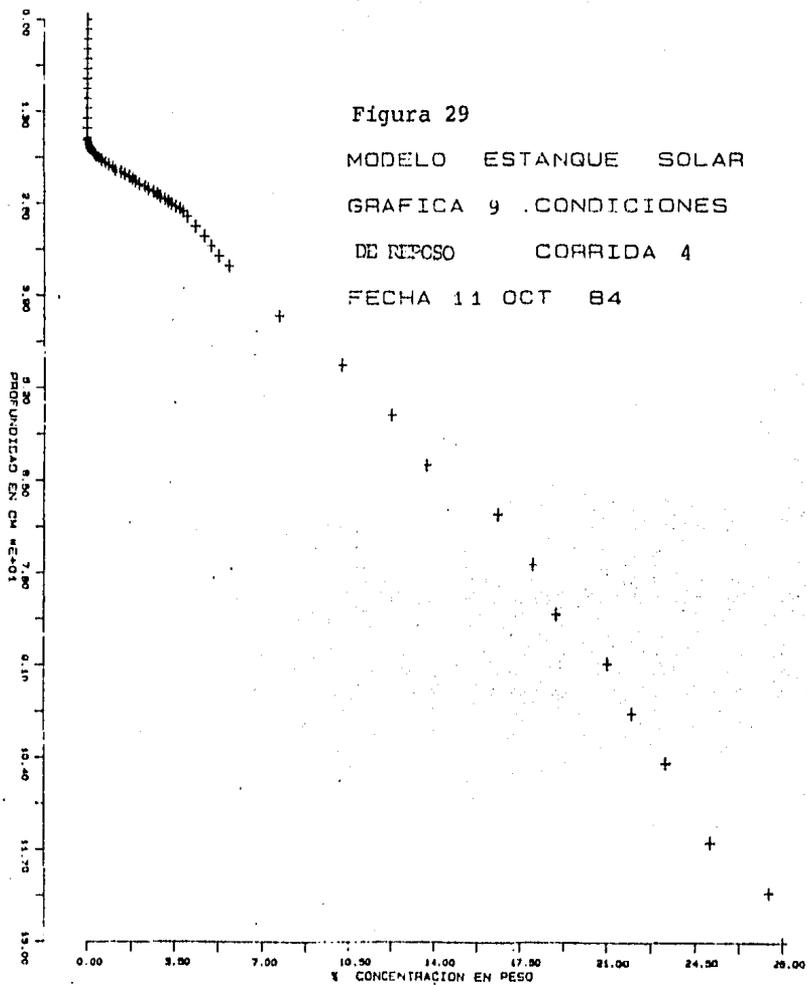
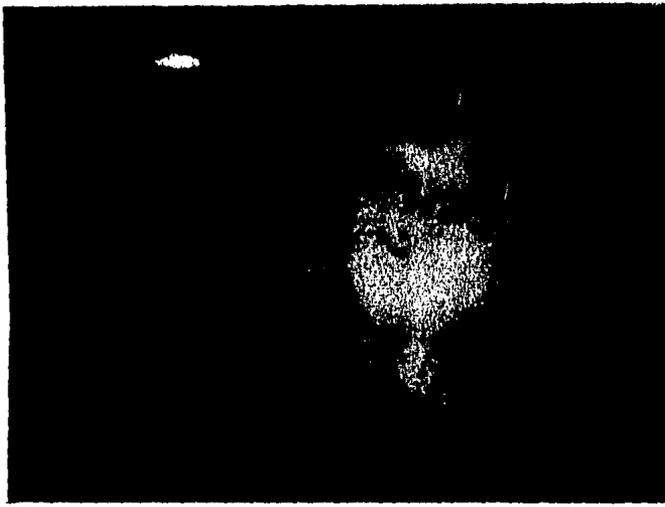


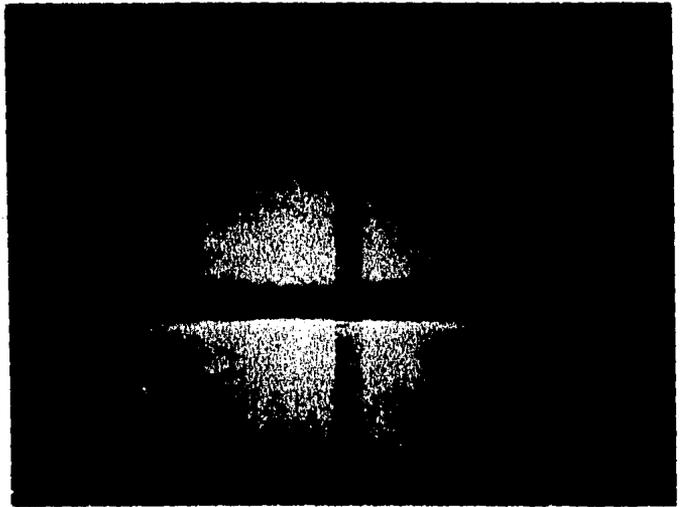
Figura 28  
 NOTESE EL CAMBIO DE ESCALA.  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 8 .CONDICIONES  
 FINALES. CORRIDA 4  
 FECHA 10 OCT 84



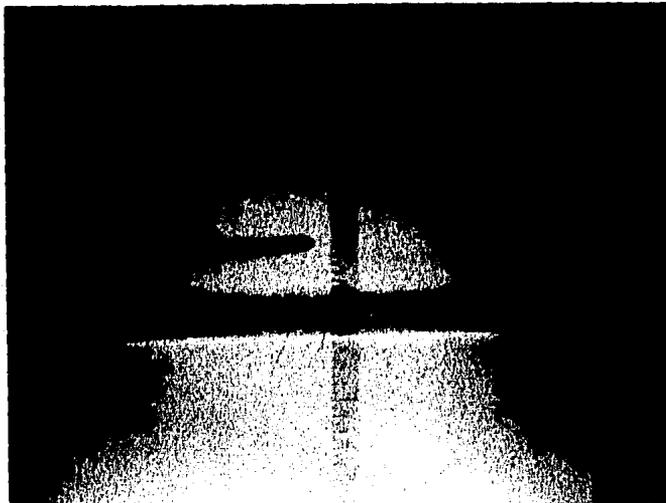




Fotografía 12  
LAS ONDAS TURBULENTAS  
AL INICIAR LA CORRIDA SON  
MUESTRA PALPABLE DE  
EFECTO DESTRUCTOR DE LA  
LLUVIA SOBRE EL GRADIENTE.



Fotografía 13  
BANDA DE INTERFAZ (BANDA  
OScura) PERFECTAMENTE  
DELIMITADA ANTES DE COMENZAR  
LA LLUVIA.



Fotografía 14

Figura 30

MODELO ESTANQUE SOLAR  
GRAFICA 10. CONDICIONES  
INICIALES. CORRIDA No. 5  
FECHA 12 OCT 84

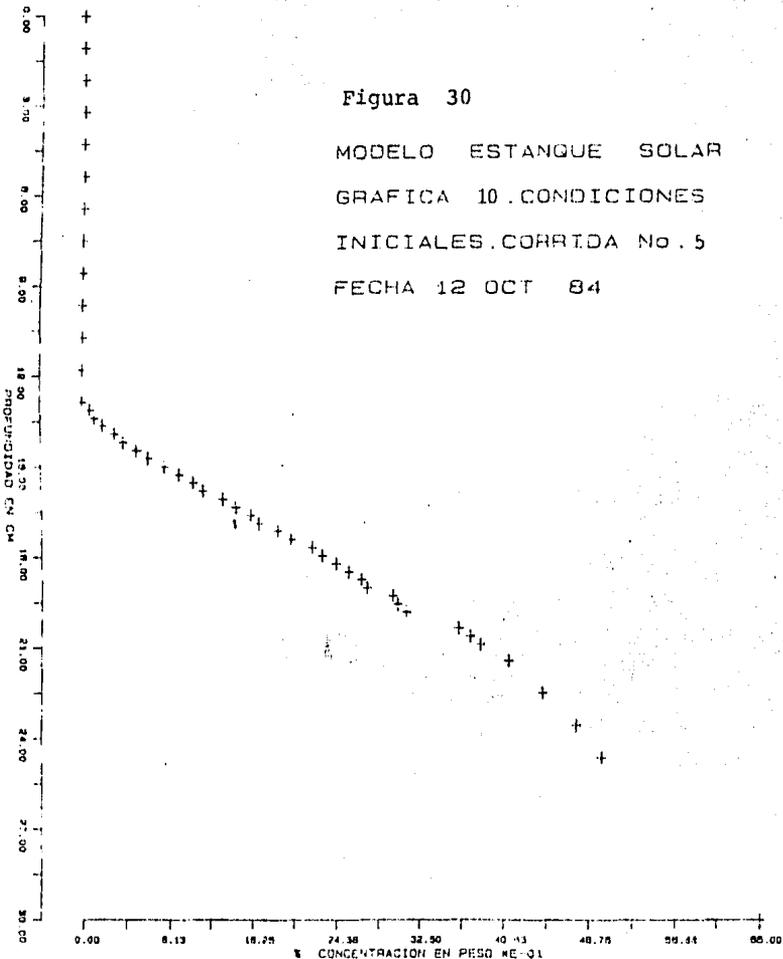


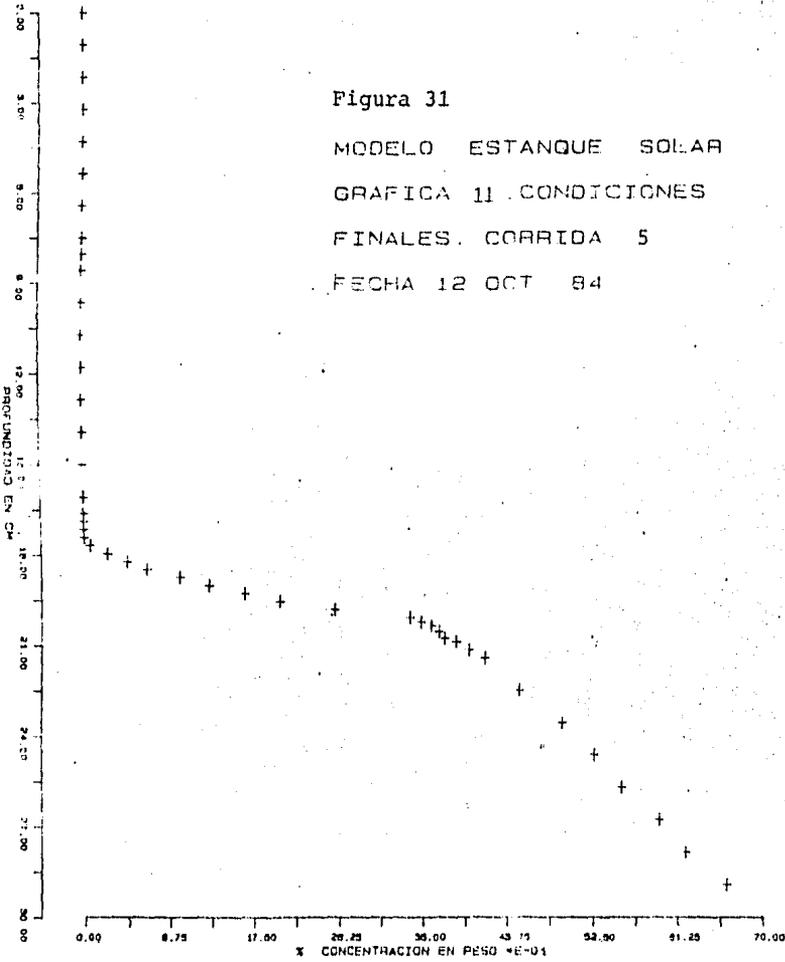
Figura 31

MODELO ESTANQUE SOLAR

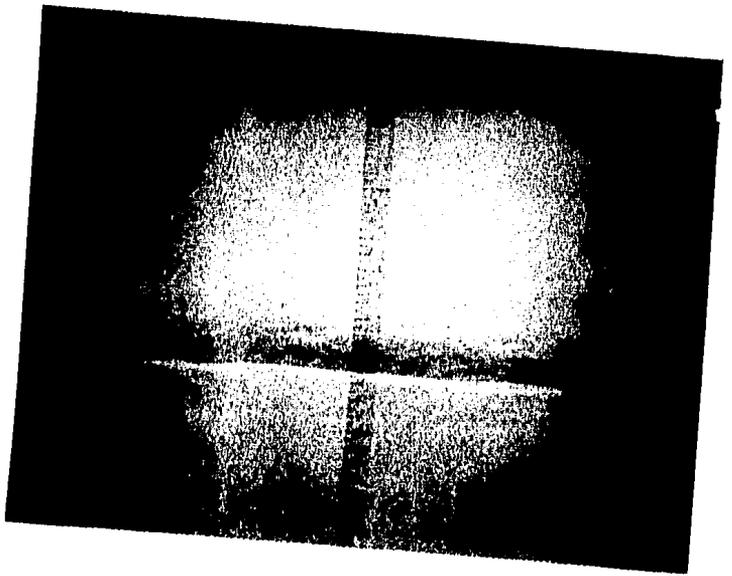
GRAFICA 11. CONDICIONES

FINALES. CORRIDA 5

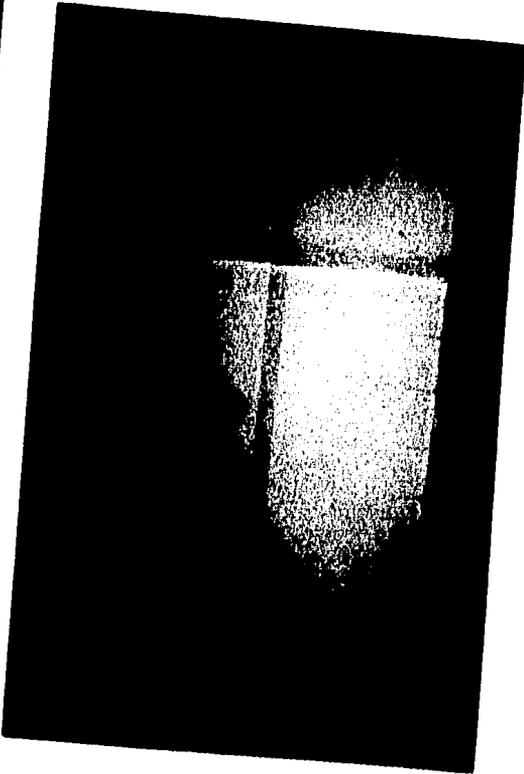
FECHA 12 OCT 84



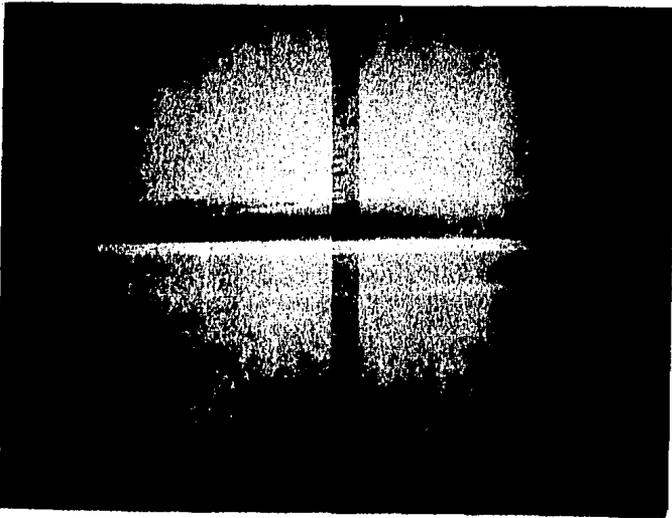
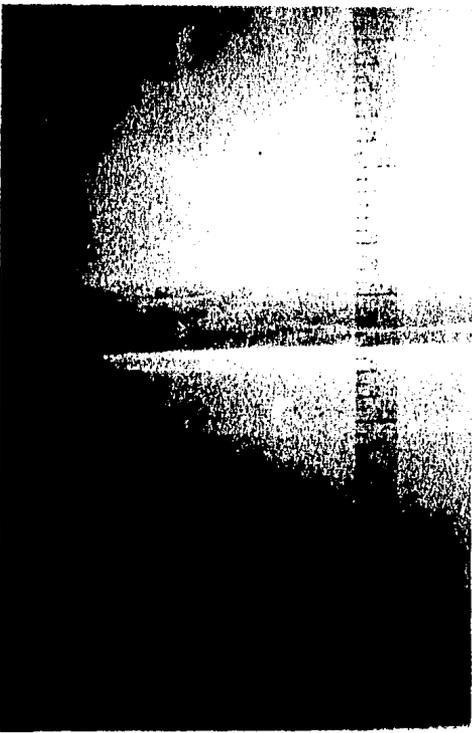
Fotografía 15



Fotografía 16  
OBSERVESE LA EVOLUCION DEL  
FRENTE INTENSO QUE SEPARA  
A LA ZONA DE INTERFAZ DE LA  
ZONA DE GRADIENTE SITUADA  
ABAJO DEL ANTERIOR DURANTE LA  
CORRIDA 6



FOTOGRAFIA 17



FOTOGRAFIA 18

UNO DE LOS ESPESORES MAS GRANDES ALCANZADOS POR EL FRENTE INTENSO ( APROX 1 cm ). LENTA RECUPERACION DE AMBAS BANDAS Y LA CONFIRMACION DE UN SEGUNDO FRENTE INTENSO. CORRIDA 6

Figura 32<sup>1</sup>

MODELO ESTANQUE SOLAR

GRAFICA 12 .CONDICIONES

INICIALES. CORRIDA 6

FECHA 13 OCT 84

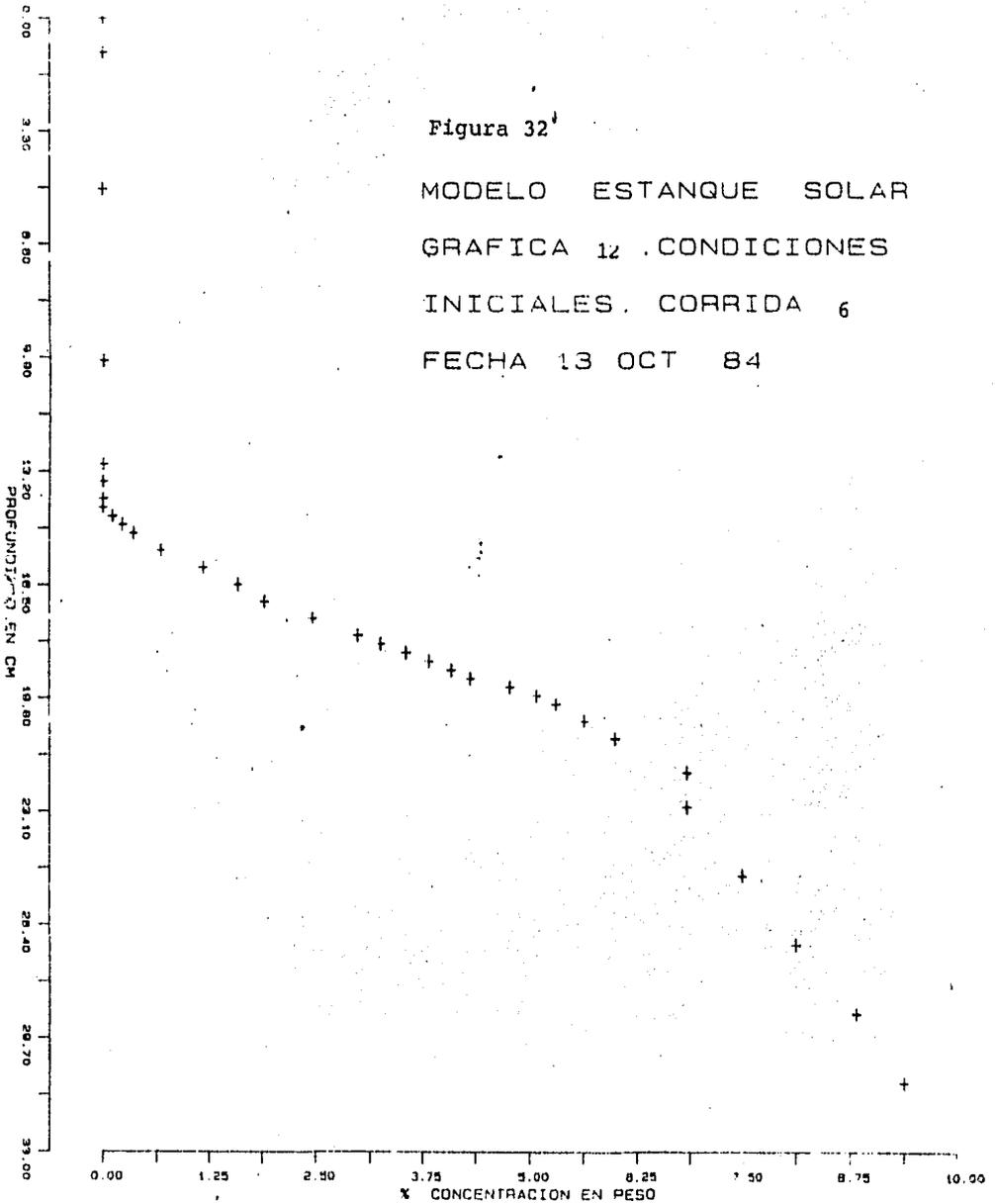
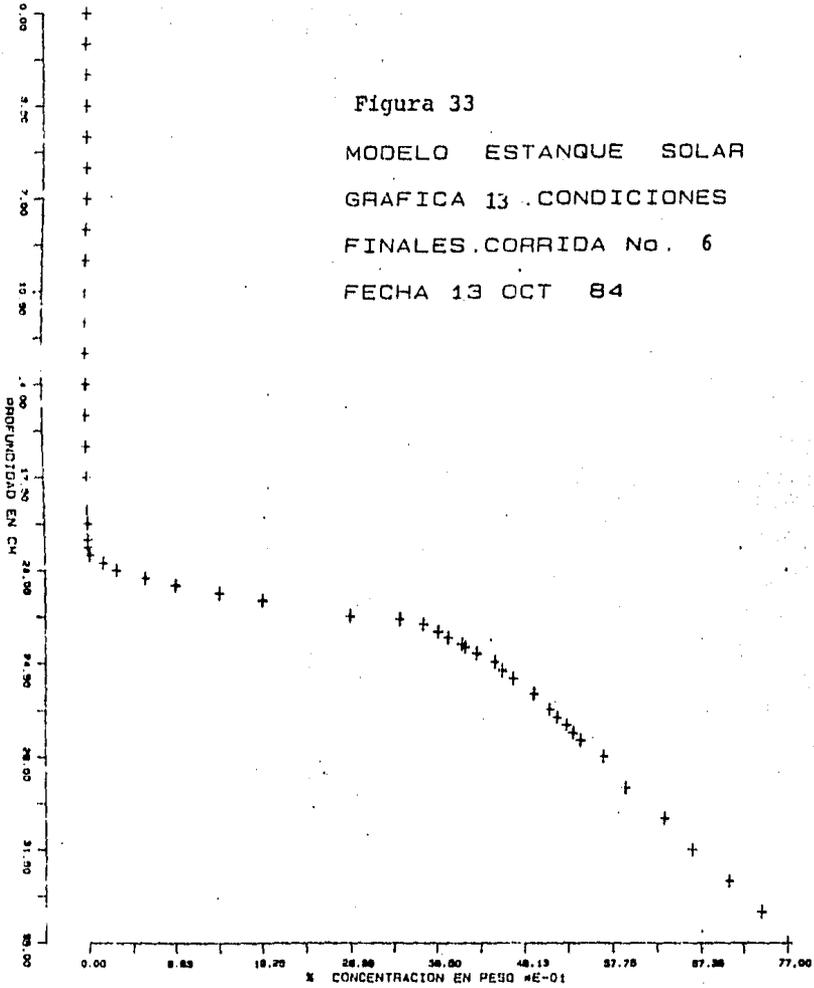
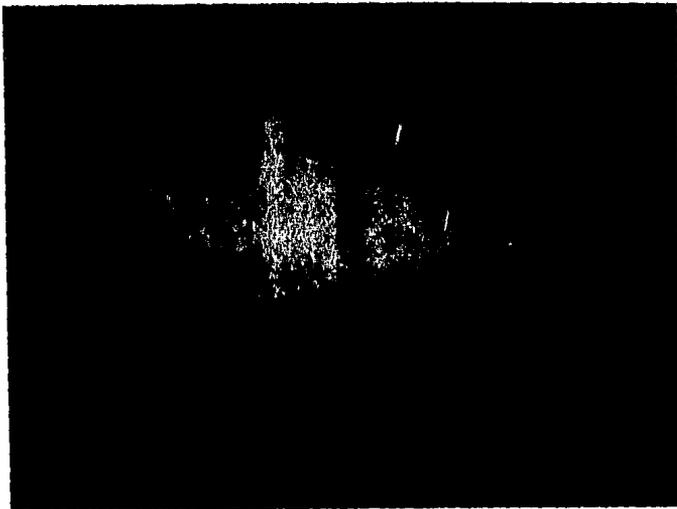


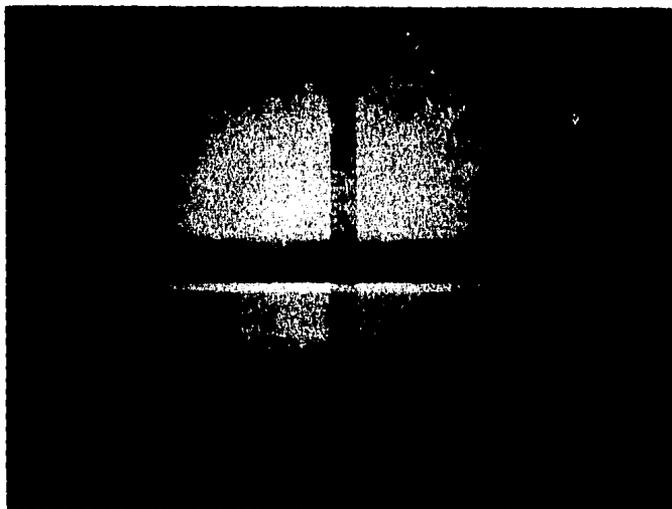
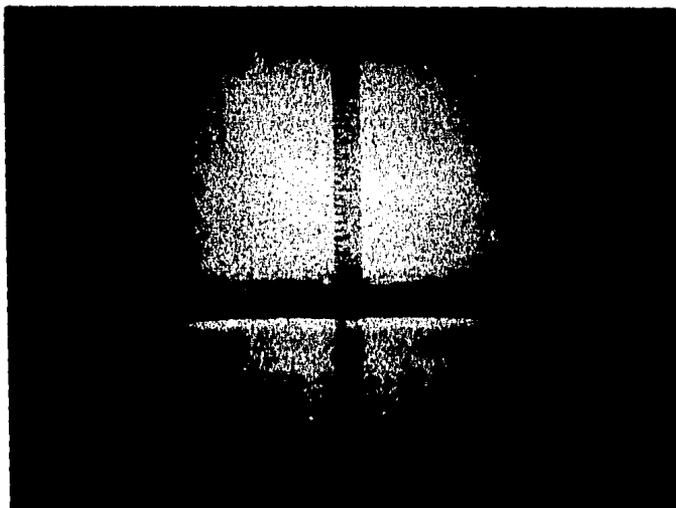
Figura 33  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 13 .CONDICIONES  
 FINALES .CORRIDA No. 6  
 FECHA 13 OCT 84



Fotografía 19  
COMPARE LA PROFUNDIDAD A  
LA QUE LLEGAN LAS ONDAS  
TURBULENTAS Y LA POSI-  
CION DE LA ZI Y EL FREN  
TE INTENSO A LO LARGO  
DE LA CORRIDA 7.



Fotografía 20



Fotografía 21

Figura 34

MODELO ESTANQUE SOLAR  
GRAFICA 14 .CONDICIONES  
INICIALES .CORRIDA No . 7  
FECHA 14 OCT 84

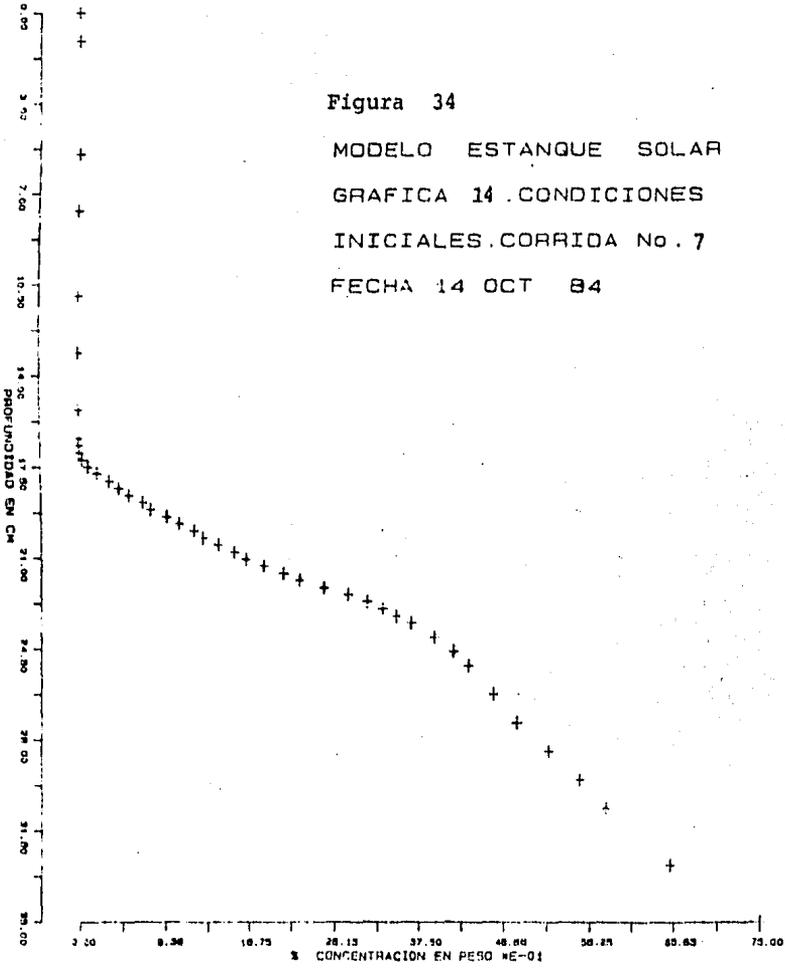


Figura 35

MODELO ESTANQUE SOLAR  
GRAFICA 15 .CONDICIONES  
FINALES.CORRIDA No. 7  
FECHA 14 OCT 84

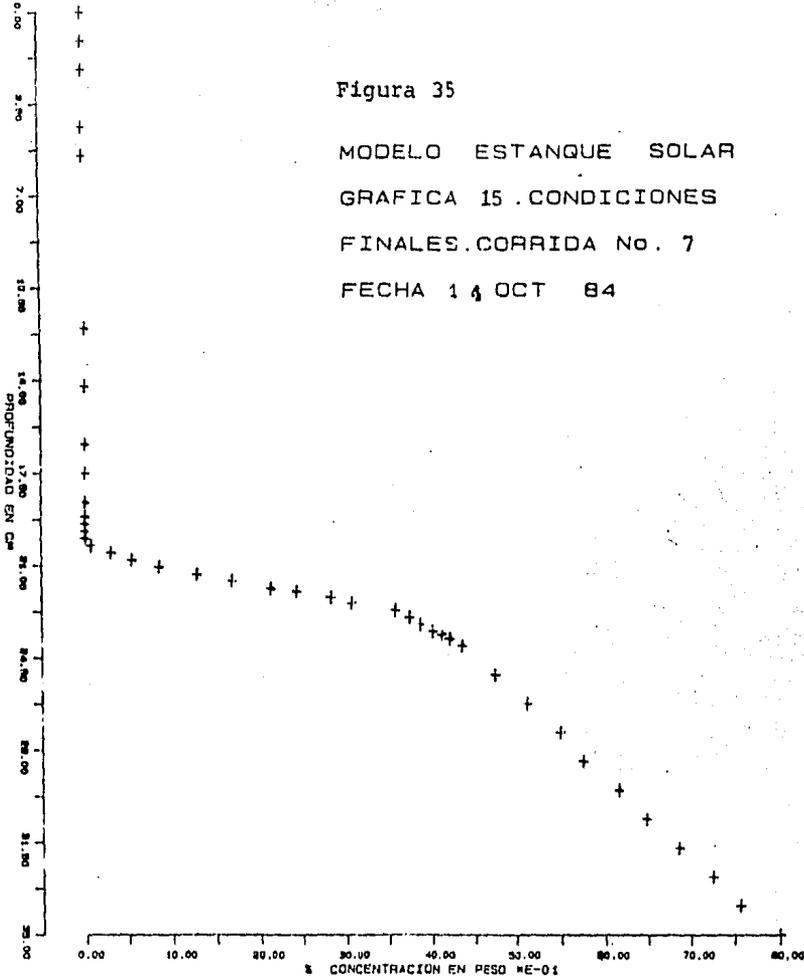


Figura 36

MODELO ESTANQUE SOLAR  
GRAFICA 16 .CONDICIONES  
INICIALES .CORRIDA No. 8  
FECHA 15 OCT 84

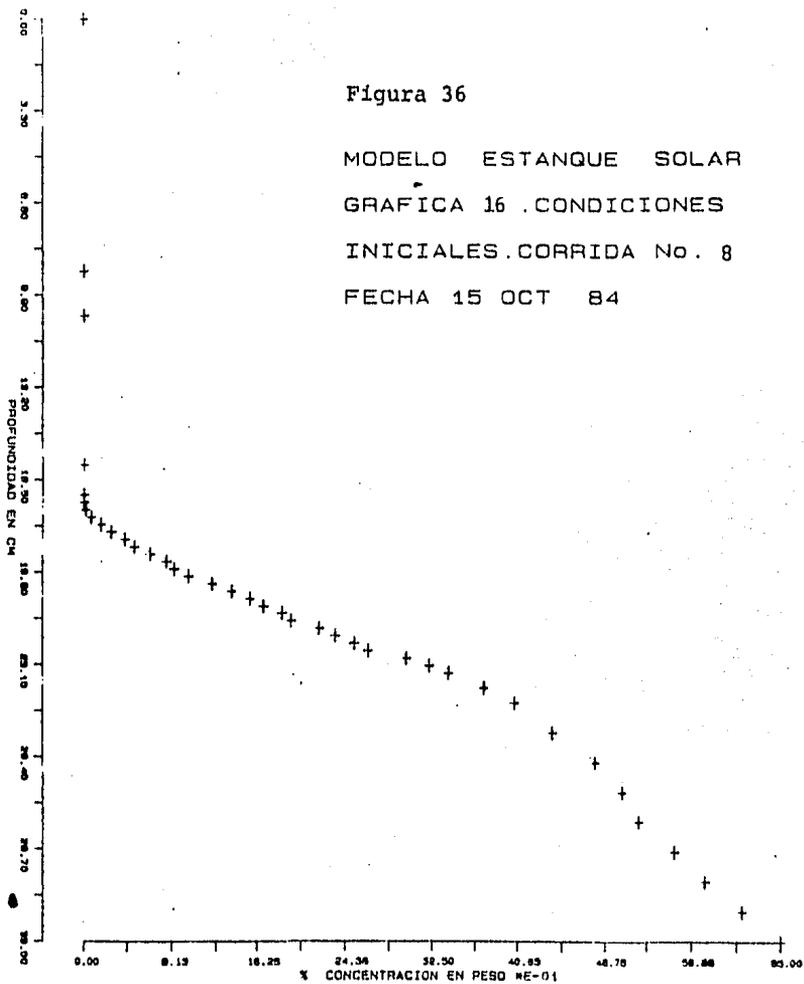


Figura 37

MODELO ESTANQUE SOLAR  
GRAFICA 17 .CONDICIONES  
FINALES.CORRIDA No. 8  
FECHA 15 OCT 84

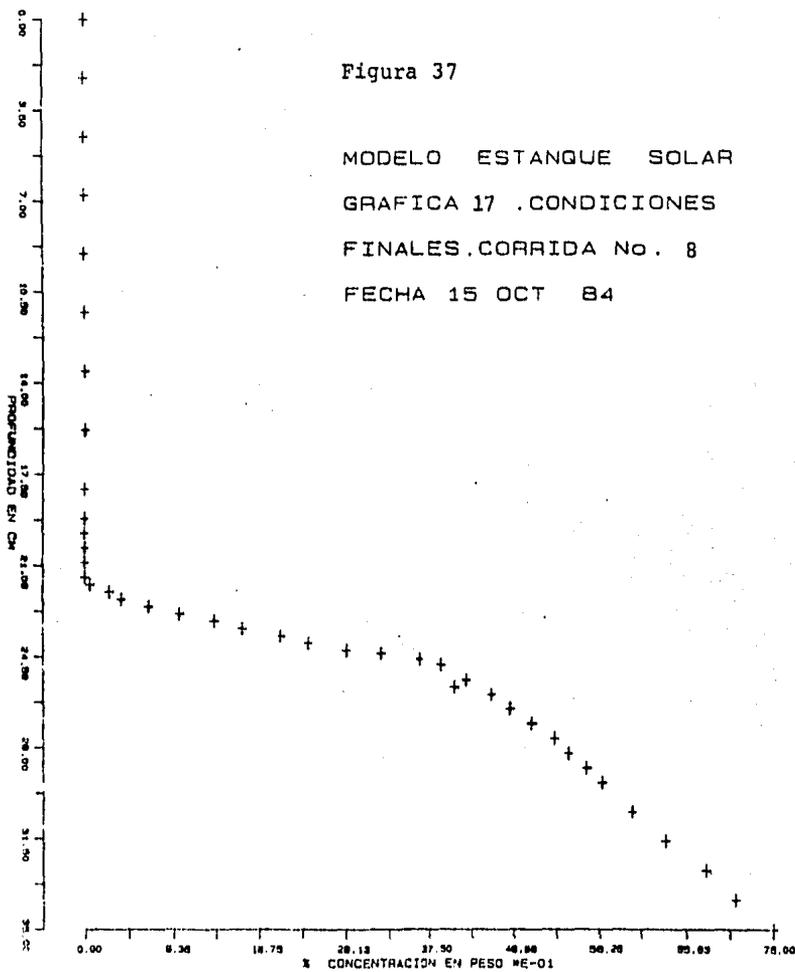


Figura 38

MODELO ESTANQUE SOLAR  
GRAFICA 18 .CONDICIONES  
INICIALES .CORRIDA No. 9  
FECHA 16 OCT 84

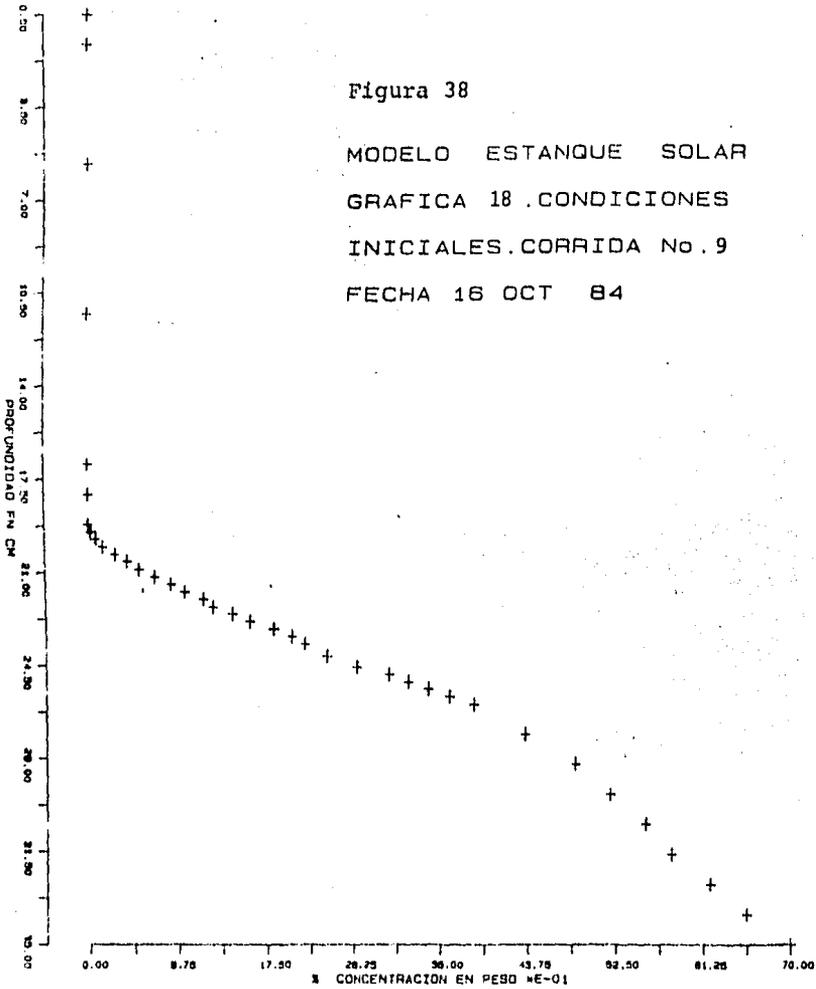


Figura 39  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 19 .CONDICIONES  
 FINALES.CORRIDA No. 9  
 FECHA 16 OCT 84

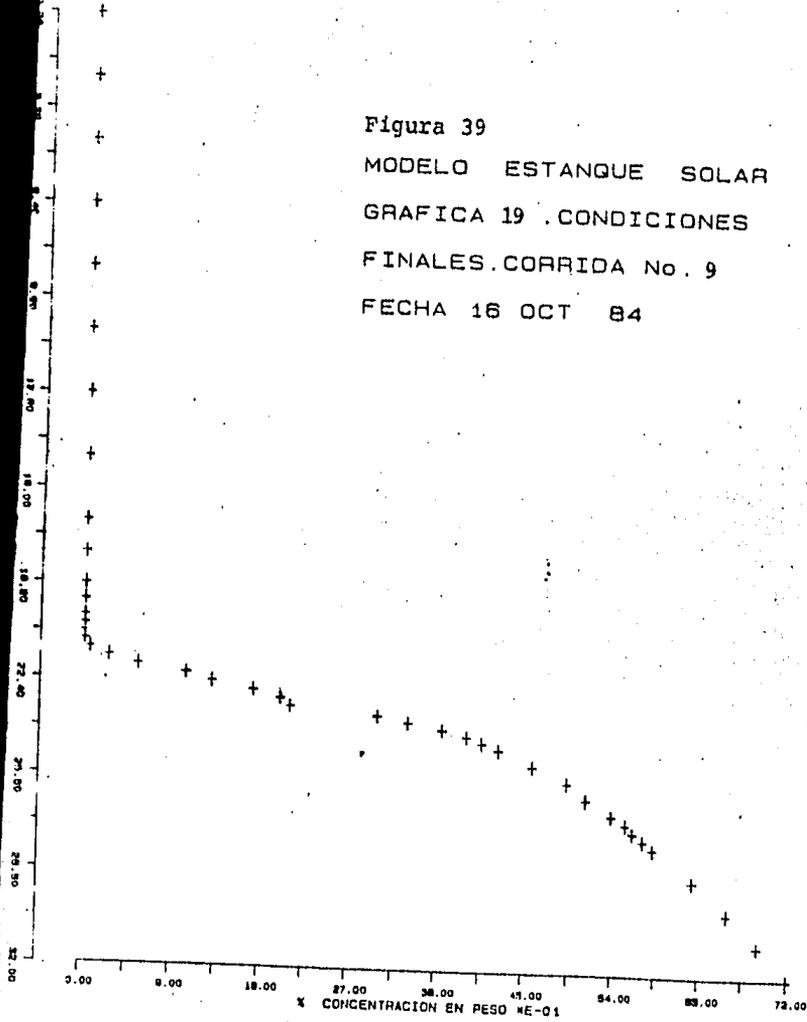
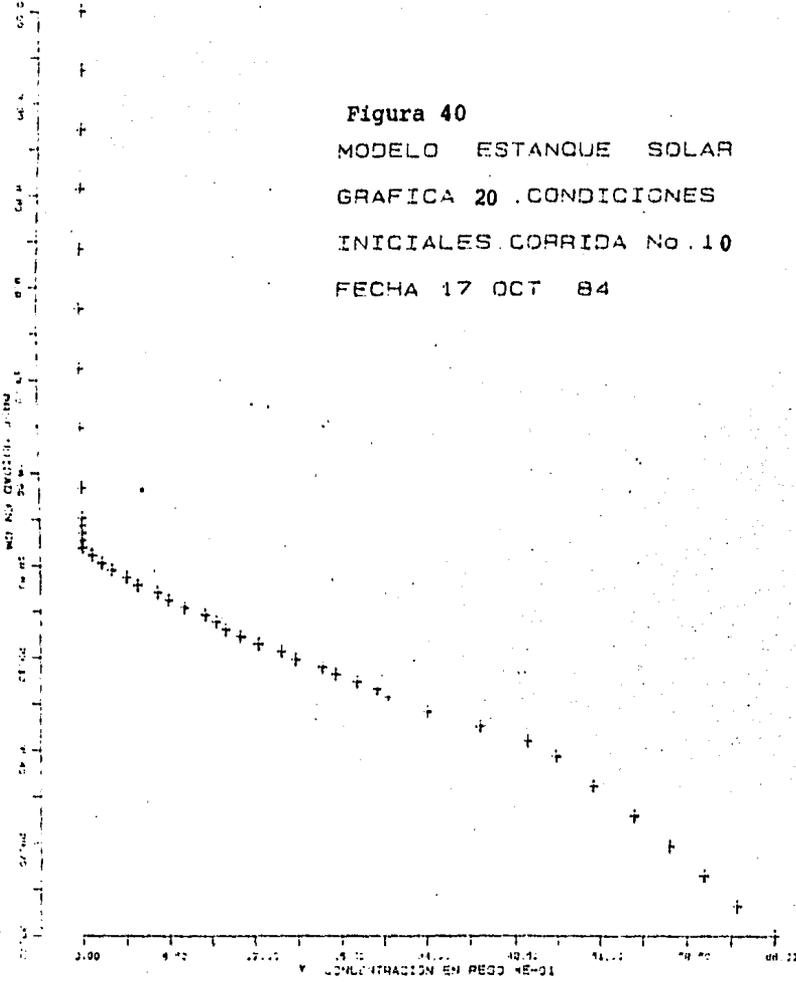
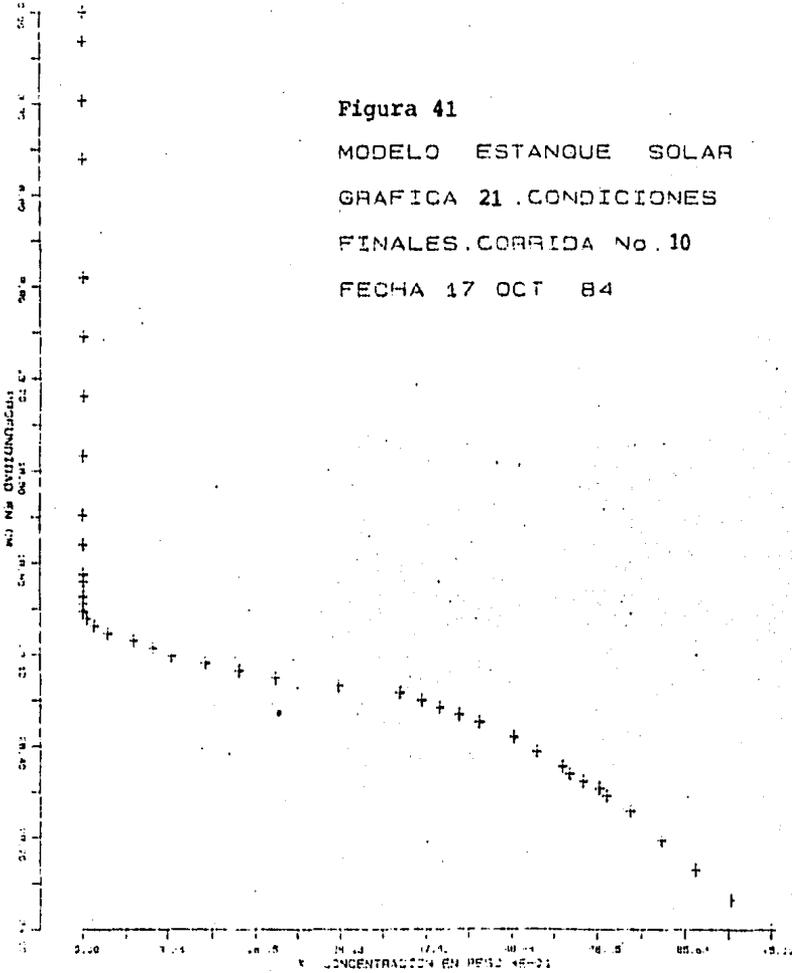
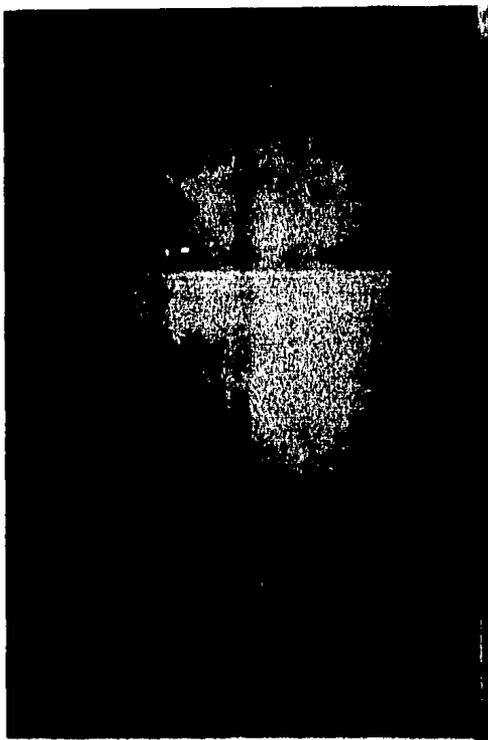


Figura 40  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 20 .CONDICIONES  
 INICIALES CORRIDA No. 10  
 FECHA 17 OCT 84



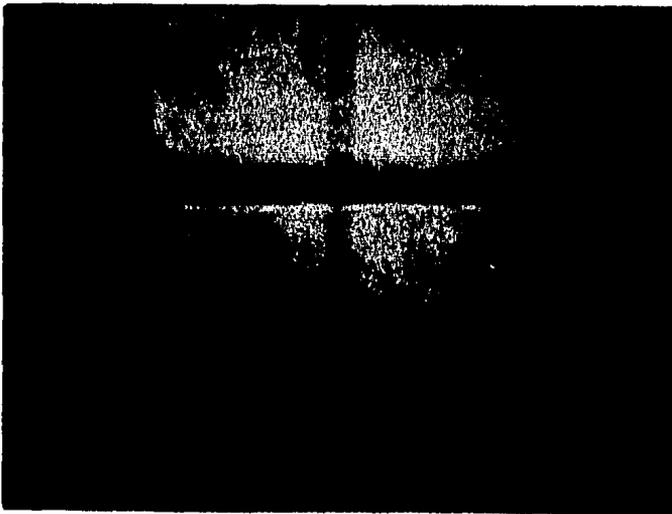
**Figura 41**  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 21 .CONDICIONES  
 FINALES .CORRIDA No .10  
 FECHA 17 OCT 84





Fotografía 22

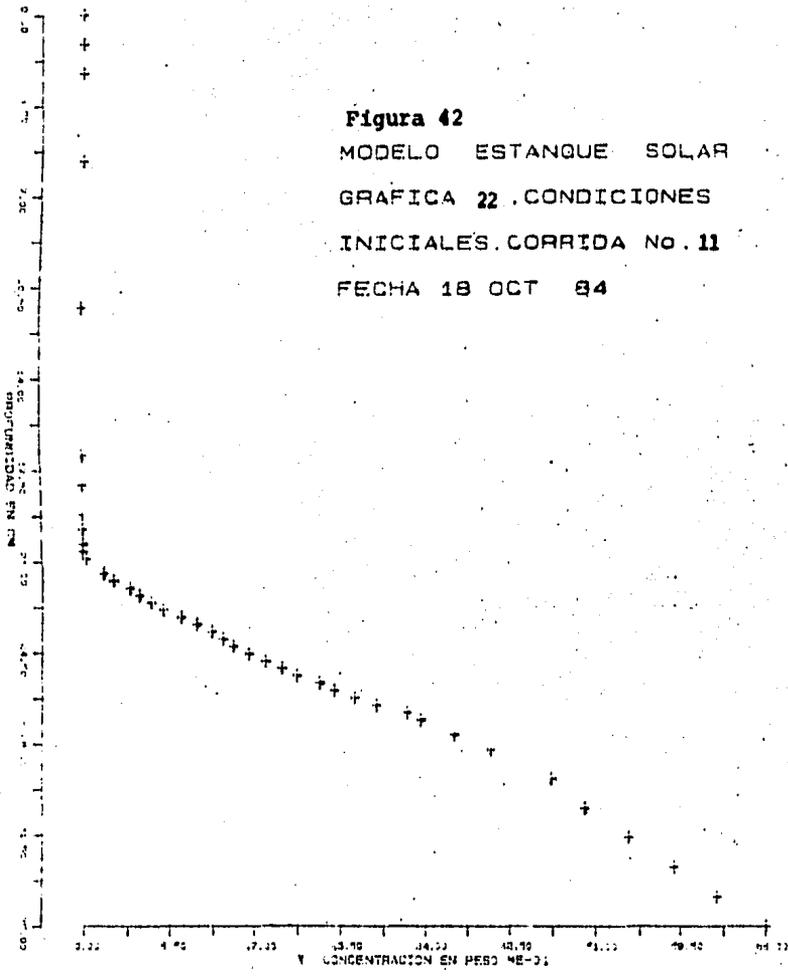
EL ESPESOR DEL FRENTE VA DISMINUYENDO A MEDIDA QUE AVANZA EL EXPERIMENTO ASI COMO EL TIEMPO DE RECUPERACION DEL MISMO HASTA FORMAR UNA LINEA.



Fotografía 23

EL ESPESOR DE LA\_ZONA DE INTERFAZ SE MANTIENE UN TIEMPO FOTOGRAFIAS CORRESPONDIENTES A LA CORRIDA 11.

**Figura 42**  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 22 .CONDICIONES  
 INICIALES .CORRIDA No . 11  
 FECHA 18 OCT 84



**Figura 43**  
MODELO ESTANQUE SOLAR  
GRAFICA 23 .CONDICIONES  
FINALES.CORRIDA No.11  
FECHA 18 OCT 84

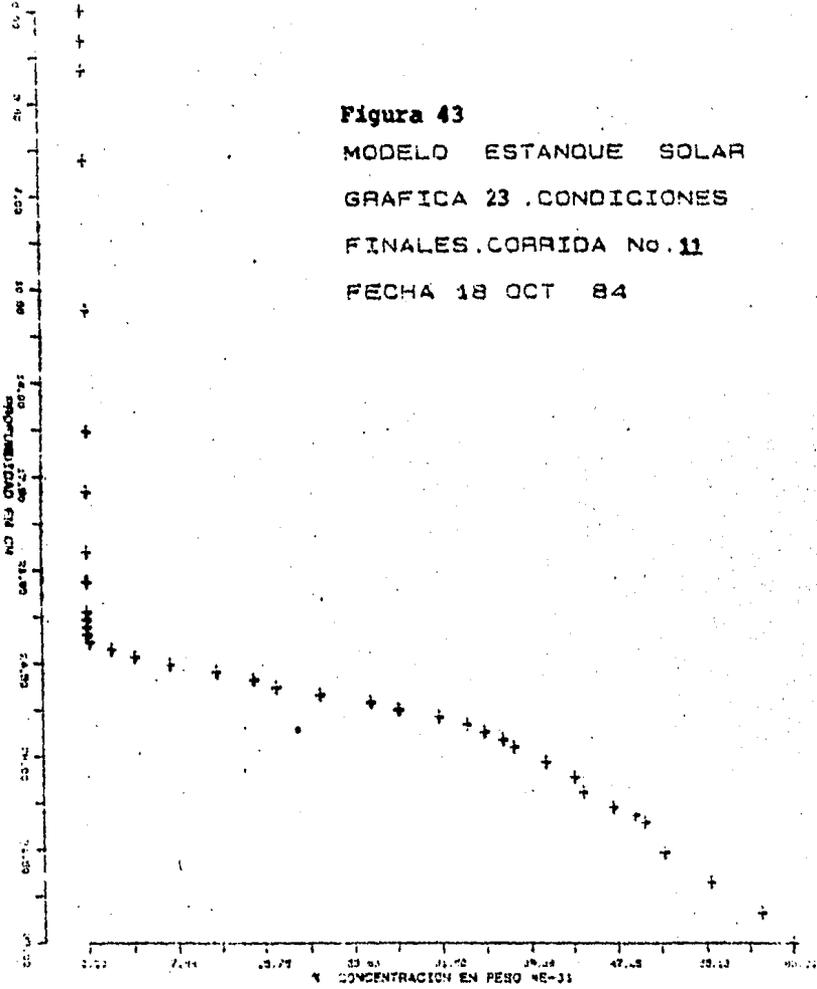
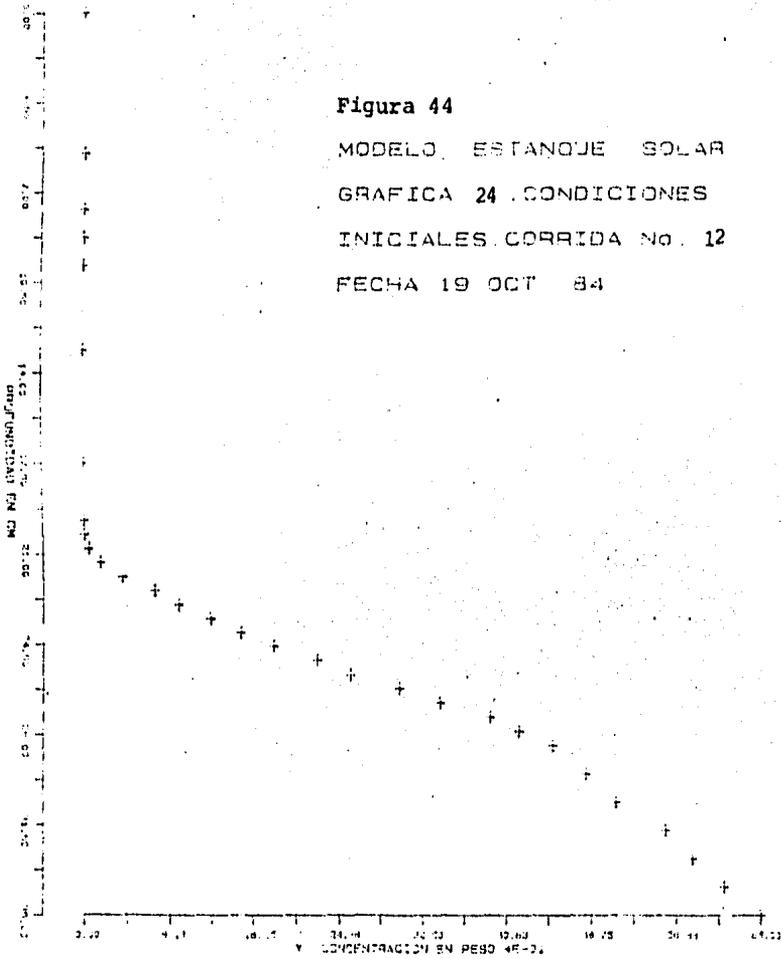
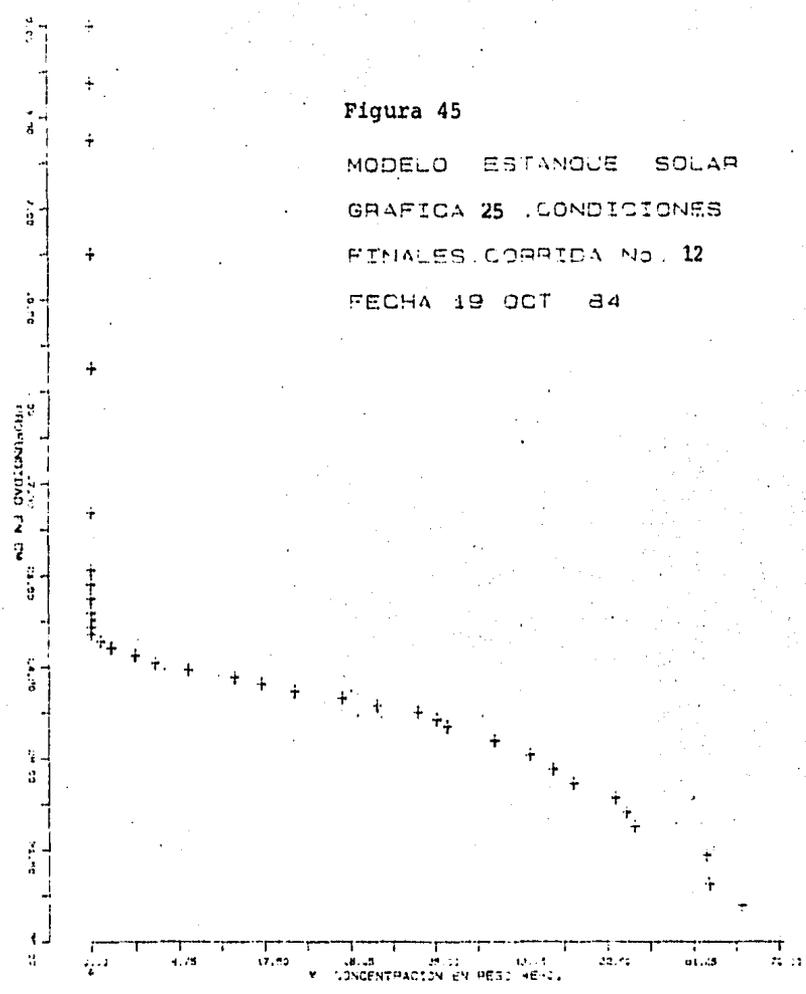


Figura 44

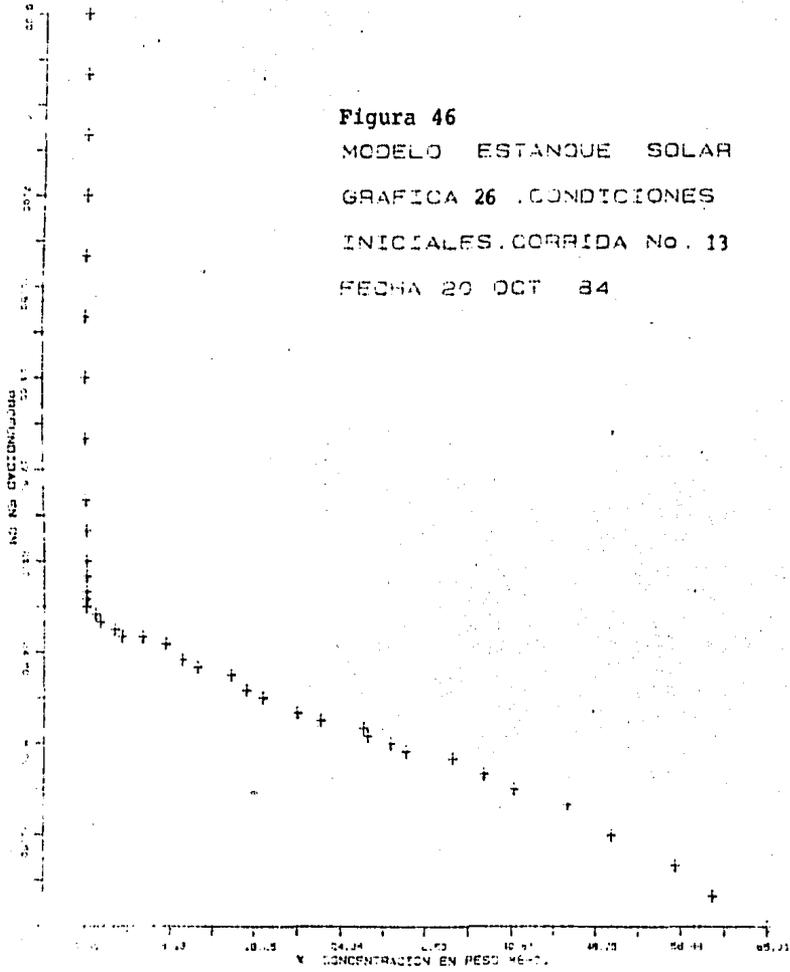
MODELO ESTANQUE SOLAR  
GRAFICA 24 .CONDICIONES  
INICIALES CORRIDA No. 12  
FECHA 19 OCT 84



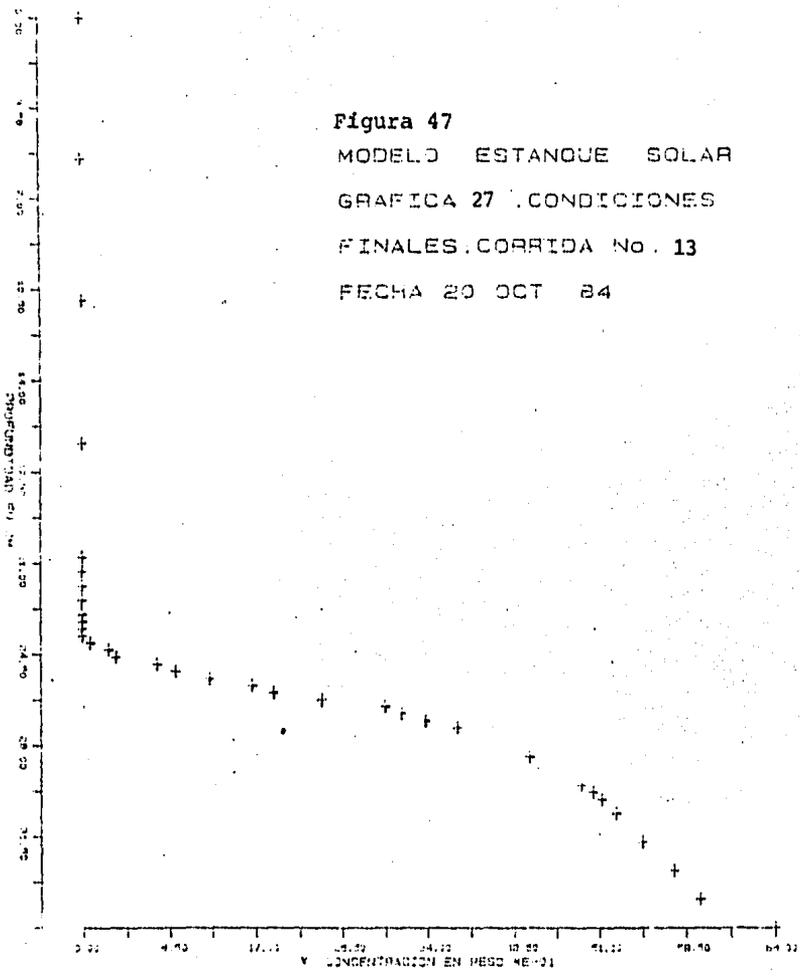
**Figura 45**  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 25 .CONDICIONES  
 FINALES CORRIDA No. 12  
 FECHA 19 OCT 84



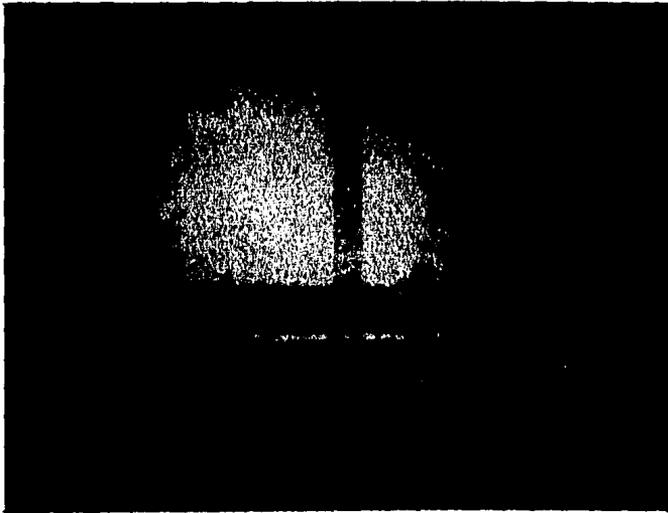
**Figura 46**  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 26 .CONDICIONES  
 INICIALES .CORRIDA No. 13  
 FECHA 20 OCT 84



**Figura 47**  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 27 .CONDICIONES  
 FINALES .CORRIDA No . 13  
 FECHA 20 OCT 84



Fotografía 24



Fotografía 25

NOTESE LA POSICION FINAL DEL FRENTE INTENSO Y LA ZONA DE INTERFAZ AL FINALIZAR LA ETAPA 14 DEL EXPERIMENTO.

Figura 48

MODELO ESTANQUE SOLAR  
GRAFICA 28 .CONDICIONES  
INICIALES .CORRIDA No. 14  
FECHA 21 OCT 84

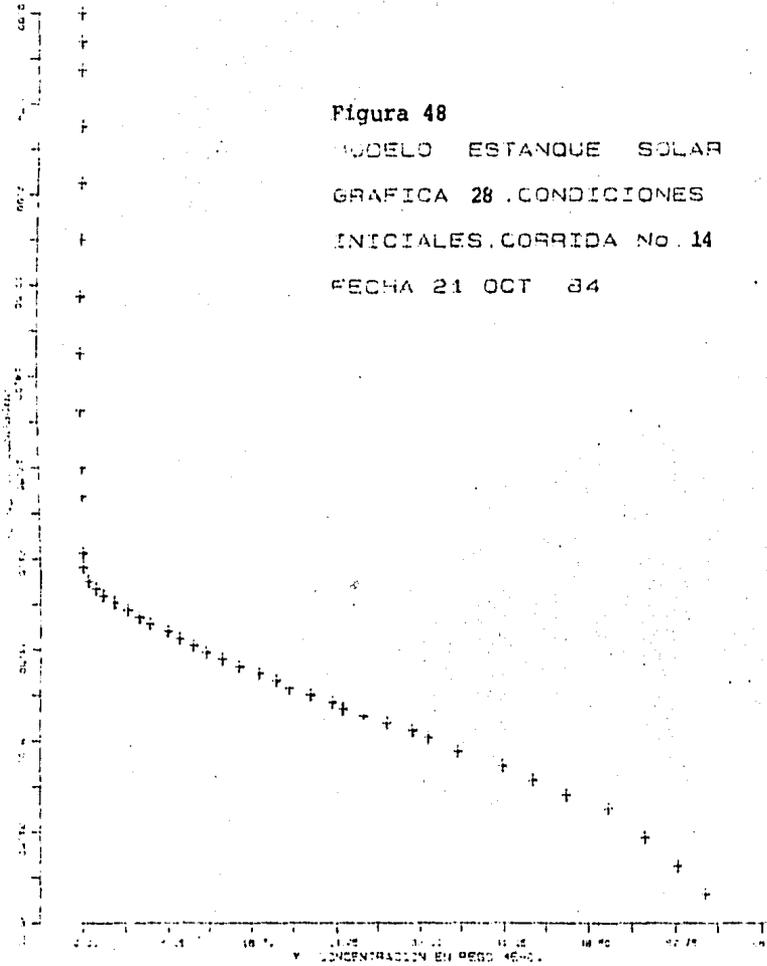


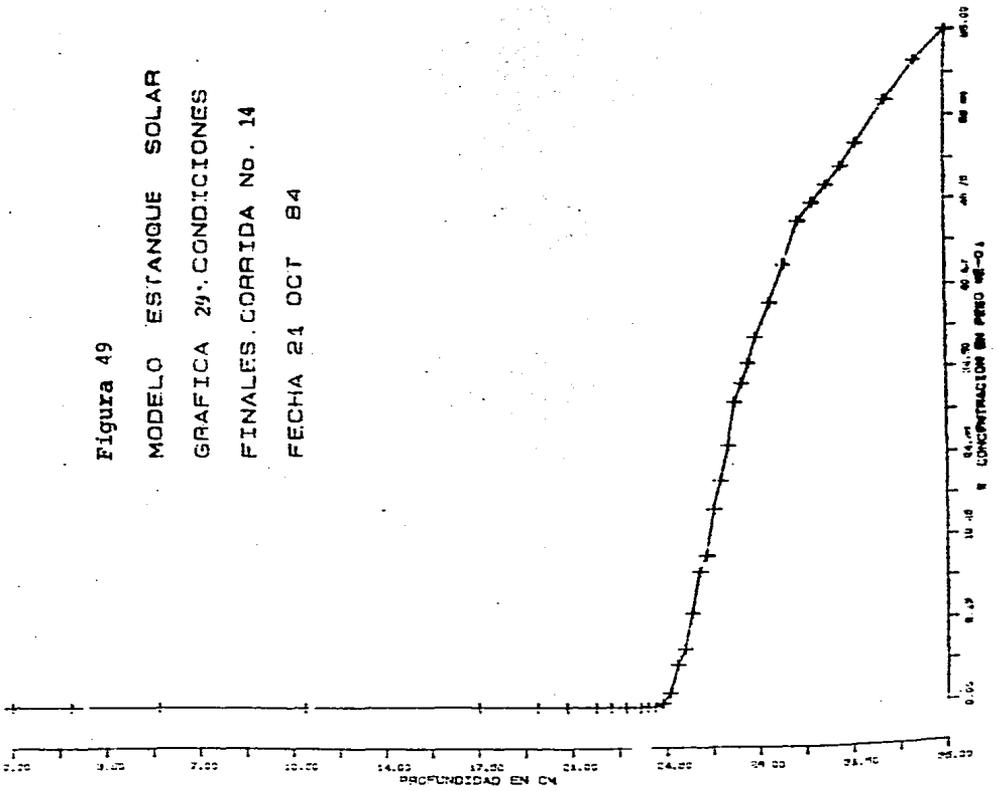
Figura 49

MODELO ESTANQUE SOLAR

GRAFICA 29. CONDICIONES

FINALES. CORRIDA No. 14

FECHA 21 OCT 84



**Figura 50**  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA. 30 .CONDICIONES  
 INICIALES.CORRIDA No.15  
 FECHA 22 OCT 84

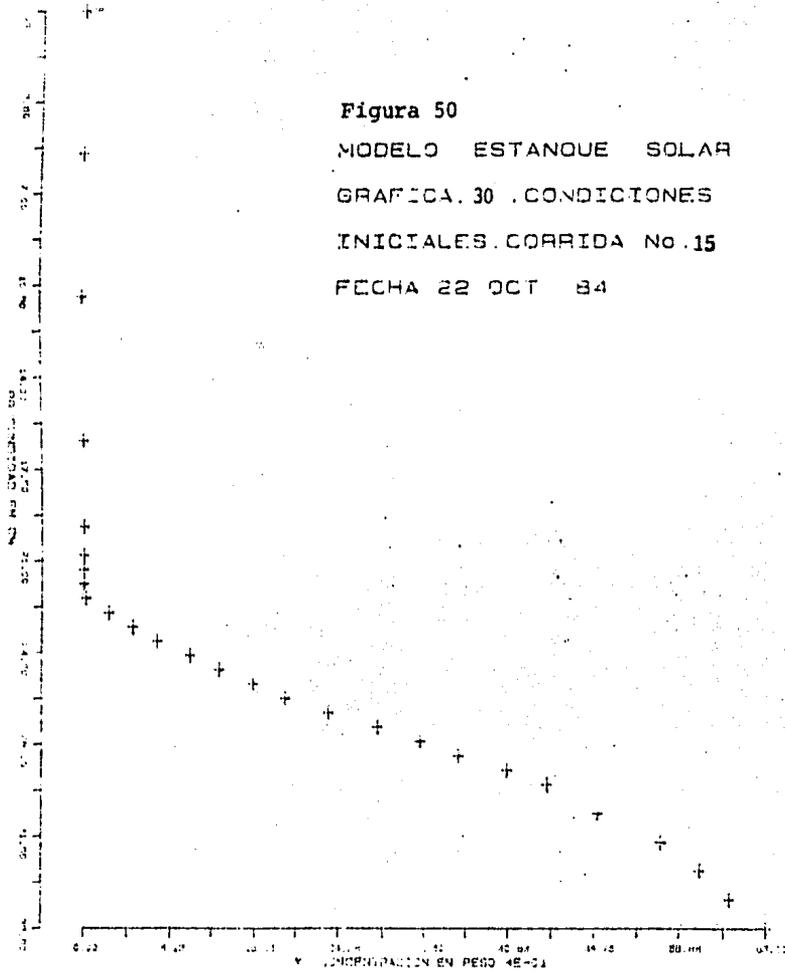


Figura 51

MODELO ESTANQUE SOLAR

GRAFICA 31. CONDICIONES

FINALES. CORRIDA No. 15

FECHA 22 OCT 84

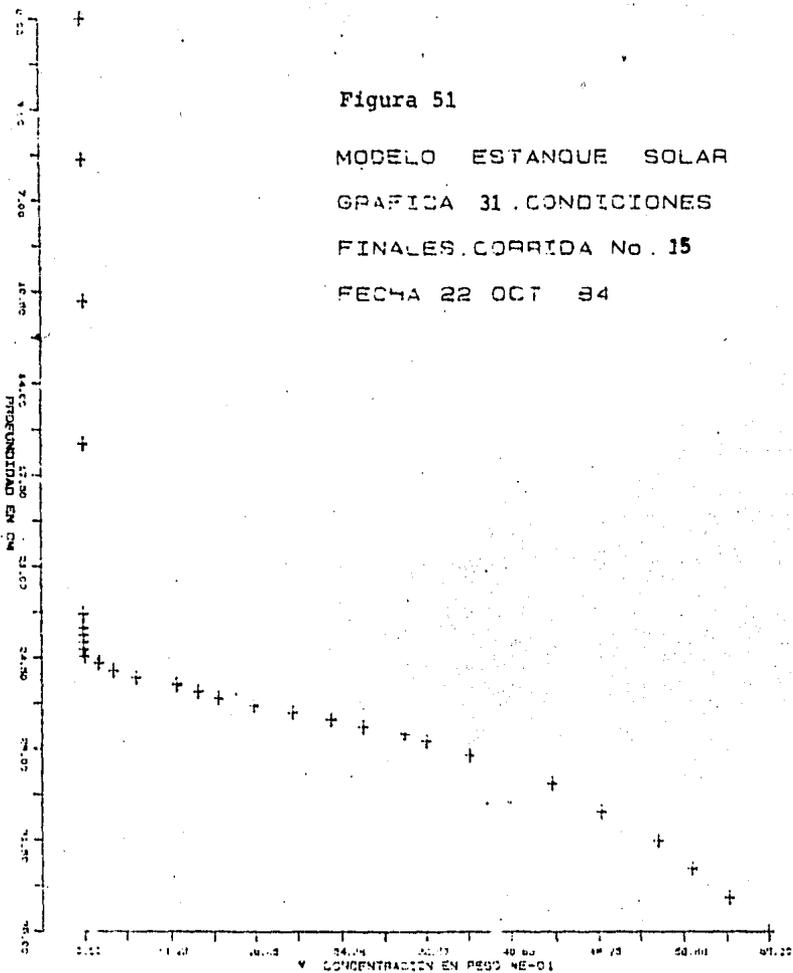


Figura 52  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 32 , CONDICIONES  
 INICIALES CORRIDA No : 16  
 FECHA 24 OCT 84

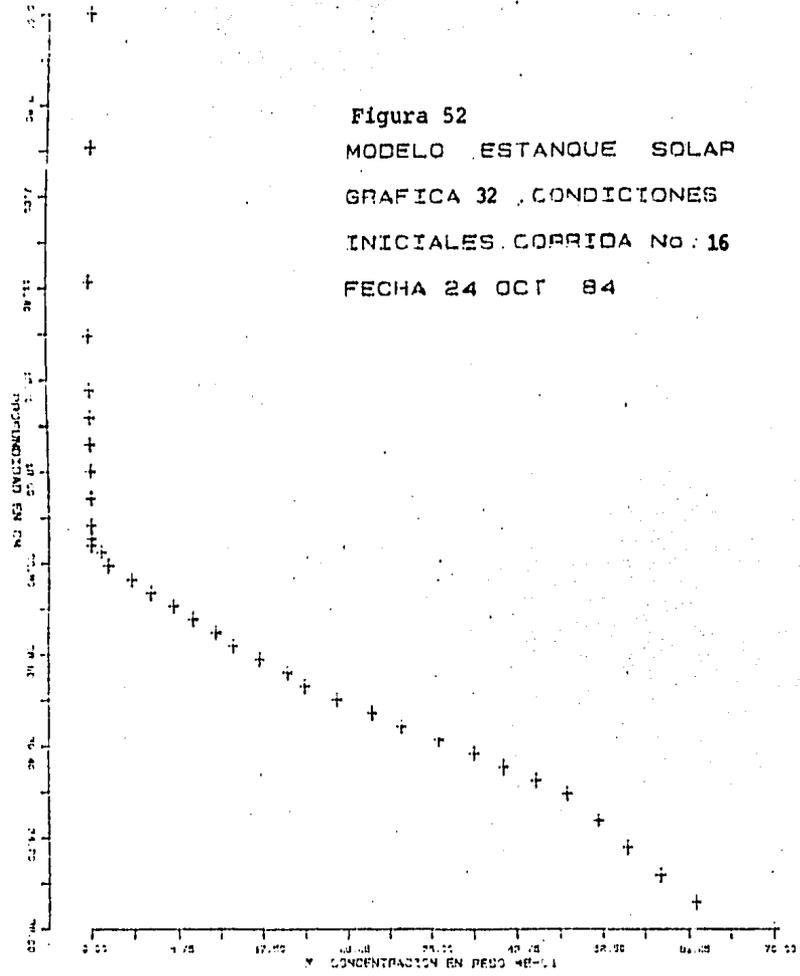


Figura 53  
 MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 33. CONDICIONES  
 FINALES. CORRIDA No.16  
 FECHA 24 OCT 84

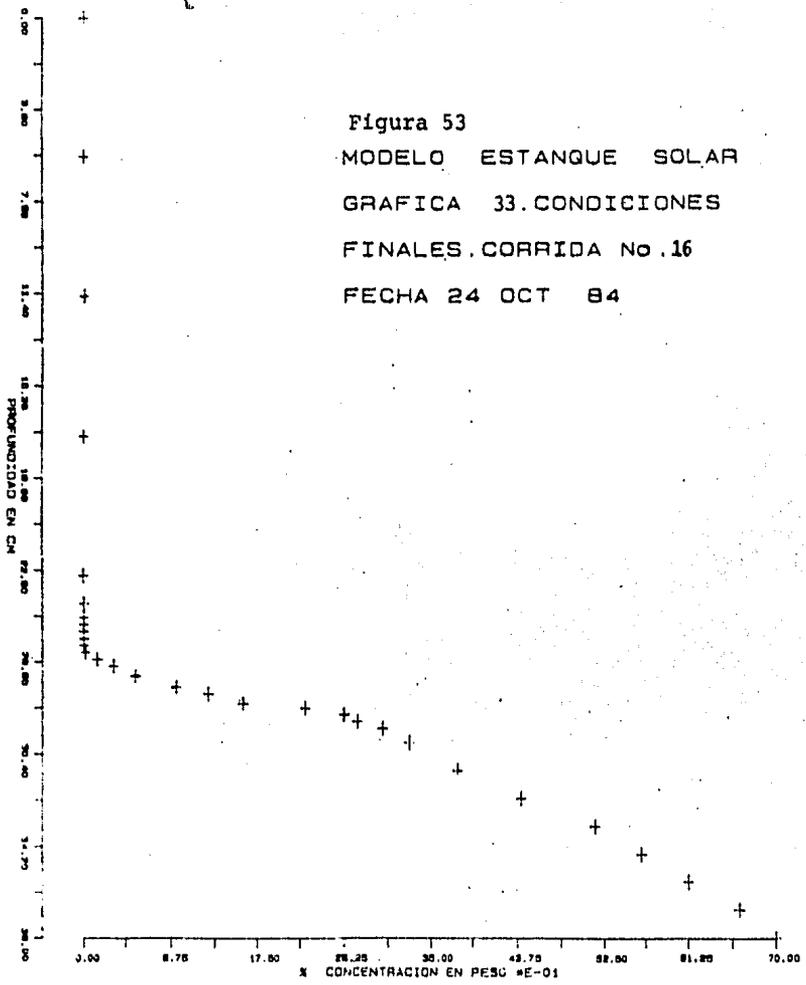


Figura 54  
MODELO ESTANQUE SOLAR  
GRAFICA 34 .CONDICIONES  
INICIALES.CORRIDA No. 17  
FECHA 4 DIC 84

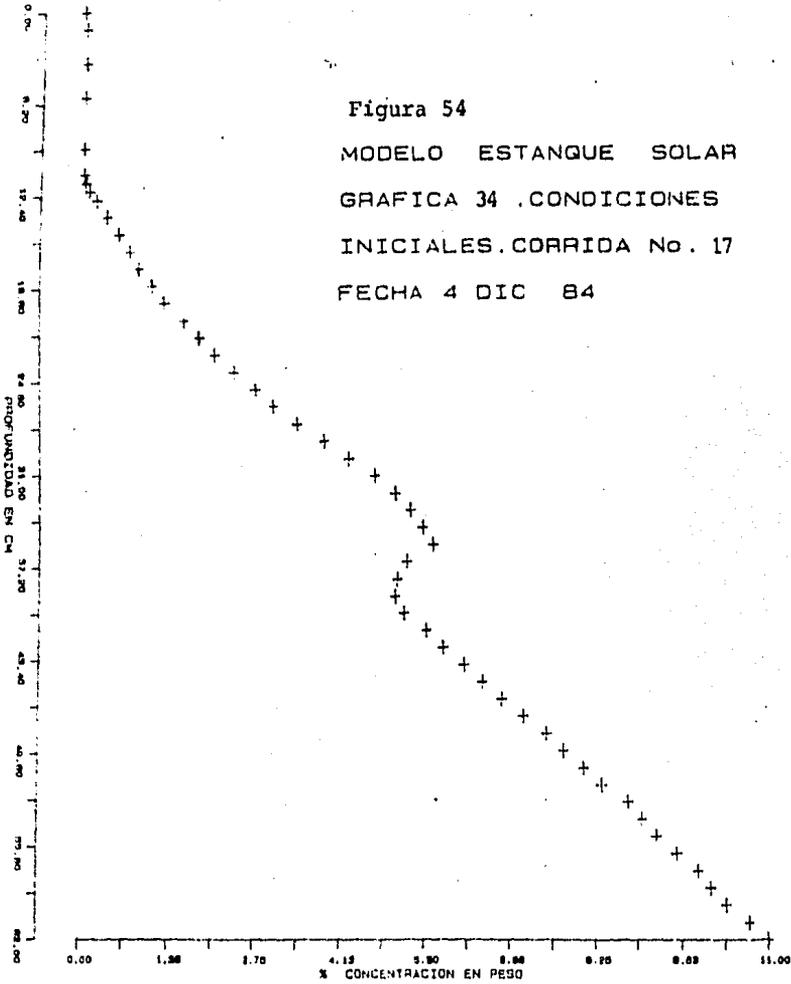


Figura 55  
MODELO ESTANQUE SOLAR  
GRAFICA 35 .CONDICIONES  
FINALES .CORRIDA No. 17  
FECHA 5 DIC 84

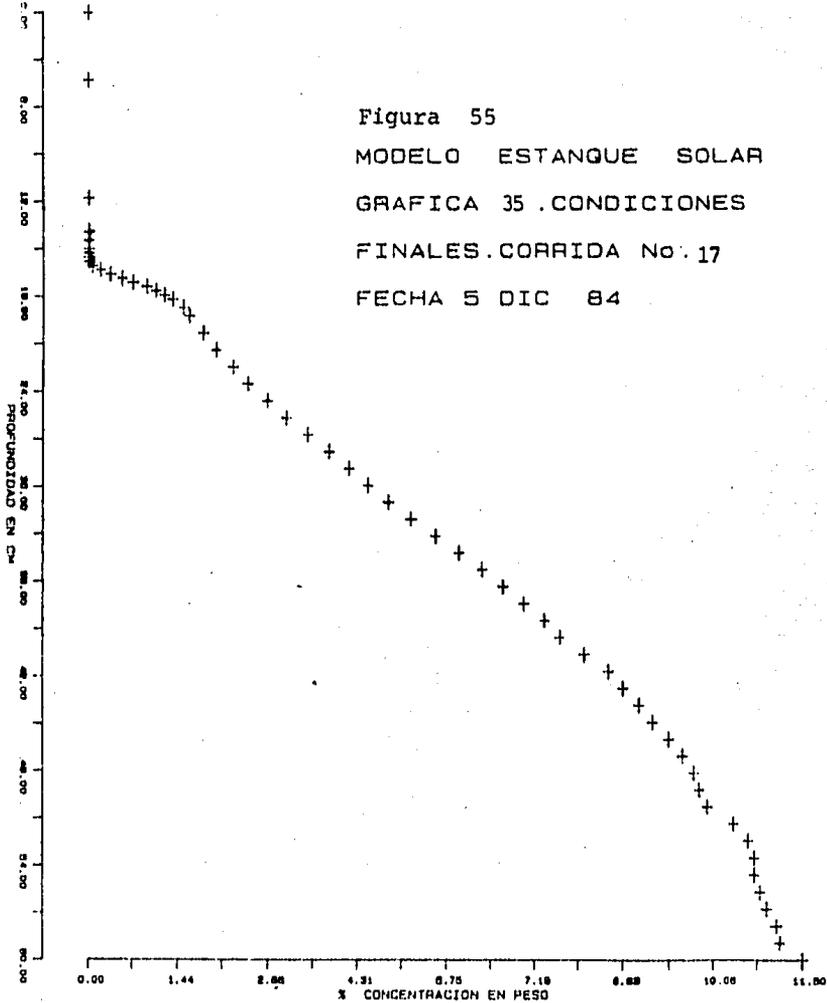
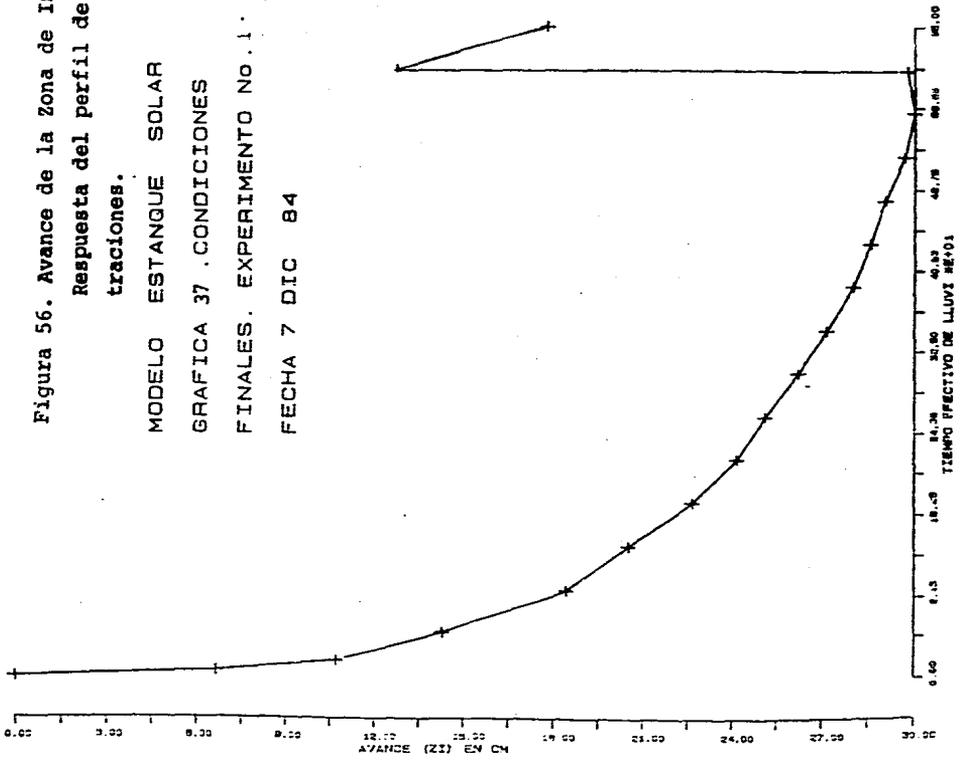


Figura 56. Avance de la Zona de Interfaz  
 Respuesta del perfil de concen-  
 traciones.

MODELO ESTANQUE SOLAR  
 GRAFICA 37 .CONDICIONES  
 FINALES. EXPERIMENTO No.1.  
 FECHA 7 DIC 84



## CAPITULO 8

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Un experimento de la influencia de la lluvia sobre un estanque solar estratificado con cloruro de sodio se ha realizado. El programa del estudio experimental es amplio y abarca la realización de suficientes experimentos, hasta asotar las condiciones de los diferentes regímenes de lluvia, caracterizados con el equipo existente hasta ahora, con el objeto de cimentar un teoría que forme parte de los estudios sobre la hidrodinámica de los estanques solares.

Basados en los experimentos reportados aquí podemos concluir que al caer las gotas de lluvia sobre la superficie de un estanque estratificado con sal en forma isotérmica crea turbulencia en forma de ondas que viajan mas allá de la profundidad de penetración máxima alcanzada por las gotas, erosionando el gradiente salino de abajo.

La velocidad de erosión parece depender del tamaño y velocidad de las gotas de lluvia, el tiempo de duración de la lluvia, la fuerza del gradiente de concentración y el espesor de la capa mezclada arriba de la zona no convectiva.

Las dolgadas capas con fuertes gradientes de concentración situadas entre la capa mezclada superior y la zona no convectiva parece tener una gran influencia sobre la dinámica de erosión de la zona no convectiva.

La formación de un frente de erosión que separa

perfectamente la zona de gradiente totalmente estatica de una zona convectiva superior completamente turbulenta, a causa de la lluvia, es todavia un fenómeno inexplicable y constituye un tema profundo de estudio. Asi como aquel fenómeno observado al momento de alinear el sistema óptico, el cual suponemos se debe a una diferencia entre las tasas de difusión del calor y la sal.

En el futuro deben hacerse análisis cuantitativos de los fenómenos observados, desde balances de materia y energía en el estanque hasta la determinación de parámetros adimensionales que relacionen las propiedades de los fluidos que intervienen en el proceso.

## CAPITULO 9

### APENDICES

#### APENDICE A

1 Comportamiento de la Placa de Goteo

1.1 Gastos obtenidos usando solamente agua.

hc se refiere a la altura alcanzada en una escala practicada

a la caba y h el desplazamiento sobre esa escala.

P	hc	h	U	T	G	$\bar{G}$
kg/cm	m	m	m <sup>3</sup>	min	l/min	l/min
0.0	0.695	0.0	0.1285	0	0.0	
0.14	0.715	0.02	0.1322	1	3.698	
0.14	0.735	0.02	0.1359	1	3.698	
0.14	0.755	0.02	0.1396	1	3.698	3.698
0.14	0.775	0.02	0.1433	1	3.698	
0.14	0.795	0.02	0.1470	1	3.698	
0.16	0.57	0.0	0.1054	0	0.0	
0.16	0.593	0.023	0.1096	1	4.2527	
0.16	0.617	0.024	0.1141	1	4.4376	
0.16	0.635	0.018	0.1174	1	3.3282	
0.16	0.655	0.020	0.1211	1	3.698	3.830
0.16	0.675	0.020	0.1248	1	3.698	
0.16	0.695	0.020	0.1285	1	3.698	
0.16	0.715	0.020	0.1322	1	3.698	
0.18	0.583	0.0	0.1078	0	0.0	
0.18	0.605	0.022	0.1119	1	4.0678	
0.18	0.632	0.027	0.1169	1	4.9923	
0.18	0.656	0.024	0.1213	1	4.4376	
0.18	0.682	0.026	0.1261	1	4.8074	
0.18	0.703	0.021	0.1300	1	3.8829	
0.18	0.726	0.023	0.1342	1	4.2527	4.353
0.18	0.748	0.022	0.1383	1	4.0678	
0.18	0.772	0.024	0.1427	1	4.4376	
0.18	0.795	0.023	0.1470	1	4.2527	
0.18	0.821	0.026	0.1518	1	4.8074	
0.18	0.842	0.021	0.1557	1	3.8829	
0.20	0.74	0.0	0.1368	0	0.0	
0.20	0.765	0.025	0.1414	1	4.6225	
0.20	0.790	0.025	0.1407	1	4.6225	
0.20	0.815	0.025	0.1507	1	4.6225	
0.20	0.840	0.025	0.1553	1	4.6225	4.623
0.20	0.865	0.025	0.1599	1	4.6225	
0.20	0.890	0.025	0.1646	1	4.6225	

P	hc	h	V	T	G	$\bar{G}$
kg/cm	m	m	m <sup>3</sup>	min	l/min	l/min
0.22	0.91	0.0	0.1683	0	0.0	
0.22	0.937	0.027	0.1733	1	4.9923	
0.22	0.963	0.026	0.1781	1	4.8074	
0.22	0.992	0.029	0.1834	1	5.3621	
0.22	1.018	0.026	0.1882	1	4.8074	4.886
0.22	1.044	0.026	0.1930	1	4.8074	
0.22	1.073	0.029	0.1984	1	5.3621	
0.22	1.095	0.022	0.2025	1	4.0678	
0.24	0.94	0.0	0.1730	0	0.0	
0.24	0.968	0.028	0.1790	1	5.1772	
0.24	0.995	0.027	0.1840	1	4.9923	
0.24	1.027	0.032	0.1899	1	5.9168	5.177
0.24	1.054	0.027	0.1949	1	4.9923	
0.24	1.083	0.029	0.2002	1	5.3621	
0.24	1.108	0.025	0.2049	1	4.6225	
0.28	1.16	0.0	0.2145	0	0.0	
0.28	1.19	0.03	0.2200	1	5.547	
0.28	1.22	0.03	0.2256	1	5.547	
0.28	1.25	0.03	0.2311	1	5.547	5.547
0.28	1.28	0.03	0.2367	1	5.547	
0.28	1.31	0.03	0.2422	1	5.547	
0.30	0.574	0.0	0.1061	0	0.0	
0.30	0.605	0.031	0.1119	1	5.7319	
0.30	0.638	0.033	0.1180	1	6.1017	
0.30	0.672	0.034	0.1243	1	6.2863	
0.30	0.703	0.031	0.1300	1	5.7319	6.048
0.30	0.737	0.034	0.1363	1	6.2866	
0.30	0.770	0.033	0.1424	1	6.1017	
0.30	0.803	0.033	0.1485	1	6.1017	
0.32	0.595	0.0	0.1100	0	0.0	
0.32	0.628	0.033	0.1161	1	6.1017	
0.32	0.663	0.035	0.1226	1	6.4715	
0.32	0.696	0.033	0.1287	1	6.1017	
0.32	0.731	0.035	0.1352	1	6.4715	6.207
0.32	0.765	0.034	0.1414	1	6.2866	
0.32	0.796	0.031	0.1472	1	5.7319	
0.32	0.830	0.034	0.1535	1	6.2866	

P	hc	h	V	T	G	$\bar{G}$
kg/cm	m	m	m <sup>3</sup>	min	l/min	l/min
0.34	0.82	0.0	0.1516	0	0.0	
0.34	0.852	0.032	0.1575	1	5.9168	
0.34	0.888	0.036	0.1642	1	6.6564	
0.34	0.923	0.035	0.1707	1	6.4715	
0.34	0.955	0.032	0.1766	1	5.9168	6.392
0.34	0.993	0.038	0.1836	1	7.0262	
0.34	1.027	0.034	0.1899	1	6.2866	
0.34	1.062	0.035	0.1964	1	6.4715	
0.36	0.85	0.0	0.1572	0	0.0	
0.36	0.885	0.035	0.1636	1	6.4715	
0.36	0.920	0.035	0.1701	1	6.4715	
0.36	0.957	0.037	0.1769	1	6.8413	
0.36	0.993	0.036	0.1836	1	6.6564	6.604
0.36	1.037	0.044	0.1917	1	8.1356	
0.36	1.068	0.031	0.1975	1	5.5319	
0.36	1.10	0.032	0.2034	1	5.9168	
0.38	1.11	0.0	0.2052	0	0.0	
0.38	1.148	0.038	0.2123	1	7.0262	
0.38	1.187	0.039	0.2195	1	7.2111	
0.38	1.222	0.035	0.2260	1	6.4715	
0.38	1.262	0.040	0.2333	1	7.396	6.903
0.38	1.295	0.033	0.2394	1	6.1017	
0.38	1.334	0.039	0.2465	1	7.2111	
0.40	1.12	0.0	0.2071	0	0.0	
0.40	1.157	0.037	0.2139	1	6.8413	
0.40	1.195	0.038	0.2210	1	7.0262	
0.40	1.233	0.038	0.2280	1	7.0262	7.089
0.40	1.272	0.039	0.2352	1	7.7111	
0.40	1.309	0.037	0.2420	1	6.8413	
0.42	0.575	0.0	0.1063	0	0.0	
0.42	0.614	0.039	0.1135	1	7.2111	
0.42	0.654	0.040	0.1209	1	7.396	
0.42	0.694	0.040	0.1283	1	7.5806	
0.42	0.735	0.041	0.1359	1	6.6564	7.264
0.42	0.771	0.036	0.1426	1	7.396	
0.42	0.811	0.040	0.1500	1	7.2111	

P ks/cm	hc m	h m	V m <sup>3</sup>	T min	G l/min	$\bar{G}$ l/min
0.44	0.89	0.0	0.1646	0	0.0	
0.44	0.932	0.042	0.1723	1	7.7658	
0.44	0.971	0.039	0.1795	1	7.2111	
0.44	1.012	0.041	0.1871	1	7.5809	
0.44	1.053	0.041	0.1947	1	7.5809	7.458
0.44	1.092	0.039	0.2019	1	7.2111	
0.44	1.132	0.040	0.2093	1	7.3960	
0.46	0.575	0.0	0.1063	0	0.0	
0.46	0.618	0.043	0.1143	1	7.9507	
0.46	0.660	0.042	0.1220	1	7.5658	
0.46	0.640	0.0	0.1830	0	0.0	
0.46	0.683	0.043	0.1263	1	7.9507	7.797
0.46	0.725	0.042	0.1341	1	7.7658	
0.46	0.767	0.042	0.1418	1	7.7658	
0.46	0.849	0.041	0.1570	1	7.5809	
0.48	0.930	0.0	0.1720	0	0.0	
0.48	0.973	0.043	0.1799	1	7.9507	
0.48	1.015	0.042	0.1877	1	7.7658	
0.48	1.059	0.044	0.1958	1	8.1356	
0.48	1.102	0.043	0.2038	1	7.9507	7.951
0.48	1.145	0.043	0.2117	1	7.9507	
0.48	1.188	0.043	0.2197	1	7.9507	
0.48	1.231	0.043	0.2276	1	7.9507	
0.50	0.59	0.0	0.1091	0	0.0	
0.50	0.678	0.044	0.1254	1	8.1356	
0.50	0.722	0.044	0.1335	1	8.1356	
0.50	0.765	0.043	0.1414	1	7.9507	
0.50	0.809	0.044	0.1496	1	8.1356	8.096
0.50	0.852	0.043	0.1575	1	7.9507	
0.50	0.939	0.044	0.1736	1	8.0432	
0.50	0.982	0.045	0.1816	1	8.3205	
0.80	0.575	0.0	0.1063	0	0.0	
0.80	0.6342	0.059	0.1172	1	10.9584	
0.80	0.6937	0.060	0.1282	1	10.9950	
0.80	0.7512	0.057	0.1389	1	10.6320	
0.80	0.8055	0.054	0.1489	1	10.0452	10.817
0.80	0.8650	0.059	0.1599	1	11.0025	
0.80	0.9236	0.058	0.1708	1	10.8325	
0.80	0.9844	0.061	0.1820	1	11.2512	

1.2 Gastos Obtenidos Usando Agua y Aire

PH2O kg/cm	Pt kg/cm	h m	V m <sup>3</sup>	T min	G l/min	$\bar{G}$ l/min
0.14	0.20	0.018	0.0033	1	3.33	
0.14	0.20	0.052	0.0096	3	3.20	
0.14	0.20	0.018	0.0033	1	3.33	
0.14	0.20	0.016	0.0030	1	2.96	3.215
0.14	0.20	0.017	0.0031	1	3.14	
0.14	0.20	0.018	0.0033	1	3.33	
0.14	0.24	0.016	0.0030	1	2.96	
0.14	0.24	0.017	0.0031	1	3.14	
0.14	0.24	0.015	0.0028	1	2.77	
0.14	0.24	0.015	0.0028	1	2.77	2.983
0.14	0.24	0.017	0.0031	1	3.14	
0.14	0.24	0.018	0.0033	1	3.33	
0.14	0.24	0.015	0.0027	1	2.77	
0.14	0.30	0.016	0.0030	1	2.96	
0.14	0.30	0.015	0.0028	1	2.77	
0.14	0.30	0.015	0.0028	1	2.77	
0.14	0.30	0.016	0.0030	1	2.96	2.957
0.14	0.30	0.016	0.0030	1	2.96	
0.14	0.30	0.017	0.0031	1	3.14	
0.14	0.30	0.017	0.0031	1	3.14	
0.14	0.40	0.015	0.0028	1	2.77	
0.14	0.40	0.015	0.0028	1	2.77	
0.14	0.40	0.015	0.0028	1	2.77	
0.14	0.40	0.015	0.0028	1	2.77	2.77
0.14	0.40	0.017	0.0031	1	3.14	
0.14	0.40	0.013	0.0024	1	2.40	
0.14	0.50	0.013	0.0024	1	2.40	
0.14	0.50	0.015	0.0028	1	2.77	
0.14	0.50	0.014	0.0026	1	2.59	
0.14	0.50	0.015	0.0028	1	2.77	2.65
0.14	0.50	0.015	0.0028	1	2.77	
0.14	0.50	0.014	0.0026	1	2.59	
0.20	0.30	0.037	0.0068	1	3.42	
0.20	0.30	0.020	0.0037	1	3.70	
0.20	0.30	0.021	0.0039	1	3.88	3.68
0.20	0.30	0.020	0.0037	1	3.70	
0.20	0.30	0.020	0.0037	1	3.70	

PH20 kg/cm	Pt kg/cm	h m	V m <sup>3</sup>	T min	Q l/min	$\bar{G}$ l/min
0.20	0.40	0.019	0.0035	1	3.51	
0.20	0.40	0.019	0.0035	1	3.51	
0.20	0.40	0.018	0.0033	1	3.33	
0.20	0.40	0.017	0.0031	1	3.14	3.388
0.20	0.40	0.019	0.0035	1	3.51	
0.20	0.40	0.018	0.0033	1	3.33	
0.20	0.50	0.017	0.0031	1	3.14	
0.20	0.50	0.017	0.0031	1	3.14	
0.20	0.50	0.016	0.0030	1	2.96	
0.20	0.50	0.018	0.0033	1	3.33	3.143
0.20	0.50	0.016	0.0030	1	2.96	
0.20	0.50	0.019	0.0035	1	3.51	
0.20	0.50	0.016	0.0030	1	2.96	
0.26	0.30	0.022	0.0041	1	4.07	
0.26	0.30	0.024	0.0044	1	4.44	
0.26	0.30	0.023	0.0043	1	4.25	
0.26	0.30	0.022	0.0041	1	4.07	4.192
0.26	0.30	0.022	0.0041	1	4.07	
0.26	0.30	0.023	0.0043	1	4.25	
0.26	0.40	0.019	0.0035	1	3.51	
0.26	0.40	0.024	0.0044	1	4.44	
0.26	0.40	0.023	0.0043	1	4.25	
0.26	0.40	0.022	0.0041	1	4.07	4.037
0.26	0.40	0.021	0.0039	1	3.88	
0.26	0.40	0.022	0.0041	1	4.07	
0.26	0.50	0.020	0.0037	1	3.70	
0.26	0.50	0.023	0.0043	1	4.25	
0.26	0.50	0.021	0.0039	1	3.88	
0.26	0.50	0.019	0.0035	1	3.51	3.852
0.26	0.50	0.022	0.0041	1	4.07	
0.26	0.50	0.020	0.0037	1	3.70	
0.30	0.40	0.024	0.0044	1	4.44	
0.30	0.40	0.025	0.0046	1	4.62	
0.30	0.40	0.025	0.0046	1	4.62	
0.30	0.40	0.026	0.0048	1	4.81	4.53
0.30	0.40	0.022	0.0041	1	4.07	
0.30	0.40	0.025	0.0046	1	4.62	

PH2O	Pt	h	V	T	G	$\bar{G}$
kg/cm	kg/cm	m	m <sup>3</sup>	min	l/min	l/min
0.30	0.50	0.023	0.0043	1	4.25	
0.30	0.50	0.021	0.0039	1	3.88	
0.30	0.50	0.024	0.0044	1	4.44	
0.30	0.50	0.025	0.0046	1	4.62	4.190
0.30	0.50	0.020	0.0037	1	3.70	
0.30	0.50	0.023	0.0043	1	4.25	
0.36	0.50	0.027	0.0050	1	4.99	
0.36	0.50	0.028	0.0052	1	5.18	
0.36	0.50	0.027	0.0050	1	4.99	
0.36	0.50	0.027	0.0050	1	4.99	5.044
0.36	0.50	0.027	0.0050	1	4.99	
0.36	0.50	0.028	0.0052	1	5.18	
0.36	0.50	0.027	0.0050	1	4.99	
0.36	0.60	0.026	0.0048	1	4.81	
0.36	0.60	0.027	0.0050	1	4.99	
0.36	0.60	0.029	0.0054	1	5.36	
0.36	0.60	0.025	0.0044	1	4.62	
0.36	0.60	0.025	0.0046	1	4.62	4.808
0.36	0.60	0.028	0.0052	1	5.18	
0.36	0.60	0.022	0.0041	1	4.07	
0.36	0.60	0.026	0.0048	1	4.81	
0.36	0.70	0.023	0.0043	1	4.25	
0.36	0.70	0.025	0.0046	1	4.62	
0.36	0.70	0.022	0.0041	1	4.07	
0.36	0.70	0.023	0.0043	1	4.25	4.357
0.36	0.70	0.023	0.0043	1	4.25	
0.36	0.70	0.025	0.0046	1	4.62	
0.36	0.70	0.024	0.0044	1	4.44	
0.40	0.60	0.026	0.0048	1	4.81	
0.40	0.60	0.027	0.0050	1	4.99	
0.40	0.60	0.030	0.0056	1	5.55	5.104
0.40	0.60	0.027	0.0050	1	4.99	
0.40	0.60	0.028	0.0052	1	5.18	
0.50	0.70	0.031	0.0057	1	5.73	
0.50	0.70	0.033	0.0061	1	6.10	
0.50	0.70	0.031	0.0057	1	5.73	
0.50	0.70	0.031	0.0057	1	5.73	5.823
0.50	0.70	0.032	0.0059	1	5.92	
0.50	0.70	0.031	0.0057	1	5.73	

PH20 kg/cm	Pt kg/cm	h m	V m <sup>3</sup>	T min	G l/min	$\bar{G}$ l/min
0.50	0.80	0.027	0.0050	1	4.99	
0.50	0.80	0.027	0.0050	1	4.99	
0.50	0.80	0.031	0.0057	1	5.73	
0.50	0.80	0.027	0.0050	1	4.99	5.237
0.50	0.80	0.029	0.0054	1	5.36	
0.50	0.80	0.029	0.0054	1	5.36	
0.50	0.90	0.023	0.0043	1	4.25	
0.50	0.90	0.026	0.0048	1	4.81	
0.50	0.90	0.026	0.0048	1	4.81	
0.50	0.90	0.026	0.0048	1	4.81	5.703
0.50	0.90	0.026	0.0048	1	4.81	
0.50	0.90	0.026	0.0048	1	4.81	
0.50	0.90	0.025	0.0046	1	4.62	

## APENDICE B

### Cálculos y comentarios del Sistema Hidráulico

Se dispone de recipientes con capacidad de 100 litros, y se debe tener un margen amplio de tiempo de llenado para poder manejar dicho parámetro en los experimentos; Un tiempo de llenado de 5 min será suficiente;

$$Q = 100 / 5$$

$$Q = 20 \text{ L/seg}$$

Suponemos un diámetro de 3/4" para la descarga

$$\phi = 22.7 \text{ mm} \quad \text{cédula 40}$$

$$A = \pi(0.0227)^2 / 4$$

$$A = 4.047 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Si  $Q = VA$

$$Vd = 20 / (4.047 \times 10^{-4}) (1000) (60)$$

$$Vd = 0.8636 \text{ m/seg}$$

En la succión:

$$\phi = 1 \text{ 1/4" cuyo diámetro interior es}$$

$$\phi = 39 \text{ mm}$$

De la misma forma:

$$V_s = 0.2790 \text{ m/ses}$$

siendo ésta mas baja que la de descarga se elimina mas aún el riesgo de cavitación.

Entonces la altura manométrica que deberá vencer la bomba:

$$H_m = Z_2 - Z_1 + H_s + H_r + V_d^2/2g$$

Donde se tiene que

$$Z_2 - Z_1 = 0.675 \text{ m}$$

$H_d$  = Pérdidas en la tubería de descarga

$H_s$  = Pérdidas en la tubería de succión

$V_d^2/2g$  = Pérdidas por la velocidad

En este caso se desprecian tanto las pérdidas volumétricas como las pérdidas mecánicas, ocupándonos sólo de las pérdidas hidráulicas. Para el cálculo de las pérdidas debidas al rozamiento en las paredes de la tubería usamos el método de la longitud equivalente.

$$H = \lambda (L + \sum L_e) (V^2) / (D) (2g)$$

Sabemos que para régimen turbulento en tuberías lisas

donde  $2000 < R < 100\ 000$ , Ecuación de Blasius:

$$\lambda = 0.316/R$$

Siendo  $R$ , - Número de Reynolds

Este es un parámetro adimensional que mide la importancia relativa de cada una de las variables que intervienen en un fenómeno en que la fuerza predominante es la viscosidad. Cuanto mayor es el número de Reynolds, menos importancia tiene la fuerza de la viscosidad y viceversa.

$$R = VD/\gamma$$

$\gamma$  = Viscosidad cinemática

Para salmuera al 23% de concentración en peso (17)

$$\gamma = 0.01935 \text{ cm}^2/\text{seg}$$

Cálculo en la succión

$$R = 0.2790(0.039)(100^2)/0.01935$$

$$R = 5623.97$$

$$\lambda = 0.316/(5623.97)$$

$$\lambda = 0.03649$$

Eléjimos la ruta que suronemos tiene una pérdida de presión mayor. Contamos la cantidad de conexiones y accesorios desde el recipiente 1 destinado a la recirculación de salmuera. Encontramos su longitud equivalente con la ayuda del nomograma al que se entra con los datos del diámetro interior y el tipo de accesorio que se tenga.

- 2 válvulas de compuerta 19 Ø abiertas

$$L_e = 0.14 \text{ m}$$

- Una válvula de compuerta 38 Ø abierta

$$L_e = 0.27 \text{ m}$$

- 2 codos 90° 19 Ø

$$L_e = 0.6 \text{ m}$$

- una tee 19 Ø y 2 tee 38 Ø

$$L_e = 1.15 \text{ m} \text{ y } L_e = 0.9 \text{ m}$$

- 2 bridas 19 Ø y 2 bridas 38 Ø

$$L_e = 0.17 \text{ m} \text{ y } L_e = 0.3 \text{ m}$$

- Una reducción 38x32 Ø y un ensanchamiento 19x38 Ø

$$L_e = 0.3 \text{ m} \text{ y } L_e = 0.4 \text{ m}$$

Todos los diámetros son comerciales y están dados en milímetros.

Como existen cambios de sección, se aplica la ley de continuidad para calcular la velocidad media.

$$V_1 A_1 = V_2 A_2$$

$$D1V1/4 = D2V2/4$$

$$V1 = 0.2143 \text{ m/seg}$$

siendo  $V2$  la velocidad en la succión de la bomba  
y en el cambio de sección anterior;

$$V1 = 0.2143(0.0445)^2 / (0.0227)^2$$

$$V1 = 0.8235 \text{ m/seg}$$

$$V = 0.4389 \text{ m/seg}$$

$$H_s = 0.03649(1.3 + (0.14)^2 + 0.27 + (0.6)^2 + 1.15 + (0.9)^2 + \\ (0.17)^2 + (0.3)^2 + 0.3 + 0.4)(0.4389^2) / (0.0227)^2 (9.81)$$

$$H_s = 0.1616 \text{ m}$$

Cálculo en la descarga:

$$R = 0.8236(0.0227)(100)^2 / 0.01935$$

$$R = 9661.87$$

Y tenemos

$$\lambda = 0.316 / (9661.87)$$

$$\lambda = 0.03187$$

Seguimos la ruta mas critica, es decir, a través del filtro

en by pass hasta el recipiente de salmuera.

El presente cálculo fué posterior a las primeras pruebas de la instalación, y por tanto se incluye una pérdida de presión, causada por el filtro. Esta pérdida constituye la única variante con respecto del cálculo previo a la selección de la bomba.

Los accesorios son:

-Válvula de compuerta 25 Ø 3/4 abierta en promedio

$L_e = 1.3 \text{ m}$

- 4 Bridas 25 Ø

$L_e = 0.21 \text{ m}$

- 2 Tee 25 Ø

$L_e = 0.6 \text{ m}$

- 2 Tee 25 Ø

$L_e = 2 \text{ m}$

- 2 Válvulas 19 Ø compuerta abiertas

$L_e = 0.17 \text{ m}$

- Filtro

$L_e = 2 \text{ m}$

- Codo 90 19 Ø

$L_e = 0.6 \text{ m}$

- 2 Codos 90 13 Ø

$L_e = 0.5 \text{ m}$

- Válvula compuerta 13 Ø

$L_e = 0.7 \text{ m}$

- Ensamblamiento 19x25 Ø

$L_e = 0.4 \text{ m}$

- Reducción 25x19 Ø

$L_e = 0.17 \text{ m}$

- Reducción 19x13 Ø

$L_e = 0.13 \text{ m}$

- Tubo 25 Ø

$L_e = 0.5 \text{ m}$

Se tiene en el primer cambio de sección:

$$V1D 1= V2D 2$$

$$V2= 0.8236(0.0227)^2/(0.0303)$$

$$V2= 0.4592 \text{ m/seg}$$

Usando esta velocidad se hará el cálculo desde la bomba hasta el punto A; Resulta

$$R = 7190$$

$$\lambda = 0.3432$$

$$Hd1= 0.03432(1.3+(0.21)^4+(0.6)^2+(2)^2+(0.17)^2+2+0.4+0.5)(0.4592)^2/(0.0303)(9.81)^2$$

$$Hd1= 0.13 \text{ m}$$

En el segundo cambio de sección:

$$V2D 2= V3D 3$$

$$V3= 0.4592(0.0303)^2/(0.0227)^2$$

$$V3= 0.8181 \text{ m/seg}$$

Y en el último cambio de sección:

$$V3D 3= V4D 4$$

$$V4= 1.2867 \text{ m/seg}$$

Resultando

$$R = 12035$$

$$\lambda = 0.03016$$

Por tanto las pérdidas

$$Hd2 = 0.03016(0.6 + (0.5)^2 + 0.7 + 0.17 + 0.13 +$$

$$1.11)(1.2867^2 / (0.0181)(9.81)^2$$

$$Hd2 = 0.5638 \text{ m}$$

Entonces la altura manométrica

$$Hm = 0.675 + 0.5638 + 0.13 + 0.1616 + 0.03457$$

$$Hm = 1.5649 \text{ m}$$

Se considera  $P_p$  la presión en la placa de inyección, y como una estimación basada en la experiencia de atomización de combustible, se considera como;

$$P_p = 3 \text{ Kg/cm}^2$$

Esto cambia a

$$H_m = 31.5649 \text{ m}$$

La potencia del motor necesaria para accionar la bomba es:

$$N_m = 0.7 H_m / 76 \eta_b \text{ dada en HP}$$

donde

$$\gamma = 1190.9 \text{ Kg/m}^3 \text{ salmuera al 23\% en peso y } 20^\circ \text{C (17)}$$

$$\eta_b = 60\% \text{ se sabe que las bombas comerciales no son}$$

muy eficientes.

$$N_m = 20(1190.9)(31.5649) / (76)(0.6)(60)1000$$

$N_a = 0.2747 \text{ HP}$

Por consideración a las variaciones en flujo y presión, y además por confiabilidad se elige un motor de 1/2 HP para accionar la bomba.

Se encontró en el mercado una bomba centrífuga horizontal radial, de dimensiones  $1 \frac{1}{4} \times \frac{3}{4}$  pulg, modelo estandar 316 MAS marca Baden, accionada por un motor monofásicoabierto doblemente embalado marca GE de 1/2 HP.

Tanto la flecha del motor, el impulsor, el cabezal así como la carcasa de la bomba son fabricados en acero inoxidable tipo AISI-316. Cuenta con un sello mecánico tipo KI. Esta bomba suministra un gasto de 60 L/min a una altura de 25 mca, con lo que esperamos cubrir nuestras necesidades, sabiendo que se ha hecho una sobreestimación de la potencia requerida.

## APENDICE C

Cálculos y comentarios de la cuba.

En relación con el diagrama de la cuba presentado en la figura 57

Tenemos  $h_c$  - centro de presión

$$h_c = 2/3 h_t$$

$$h_c = 2/3 (1.33) \text{ m}$$

$$h_c = 0.886 \text{ m}$$

Superficie Mojada:

$$s = 1.33 \text{ m} \times 0.43 \text{ m}$$

Siendo la fuerza sobre el centro de presión:

$$F = W h_c s$$

Donde:

$W$  - Peso específico de salmuera de cloruro de sodio al 23% en peso a 20 C (17).

$$F_1 = 1164 \text{ Kg/m}^3 (0.886 \text{ m}) 0.572 \text{ m}^2$$

$$F_1 = 576.59 \text{ Kg}$$

Esta se puede descomponer en dos fuerzas  $(F_2, F_3)$  en línea vertical sobre la pared de la cuba, las cuales deben ser iguales a las reacciones ejercidas por los arillos de sujeción.

Tenemos:

$$\sum M_0 = 0$$

$$(0.3)F_3 - (0.107)F_1 = 0$$

$$F_3 = 0.107/0.3 (576.59)$$

$$F_3 = 205.65 \text{ Kg}$$

Por  $\sum F_x = 0$

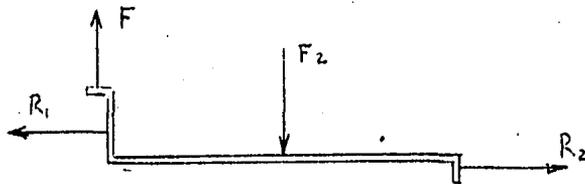
$$F_1 = F_2 + F_3$$

De aquí:

$$F_2 = F_1 - F_3$$

$$F_2 = 370.94 \text{ Kg}$$

D.C.L. Elemento de arillo:



Por  $\sum F_x = 0$

$$R_1 = R_2$$

Y por  $\sum F_y = 0$

$$F = F_2$$

Puesto que el estancaje es simétrico, las fuerzas que producen los esfuerzos tanto de tensión como cortantes son iguales, y para el caso más crítico no mayores que  $F_2$ .

Entonces el esfuerzo a la tensión:

$$\sigma = P/A$$

Donde  $A$ .- área transversal de la solera de aluminio

$$A = (1.25)(0.25) + (2.54)^2 \text{ cm}$$

$$A = 2.016 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = 370.74 / 2.016$$

$$\sigma = 183.98 \text{ Kg/cm}^2$$

De la tabla I (17) se tiene:

	Densidad Kg/dm <sup>3</sup>	Resistencia Rotura Tensión-Cortante (Kg/cm <sup>2</sup> )	Mod. Elast. Tens.-Cort. (Kg/cm <sup>2</sup> x 10 <sup>3</sup> )
Aluminio Fundición	2.629	914 738.2	703 281.2

Lo cual indica que no existe riesgo de rotura. La deformación causada en dichos elementos por efecto del esfuerzo de tensión, debe ser lo mas pequeña posible para evitar que las uniones soldadas de acrilico absorban gran parte de la fuerza!

Tenemos

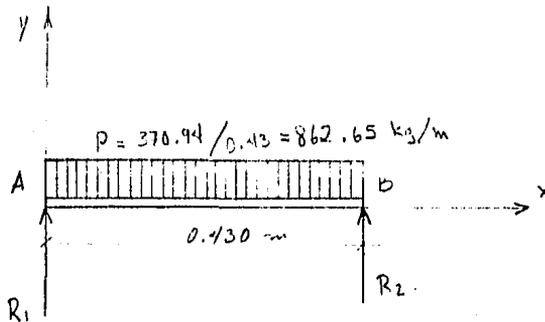
$$\delta = P L / A E$$

$$\delta = 370.94 (0.43) (1000) / (2.016) (703 \times 10^3)$$

$$\delta = 0.1125 \text{ mm}$$

Es evidente que existirá una deformación normal a cada elemento causada por la misma fuerza sobre el acrílico, la cual se puede representar por una fuerza uniformemente distribuida y cuyo análisis nos permitirá conocer el esfuerzo cortante y el momento flector al que está sometido el aluminio.

Considerando la unión de dos elementos de arillo como un solo elemento rígido, obtenemos:

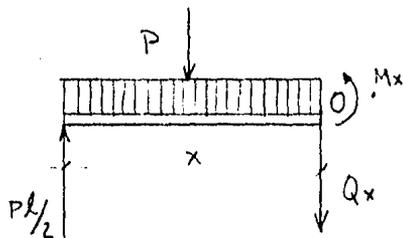


Por  $\sum F_v = 0$

$$PL = R_1 + R_2 \quad ; \quad \text{pero, si } R_1 = R_2 \quad ;$$

$$R_1 = PL / 2$$

Tomando una parte del elemento:



Siendo  $Q_x$ .- Esfuerzo Cortante

$M_x$ .- Momento Flector

Haciendo

$$\sum F_y = 0$$

$$PL/2 - Px - Q_x = 0$$

$$Q_x = PL/2 - Px$$

Por

$$\sum M_o = 0$$

$$-PL(x)/2 + Px(x)/2 + M_x = 0$$

$$M_x = PL(x)/2 - P(x)^2 / 2$$

Para  $x = 0$  el esfuerzo cortante:

$$Qx = PL/2$$

$$Qx = 862.65 (0.43)/2$$

$$Qx = 370.99 \text{ Kg}$$

entonces:

$$\sigma = 370.99/2.016$$

$$\sigma = 183.99 \text{ Kg/cm}^2$$

Que es menor que el esfuerzo cortante necesario para la rotura. Tabla 1, y se tiene también:

$$Mx = 0$$

Para  $x = L/2$

$$Qx = PL/2 - PL/2 = 0$$

$$Mx = 862.65 (0.43) / 4 - 862.65(0.43)^2/8$$

$$Mx = 19.94 \text{ Kgm}$$

Debe ser menor que el momento flector máximo ( $M_p$ ), pues así se asegura que no habrá deformación plástica continua sin aumento de carga. Utilizando la carga límite:

$$(P/2) (L/2) = M_p$$

MP# (914/2) (0.43/2)

MP# 98.255 Kum

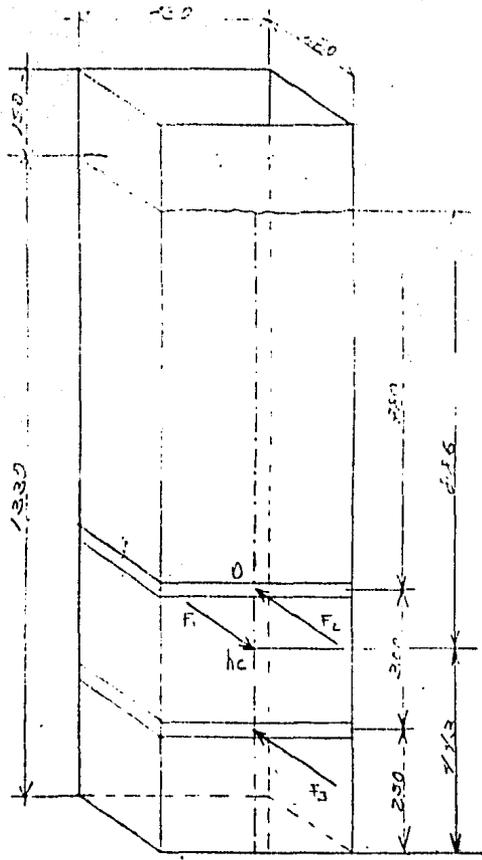


fig 57 Dimensiones de la cuba

## APENDICE D

Datos obtenidos por medio de la técnica fotográfica  
y análisis de imágenes para la determinación  
del tamaño de gotas

PH20 = 0.3 kg/cm<sup>2</sup> ; Pt = 0.5 kg/cm<sup>2</sup>

LIMITES DE CLASES (micras)	PORCENTAJE DE MASA	NUMERO DE PARTICULAS	
		TOTAL	PORCENTAJE
0- 1000	0.98	49	33.11
1000- 2000	42.14	78	52.70
2000- 3000	50.02	20	13.51
3000- 4000	6.86	1	0.68
4000- 5000	0.00	0	0.0
TOTAL	100.00	148	100.0

DIAMETRO MEDIO LINEAL.....1317.57 micras

DIAMETRO MEDIO DE MASA.....2137.60 micras

NUMERO DE FOTOGRAFIAS ANALIZADAS .....43

Determinación del tamaño de gotas

(continúa)

PH20 = 0.36 kg/cm<sup>2</sup> , Pt = 0.7 Kg/cm<sup>2</sup>

LIMITES DE CLASES (micras)	PORCENTAJE DE MASA	NUMERO DE PARTICULAS	
		TOTAL	PORCENTAJE
0- 1000	0.27	78	32.23
1000- 2000	7.48	81	33.47
2000- 3000	26.07	61	25.21
3000- 4000	8.21	7	2.89
4000- 5000	12.46	5	2.07
5000- 6000	45.51	10	4.13
TOTAL	100.00	242	100.00

DIAMETRO MEDIO LINEAL.....1714.88 micras

DIAMETRO MEDIO DE MASA.....4639.78 micras

NUMERO DE FOTOGRAFIAS ANALIZADAS.....89

Determinación del tamaño de gotas

(continúa)

PH20 = 0.5 kg/cm<sup>2</sup> ,      P1 = 0.8 Kg/cm<sup>2</sup>

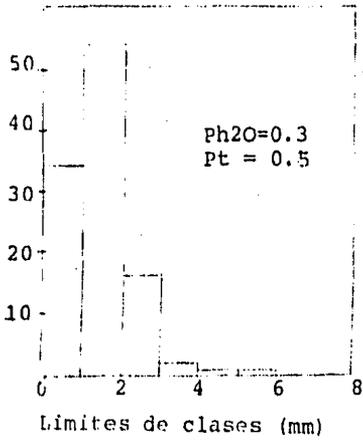
LIMITES DE CLASES (micras)	PORCENTAJE DE MASA	NUMERO DE PARTICULAS	
		TOTAL	PORCENTAJE
0- 1000	0.47	90	38.30
1000- 2000	12.86	91	38.72
2000- 3000	23.56	36	15.32
3000- 4000	16.16	9	3.83
4000- 5000	19.08	5	2.13
5000- 6000	27.87	4	1.70
<b>TOTAL</b>	<b>100.00</b>	<b>235</b>	<b>100.00</b>

DIAMETRO MEDIO LINEAL.....1478.72 micras

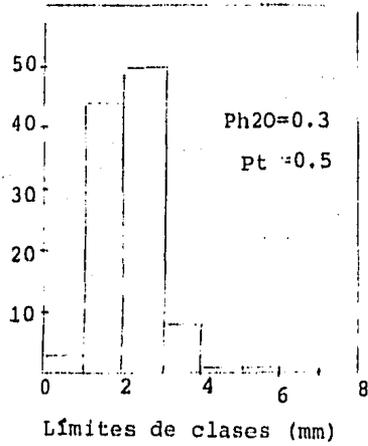
DIAMETRO MEDIO DE MASA.....3811.31 micras

NUMERO DE FOTOGRAFIAS ANALIZADAS.....72

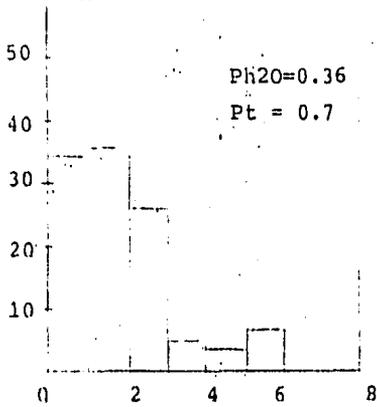
% de GOTAS



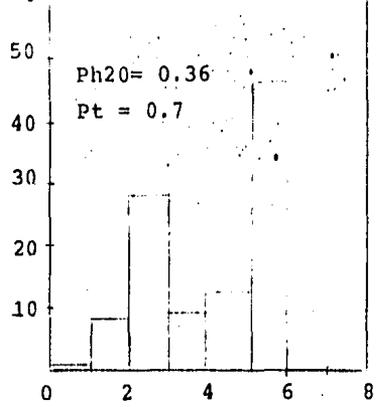
% DE MASA



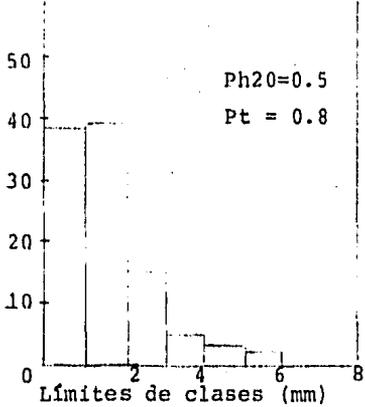
% de GOTAS



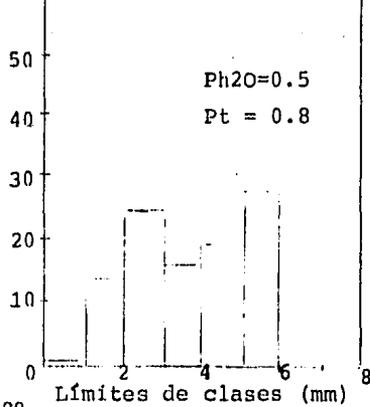
% DE MASA



% de Gotas



% de MASA



## APENDICE E

Sensor de conductividad. Metodología de construcción  
y detalles

La forma de construirlo es la siguiente: se corta un tramo de 7 cm de alambre de platino 0.41 mm para el electrodo puntual, y un tramo de 15.2 cm del mismo alambre se fuerza a la forma de electrodo secundario, como resorte de 1 cm de diámetro con un espaciamiento de 0.5 cm entre cada espira.

Los electrodos se platinizan en un proceso electroplatinizante, usando un equipo Beckman PK-1A, que consiste de una batería de 4.5 V, un reóstato para el control de la corriente, un amperímetro, interruptor inversor de polaridad, un par de postes aislados y una lata de solución platinizante que contiene:

Acido Cloroplátinico	3.0 g
Acetato de Plomo	0.02 g
Agua Destilada	100 ml

Los electrodos del sensor se calientan al rojo vivo, para extraer los gases absorbidos en el metal y una vez fríos se sumergen en 100 ml de solución electrolimpiadora que se compone de:

Acido Clorhídrico concentrado	70 ml
Agua Destilada	30 ml

Una vez limpios se les dá un tiempo de 30 seg a 40 mA y 30

ses con polaridad invertida, con el mismo amperaje. Con este tratamiento es suficiente para que los electrodos puedan alargar el tiempo de degradación bajo ambiente salino.

El electrodo puntual se hace pasar por un tramo de tubo de vidrio estandar 2 mm de diámetro para sellarlo de la siguiente manera:

Se calienta el ensamble hasta el punto en que el vidrio comienza a ablandarse y se estira poco a poco hasta sellar con el alambre, lo que le servirá como una cubierta aislante.

Desabsorbiendo inicialmente el alambre se evitará la formación de burbujas de gas atrapadas en el tubo. La operación puede repetirse, deslizando el primer ensamble sobre otro tramo de tubo de vidrio, ya que el encapsulado debe tener rigidez suficiente para evitar el riesgo de roturas. En el extremo opuesto de la punta sale el alambre 8 mm aproximadamente.

Se despoja de su cubierta un tramo de cable coaxial RGU178R, o sustituto, de aproximadamente 2.5 cm y se reúne la malla de cobre a un lado para dar lugar a que el teflón aislador interior quede descubierto. Este aislante interior se retira 8 mm y se suelda el conductor central del coaxial al alambre de platino saliente del encapsulado.

Se aplica fluorosilicon Dow Corning DC730 RTV a la Junta

soldada. Para protegerla aún mas, se desliza un tramo de tubo termocontráctil de 1/2 pulg de diámetro y con la ayuda de la punta caliente de un cautín, se ajusta perfectamente hasta lograr una sección de forma circular uniforme.

El electrodo secundario en forma de resorte es soldado a la malla del coaxial y se repite la operación con DC730 RTV y material termocontráctil. De éste último se usa un tercer tramo que abarca desde la soldadura malla-electrodo secundario hasta 0.5 cm antes de la punta del sensor.

Antes de enrollar el electrodo secundario sobre el encapsulado, debe aplicarse uniformemente resina epóxica sobre el tubo plástico protector, con el objeto de dar rigidez a todo el sensor.

Un tubo de vidrio de 1 cm de diámetro exterior, doblado a 90 con 7 cm de lado, fue utilizado para montar el sensor, de tal manera que conserva su posición horizontal al sumergirlo en el gradiente salino de estanque solar.

El principio de operación es el siguiente:

Un circuito integrado oscilador produce una señal sinusoidal con una frecuencia aproximada de 1000 Hz, y una amplitud de 1.5 V. La componente de corriente directa es retirada con un filtro pasa altas de una etapa (R1,C1). La señal filtrada

pasa por un amplificador no inversor cuya ganancia queda determinada por las resistencias R2 y R3 .

Un segundo amplificador operacional se usa con una resistencia fija R4 y la resistencia variable del sensor R<sub>p</sub>, para dar una señal de salida que cambia linealmente con un cambio en la conductividad del electrolito medido.

Por otro lado un circuito integrado (IC) multiplicador sustrae la señal (X1) de la señal (X2) y multiplica su diferencia (X2 - X1) por (X1), para producir una salida igual al voltaje producido (X2 - X1)X1/10.

Este voltaje producido es de la forma  $X = K(1 - \sin 2w)$ , donde w es la frecuencia del oscilador y K es directamente proporcional a la conductancia medida (1/R<sub>p</sub>).

La componente sinusoidal de la señal dada por el multiplicador es retirada por dos filtros inversores pasa bajas en cascada. La salida del primer filtro es un voltaje negativo y la señal de salida del segundo es un voltaje positivo, la cual puede ser leída directamente por un voltmetro digital. Un diagrama del circuito del sensor puede verse en la fig 58 y en la fig 59 puede verse un diagrama del ensamble del mismo.

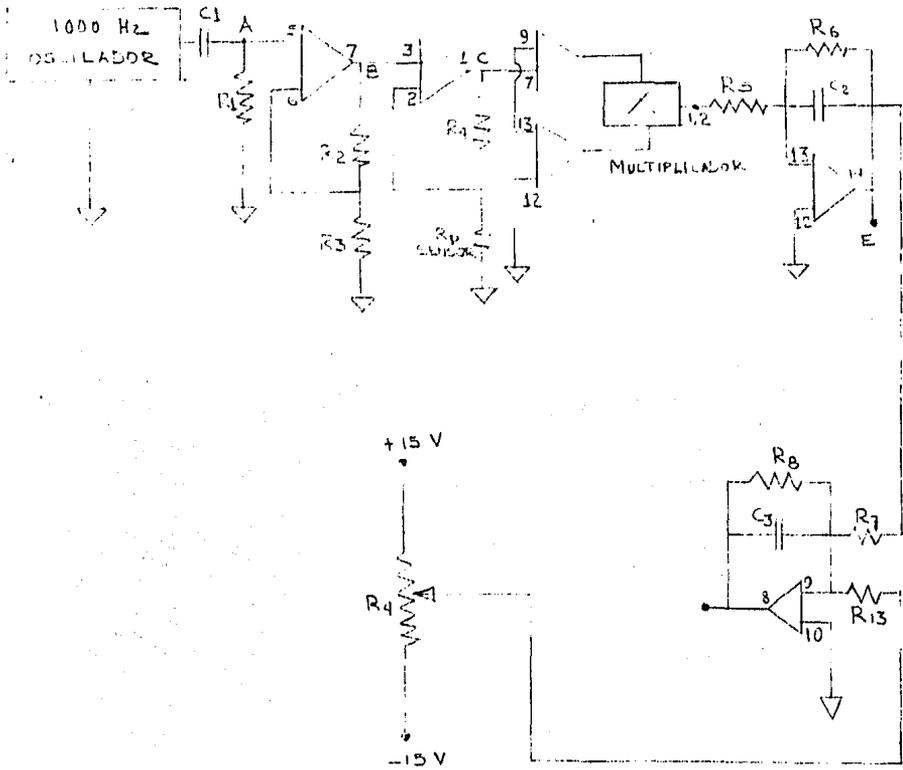


fig 58 DIAGRAMA DEL CIRCUITO DEL SENSOR



LISTA DE COMPONENTES DEL CIRCUITO.

$R_1 = 100\ 000\ \Omega$   
 $R_2 = 24\ 000\ \Omega$   
 $R_3 = 18\ 000\ \Omega$   
 $R_4 = 1\ 200\ \Omega$   
 $R_5 = 5\ 100\ \Omega$   
 $R_6 = 8\ 200\ \Omega$   
 $R_7 = 1\ 800\ \Omega$   
 $R_8 = 8\ 200\ \Omega$   
 $R_9 = 300\ 000\ \Omega$   
 $R_{10} = 300\ 000\ \Omega$   
 $R_{11} = 81\ 000\ \Omega$   
 $R_{13} = 6.8\ k\Omega$   
 $R_{14} = 100\ k\Omega$   
 $C_1 = 0.01\ \mu F$   
 $C_2 = 1.0\ \mu F$   
 $C_3 = 1.0\ \mu F$   
 $C_4 = 0.001\ \mu F$

## APENDICE F

Técnica fotográfica usada para la caracterización de la placa de soteo. Descripción de los elementos

### Fuente luminosa

El estudio de las velocidades de las partículas de agua requiere de una cámara fotográfica con tiempo de obturación muy pequeño ( $< 1 \mu\text{seg}$ ), para poder congelar el movimiento de las partículas y obtener fotografías claras y precisas. Los tiempos de obturación de las cámaras convencionales no son inferiores a  $500 \mu\text{seg}$ .

Como alternativa se utilizó una fuente luminosa de corta duración, de modo que el tiempo de exposición quedara determinado por el pulso luminoso y no por el tiempo de obturación.

La unidad seleccionada fué del tipo de chispa eléctrica, la cual tiene una duración de 300 nanosseg y disipa una energía luminosa de 9 Joules.

Debido a que la chispa eléctrica producida entre los electrodos del flush no es circular, es necesario anteponer una pupila de salida de forma circular. Además, para obtener una fuente de luz homogénea y no coherente (la coherencia de la luz emitida por algunos puntos de la descarga eléctrica podrían producir fenómenos de difracción en la película), se

coloca un difusor, el cual consiste simplemente en una placa delgada de vidrio finamente esmerilada.

El difusor tiene una segunda función: permite cambiar el tamaño de la zona iluminada y este depende de la distancia que lo separa de la pupila de salida.

#### Lente Condensadora

Su función es formar la imagen de la fuente luminosa justamente sobre la lente fotográfica. Debe cumplir con dos condiciones: a) que capture suficiente luminosidad (de ésta depende la sensibilidad de la película a utilizar), y b) que la sección transversal del cono luminoso (generado por la lente al converger los rayos de luz sobre la lente fotográfica) al interceptar el plano enfocado sea de mayor diámetro que la diagonal del campo visual de la cámara, pues así se asegura que cualquier objeto dentro de éste sea iluminado.

#### Lente y Cámara fotográfica

Debido a que las gotas de lluvia son relativamente grandes (5 mm) no es necesario amplificar el tamaño de nuestras gotas para ser fotografiadas.

El sistema se adapta perfectamente con una lente de distancia focal:  $f=305$  mm diámetro,  $d=34$  mm y para encontrar la distancia al objeto ( $u$ ), la distancia a la película ( $v$ ) se

aplica la ecuación gaussiana para las lentes (15):

$$1/f = 1/u + 1/v$$

y

$$m = v/u$$

si

$$m = 1$$

obtenemos

$$f = u/2$$

$$u = 610 \text{ mm} = v$$

La cámara utilizada permite el acoplamiento de un módulo automático que efectúa mediante señales eléctricas el disparo del obturador, avance y rebobinado de la película. Siendo la magnificación igual a uno, el campo visual enfocado será exactamente igual a las dimensiones de la película, es decir:

$$cv = a b/m$$

siendo para el formato 135:  $a = 24 \text{ mm}$ ;  $b = 36 \text{ mm}$

## CAPITULO 10

### REFERENCIAS

- 1 Huacuz, Jorge M, et al  
Informe anual sobre estanques solares IIE, 1982.
- 2 Oester, Gerald  
Density Gradients, Scientific American Review,  
Vol. 213, pp 70-72
- 3 Zandrando, Federica  
A Demonstration Salt Gradient Solar Pond, Fourth Semianual  
Progress Report, US Department of Energy, pp 15-25
- 4 Huacuz, Jorge M  
Primeras Observaciones del efecto de la lluvia en un  
Estanque Solar, ANES, Tampico Tamps 1984
- 5 Trewartha, Glen A  
An Introduction to the Climate  
Mc Graw Hill, pp 145-149
- 6 Britanic Enciclopedia  
Vol XIV Macropedia, Helen Hemingway Benton 1974

PP 962-964

7 Britanic Enciclopedia

Vol VIII, pp 389-391

7.1 Porlaswsky, Carl J

Laboratory Simulation of the Solar Pond, double  
diffusive, thermohaline system. pp 62-66

8 Grimmer, D P, Jones G F, et al

Development of a point-electrode conductivity  
salinometer. Los Alamos National Laboratory

9 Mataix, C

Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas  
Harper and Row Publishers, pp 346-3473

10 Asociación mexicana de industrias plásticas, AC

Criterios de diseño para usos de tubería de PVC

11 Quimica Interplastic, SA

Folleto de producto

12 Streeter, Wylie

Mecánica de Fluidos

Mc Graw Hill, pp 255-257

- 13 Castrejón, R. Milán, J  
Aplicación de la tecnología de fotografía de sombra  
al análisis de atomizadores mecánicos  
IIE.
- 14 Yule, A I. Chisier, N A  
Measurement of particle sizes in sprays by the  
automated analysis of spark photographs  
Babcock and Wilcox, Renfrew UK
- 15 Sears, Francis W  
Fundamentos de Física, Vol III Óptica  
Colección ciencia y técnica. Aduilar, pp 87-92
- 16 Timoshenko, Stephen  
Resistencia de materiales  
Espasa Calpe, 13a Ed, Madrid 1976
- 17 West, C Robert  
Hand Book of Chemistry and Physics  
CRC Press, 55 Ed.
- 18 Born, Max  
Principles of Optics  
Pergamon Press, Sixth Edition 1980

## LISTA DE FIGURAS

	PAG.
Fig 1 Perfiles típicos de temperatura en un estanque solar (Estanque de la Universidad de Nuevo México) .....	14
Fig 2 Métodos de extracción de energía en un estanque estabilizado por densidad .....	16
Fig 3 Principio de operación de un estanque en cascada.....	19
Fig 4 Balance energético de un estanque solar típico.....	24
Fig 5 Perfiles típicos de concentración y temperatura del estanque solar en el IIE (Mayo de 1981) .....	30
Fig 6 Precipitación Pluvial en Cuernavaca; Mar 1983.....	32
Fig 7 Evaporación en Cuernavaca; Mar 1983 .....	33
Fig 8 Comportamiento de la zona convectiva superior y movimiento de la interfaz ZCS/ZNC .....	34
Fig 9 Gráfica del rango de condiciones para la lluvia natural .....	47
Fig 10 Arreglo para la observación del gradiente .....	50
Fig 11 Gráfica del perfil del concentraciones en un estanque solar .....	53
Fig 12 Arreglo general del sistema hidráulico.....	61
Fig 13 Detalles de la placa de soteo .....	67
Fig 14 Comportamiento del gasto arrojado por el simulador de lluvia con el equipo original .....	69
Fig 15 Comportamiento del gasto arrojado por el simulador de lluvia con el equipo modificado .....	73
Fig 16 Arreglo de la técnica fotográfica para la caracterización de la placa de soteo .....	75
Fig 17 Comparación de los rangos de parámetros de lluvia .....	82
Fig 18 Detalles sistema de capilares .....	86
Fig 19 Detalle del Sensor de conductividad .....	89
Fig 20 Curva de calibración del sensor de conductividad.....	91

	PAG.
Fig 21 Condiciones iniciales del experimento.....	96
Fig 22 Condiciones finales de la corrida 1 .....	112
Fig 23 Condiciones iniciales de la corrida no. 2 ....	114
Fig 24 Condiciones finales de la corrida no. 2 .....	115
Fig 25 Condiciones iniciales de la corrida no. 3 .....	117
Fig 26 Condiciones finales de la corrida no. 3 .....	118
Fig 27 Condiciones iniciales de la corrida no. 4 .....	120
Fig 28 Condiciones finales de la corrida no. 4.....	121
Fig 29 Condiciones de reposo después de la corrida no. 4 .....	122
Fig 30 Condiciones iniciales de la corrida no. 5 .....	124
Fig 31 Condiciones finales de la corrida no. 5 .....	125
Fig 32 Condiciones iniciales de la corrida no. 6 .....	128
Fig 33 Condiciones finales de la corrida no.6 .....	129
Fig 34 Condiciones iniciales de la corrida no. 7 .....	131
Fig 35 Condiciones finales de la corrida no. 7 .....	132
Fig 36 Condiciones iniciales de la corrida no. 8 .....	133
Fig 37 Condiciones finales de la corrida no. 8 .....	134
Fig 38 Condiciones iniciales de la corrida no. 9 .....	135
Fig 39 Condiciones finales de la corrida no. 9 .....	136
Fig 40 Condiciones iniciales de la corrida no. 10 ....	137
Fig 41 Condiciones finales de la corrida no. 10 .....	138
Fig 42 Condiciones iniciales de la corrida no. 11.....	140
Fig 43 Condiciones finales de la corrida no. 11.....	141
Fig 44 Condiciones iniciales de la corrida no. 12 ....	142
Fig 45 Condiciones finales de la corrida no. 12 .....	143

Fig 46 Condiciones iniciales de la corrida no. 13 .....144

Fig 47 Condiciones finales de la corrida no. 13 .....145

Fig 48 Condiciones iniciales de la corrida no. 14 .....147

Fig 49 Condiciones finales de la corrida no. 14 .....148

Fig 50 Condiciones iniciales de la corrida no. 15 .....149

Fig 51 Condiciones finales de la corrida no. 15 .....150

Fig 52 Condiciones iniciales de la corrida no. 16 .....151

Fig 53 Condiciones finales de la corrida no. 16 .....152

Fig 54 Condiciones iniciales de la corrida no. 17 .....153

Fig 55 Condiciones finales de la corrida no. 17 .....154

Fig 56 Avance de la Zona de Interfaz, Respuesta del  
perfil de concentraciones .....155

Fig 57 Dimensiones de la cuba .....164

Fig 58 Diagrama del circuito del sensor .....193

Fig 59 Ensamblado del circuito del sensor .....194