

Valoración Hidrosocial

En la Reserva de la Biósfera
del Vizcaíno, BCS.; México

LUIS F. BELTRÁN MORALES

SAUL CHÁVEZ LÓPEZ

ALFREDO ORTEGA RUBIO

EDITORES



**VALORACIÓN HIDROSOCIAL EN LA RESERVA DE
LA BIOSFERA DEL VIZCAÍNO, BCS. MÉXICO**

VALORACIÓN HIDROSOCIAL EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA DEL VIZCAÍNO, BCS. MÉXICO

**Luis F. Beltrán Morales
Saúl Chávez López
Alfredo Ortega Rubio
Editores**

**CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS DEL
NOROESTE, S.C.**

México 2010

IV

Primera Edición: Enero de 2010

D.R.© Publicación de divulgación del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Mar Bermejo N.195, Col. Playa Palo de Santa Rita. La Paz, Baja California Sur, México, 23090.

El contenido de los capítulos es responsabilidad de los autores

La presentación y disposición en conjunto de **Valoración hidrosocial en la Reserva de la Biosfera del Vizcaíno, BCS.; México** son propiedad del editor. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida, mediante ningún sistema o método electrónico, mecánico (incluyendo fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento de información), sin consentimiento por escrito del editor.

Un agradecimiento especial a L.A.E. Tania Flores Azcárrega por su contribución para la integración de cada uno de los capítulos de este documento.

Responsables de Edición:

Luis F. Beltrán Morales

Saúl Chávez López

Alfredo Ortega Rubio

Tania Flores Azcárrega

Portada y Edición interior:

Gerardo Rafael Hernández García

HC140.E5 D48 2010

Valoración hidrosocial en la Reserva de la Biosfera del Vizcaíno, BCS.; México / editado por Luis Felipe Beltrán Morales, Saúl Chávez López y Alfredo Ortega Rubio. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. 2009.

227 p.: il. ; 23 cm.

1. Desarrollo Regional--México

I. Beltrán Morales, Luis Felipe, Saúl Chávez López y Alfredo Ortega Rubio.

Impreso en México

Printed in México

Editores

LUIS F. BELTRAN MORALES. Doctor en Ciencias Ambientales por el Centro Europa-Latinoamérica de la Universidad de Concepción, Chile (EULA), Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel II. Investigador Titular del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., Profesor de la Maestría en Economía del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la UABCS y del Posgrado en Uso, Preservación y Manejo de Recursos Naturales del CIBNOR, S.C. Líneas de Investigación: Economía de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable. Actualmente es Coordinador de Vinculación, Servicios y Transferencia de Investigación del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. (CIBNOR, S.C.). E-mail: lbeltran04@cibnor.mx

ALFREDO ORTEGA RUBIO. Doctor en Ciencias con especialidad en Ecología por el Instituto Politécnico Nacional (IPN). Investigador Titular E del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, CIBNOR, S.C. Ha sido galardonado con dos Premios Nacionales: Reconocimiento a la Conservación de la Naturaleza 2003, en la Categoría Académica y de Investigación. Reconocimiento del Gobierno de la República Mexicana específicamente por la trayectoria y calidad de sus trabajos de investigación en materia de Conservación de la Naturaleza Mexicana, incluyendo las Áreas Naturales Protegidas, las Regiones Prioritarias para la Conservación y sus zonas de influencia. Asimismo, ha sido galardonado con el Premio Nacional al Mérito Nacional Forestal y de la Vida Silvestre 1993, por la calidad de sus trabajos de investigación en vida silvestre. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel III. Líneas de investigación: Ecología aplicada en la conservación, uso racional y manejo sustentable de recursos naturales renovables. E-mail: aortega@cibnor.mx

SAUL CHAVEZ LOPEZ. Doctor en Ciencias del Mar por la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Profesor invitado en el programa de postgrado de Ciencias Marinas y Costeras de la Universidad Autónoma de Baja California Sur y en la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad de Colima. Colaboración en el Grupo de Impacto Ambiental del CIBNOR, S. C., de 1992 al 2009 en 36 estudios ambientales entre los que destacan el Plan de Manejo (1992) y el Ordenamiento Ecológico (2003) de la Reserva de la Biosfera del Vizcaíno B. C. S. Líneas de Investigación: hidrodinámica y modelado costero; Geología Estructural e Hidrología Subterránea. Actualmente Investigador Asociado en el Programa de Planeación y Conservación Ambiental del Centro de Investigaciones Biológicas Noroeste, S. C. E-mail: schavez04@cibnor.mx

Índice

Presentación

Sergio Hernández Vázquez | 1

Introducción

Luis F. Beltrán Morales, Saúl Chávez López, Alfredo Ortega Rubio. | 3

CAPÍTULO I

Geomorfología de las Cuencas Hidrográficas y Calidad de Agua de la Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno, B. C. S.

Saúl Chávez López | 7

CAPÍTULO II

Hidrología de la Reserva de la Biosfera de el Vizcaíno, B. C. S.

Saúl Chávez-López | 35

CAPÍTULO III

Calidad de Agua en la Reserva de la biosfera de el Vizcaíno, B. C. S.

Saúl Chávez-López | 53

CAPÍTULO IV

Organismo Regulador del Recurso Agua en la Reserva de la Biosfera del Vizcaino, B.C.S. México.

Luis F. Beltrán Morales, Magdalena Lagunas Vázquez, José Antonio Beltrán Morales, Tania Flores Azcárrega, Martín Martínez Salvador | 77

CAPÍTULO V

Estructura Tarifaria del Recurso Agua en la Reserva de la Biosfera del Vizcaino, B.C.S. México

Luis F. Beltrán Morales, Marco A. Almendarez Hernández, Gerzaín Avilés Polanco, Lizbeth Salgado Beltrán, Enrique Troyo Diéguez | 99

CAPÍTULO VI

Volumenes de Consumo de Agua por Localidad en la Reserva de la Biosfera del Vizcaino, B.C.S. México

Luis F. Beltrán Morales, José Borges Contreras, Magdalena Lagunas Vázquez, José Antonio Beltrán Morales, Felipe García Rodríguez | 113

CAPÍTULO VII

Eficiencia Económica en el Contexto de la Provisión de Agua Bajo Precios Com-

VIII

petitivos y de Monopolio. Un Análisis Teórico para las Comunidades Costeras de la Reserva de la Biosfera El Vizcaíno, B.C.S. México

Marco A. Almendarez Hernández, Luis Armando Jaramillo-Mosqueira,
Luis Felipe Beltrán Morales, Gerzaín Avilés Polanco | 129

CAPÍTULO VIII

Destilación solar de agua de mar: una alternativa de ecodesarrollo para la Reserva de la Biosfera El Vizcaíno, B.C.S. México

Miguel A. Porta Gandara, Joaquín Gutierrez Jaguey | 153

CAPÍTULO IX

Mercados de Derecho de Agua: Una opción de ecodesarrollo en la Reserva de la Biósfera del Vizcaíno, B.C.S.

Fidel Cota Verdugo, Félix Alfredo Beltrán Morales, Tania Flores Azcárrega,
Luis F. Beltrán Morales, Alfredo Ortega Rubio | 173

Conclusiones Generales

Luis F. Beltrán Morales, Saúl Chávez López, Alfredo Ortega Rubio. | 201

Autores | 203

Referencias | 207

Presentación

Indudablemente a nivel planetario uno de los desafíos estratégicos de nuestra generación es la búsqueda de las soluciones óptimas que nos permitan un eficiente manejo del recurso natural agua. Las soluciones a los acuciantes problemas de manejo de los recursos hídricos, tienen que ver no solo con el uso propiamente del agua de una región, sino también con las acciones y decisiones que se toman en el uso de las tierras circundantes, a nivel de las cuencas.

Prácticamente toda la decisión de cambio de uso de suelo, de ordenamiento territorial y ecológico, y de desarrollo urbano, industrial o agropecuario, conllevan cambios que afectan tanto la cantidad como la calidad del agua superficial y subterránea. A su vez tales cambios repercuten en las potencialidades de utilización actual y futura que puede soportar una cuenca hidrológica, y sus recursos hidráulicos.

En este contexto, todo nuevo desarrollo, o cambio en decisiones de manejo altera en mayor o menor medida, la estructura y funcionalidad de los sistemas ecológicos circundantes y por ende en los procesos hidrológicos de los sistemas naturales, alterando los servicios ecológicos que prestan, tales como la captación de agua pluvial. Si a todo ello le aunamos el que toda decisión de cambio en patrones de uso de suelo, están a su vez determinadas por motivaciones de índole económica, las cuales a su vez dependen del entramado de condiciones sociales, tenemos entonces que un estudio de valoración hidrosocial es necesariamente un estudio interdisciplinario.

Precisamente la obra que tiene en estos momentos Usted en sus manos ha sido conceptualizada y desarrollada con un enfoque interdisciplinario, incluyendo en el análisis aproximaciones geomorfológicas, hidrológicas, jurídicas, sociales y económicas.

El resultado de este interdisciplinario esfuerzo ha redundado en el planteamiento estratégico de una Gestión Integral del recurso Agua, con prácticas recomendaciones tales como la implementación de instrumentos económicos, como la valoración, para solucionar los conflictos de administración del agua, precisamente en el Área Natural Protegida de mayor extensión y de mayor aridez de nuestro Estado de Baja California Sur y una de las más áridas y extensas de nuestra Republica Mexicana.

Por la importancia estratégica del tema Agua, por la importancia de esta Área Natural Protegida y por la aproximación interdisciplinaria con la que se ha desarrollado, esta obra indudablemente será de interés y utilidad tanto para aquellos que desean profundizar en el conocimiento de estas temáticas, como para aquellos que tienen en sus manos la toma de decisiones en esta Región.

Dr. Sergio Hernández Vázquez
Director General CIBNOR

CAPÍTULO VIII

Destilación Solar de Agua de Mar: una alternativa de ecodesarrollo para la Reserva de la Biosfera del Vizcaíno

Miguel Ángel Porta Gándara, Joaquín Gutiérrez Jagüey¹

La mayor parte del agua del planeta, más del 98 por ciento, está en el mar. Las demandas de agua dulce para agricultura y consumo humano aumentan constantemente, al tiempo que la contaminación del suelo y el aire reduce la proporción de agua potable. La disponibilidad de agua buena es cada día menor, además de que su distribución geográfica es inapropiada a la demanda.

La ingeniería intenta dilucidar los secretos del agua y su manejo. Los mecanismos e ingenios que se han desarrollado para ello, los muestra Levi (1989) de una manera apropiada. Se podría resumir que enseña a tener *una cultura del agua* en el amplio sentido de la frase.

San Francisco de Asís percibe desde un punto de vista poético y no por ello muy alejado de la ingeniería las características esenciales del agua: *-Laudato si mi Signore per sor aqua la quale e multo utile et humile et pretiosa et casta-*. El agua, así pues, en muchos sentidos lo es todo.

La destilación solar de agua de mar, probablemente una de las pocas alternativas viables para el futuro sustentable en la parte noroccidental de México. Especialmente en la península de Baja California, es una región con gran potencial para la destilación solar por ser una de las de mayor insolación en el planeta y contar con grandes extensiones de costa, tanto del Golfo de California, como del Océano Pacífico.

México cuenta con una gran cantidad de islas sin recursos acuíferos sustentables para su población, *v.gr.*, Isla Socorro, la de mayor extensión en el archipiélago de las Revillagigedo, en el Pacífico noroccidental mexicano, localizada a 500 km al sur de la península de Baja California. Esta isla permite a la nación incrementar a casi el doble su Zona Económica exclusiva en el Pacífico noroccidental, habitada por apenas unas 100 personas. Se requiere

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

que se suministre agua por medio de los barcos de la Armada de México. No se percibe una mejor tecnología que la destilación solar para abastecer la isla.

Resulta entonces, que aquellos recursos empleados en desarrollar la tecnología *pertinente* para la destilación solar de agua de mar son recursos bien empleados.

La destilación solar de agua es un procedimiento muy antiguo que la humanidad ha utilizado para satisfacer diferentes necesidades. Maurel (1981) y Malik *et al.* (1982) mencionan uno de los primeros tratados sobre destilación solar *De distillatione libri IX*, escrito por G.B. della Porta en 1589 en el cual describe un destilador solar con hemisferios de vidrio directamente expuestos al sol. Telkes (1953) menciona el trabajo de Lavoisier que utiliza concentradores solares para calentar alambiques en 1770, y describe los avances en cuanto a la fabricación y operación de destiladores solares convencionales de caseta y portátiles durante la segunda guerra mundial. Se analizan algunos elementos del destilador solar de manera aislada e independiente, se reportan diversos resultados experimentales, de los cuales destaca una gráfica de la eficiencia y la producción como función de la energía solar.

Posiblemente el trabajo más trascendente de las últimas décadas es el de Dunkle (1961); es el primer reporte en el que se establecen las bases de un análisis completo de las ecuaciones de balance en los distintos elementos de un destilador solar mediante parámetros concentrados, tanto para un destilador convencional de caseta como para el que llama de difusión de efecto múltiple. Establece que para una temperatura promedio de 150°F (65.5°C) y una diferencia de temperatura entre las placas de 20°F (11.1°C), el número de Grashof es $1.22 \times 10^6 d^3 \Delta T$, donde d está en pies y ΔT en °F, con lo que determina que el único mecanismo de transferencia es de conducción para placas con espaciamiento menor a 0.5 pulgadas. Su trabajo experimental se basa en cinco destiladores “difusivos” operados por varios meses, donde se utiliza un calentador eléctrico en lugar de energía solar y concluye que la correspondencia entre las producciones experimentales y las calculadas no son buenas, pero su modelo lo encuentra como una herramienta adecuada para propósitos de diseño.

Cooper (1969) reporta un trabajo puramente teórico en el que mediante el método de diferencias finitas resuelve las ecuaciones de balance de la cubierta y de la salmuera de un destilador solar de caseta. Se analiza el efecto de diferentes parámetros en la producción, de los cuales destacan la cantidad inicial de salmuera con y sin aislamiento térmico bajo la charola, de lo que concluye que sin aislante no se tiene un efecto significativo, pero para tirantes de 0.5 a 12 pulgadas el efecto de adicionar aislamiento térmico permite incrementar un 30% el destilado. Otra variable de interés es la velocidad del viento de la que observa que después de 5 millas/h el incremento en la producción es muy pequeño.

Diversos trabajos posteriores Ali (1993), Singh y Tiwari (1993), Sharma y Mullick (1993), Shawaqfeh y Farid (1995), Mowla y Karimi (1995), han establecido las ecuaciones de balance de los destiladores solares de parámetros concentrados, basados todos ellos en el trabajo original de Dunkle (1961) con aportaciones marginales.

Destilador solar somero

Los destiladores solares someros (Fig. 1) con una relación de aspecto (H/L) de 0.2 son los más eficientes en la literatura (McCracken y Porta 1990), por tanto, tiene desde el punto de vista económico gran importancia conocer a profundidad la manera en que funcionan estos dispositivos, de tal suerte que pueda aumentarse la eficiencia y de esta manera bajar los costos de producción de agua destilada.

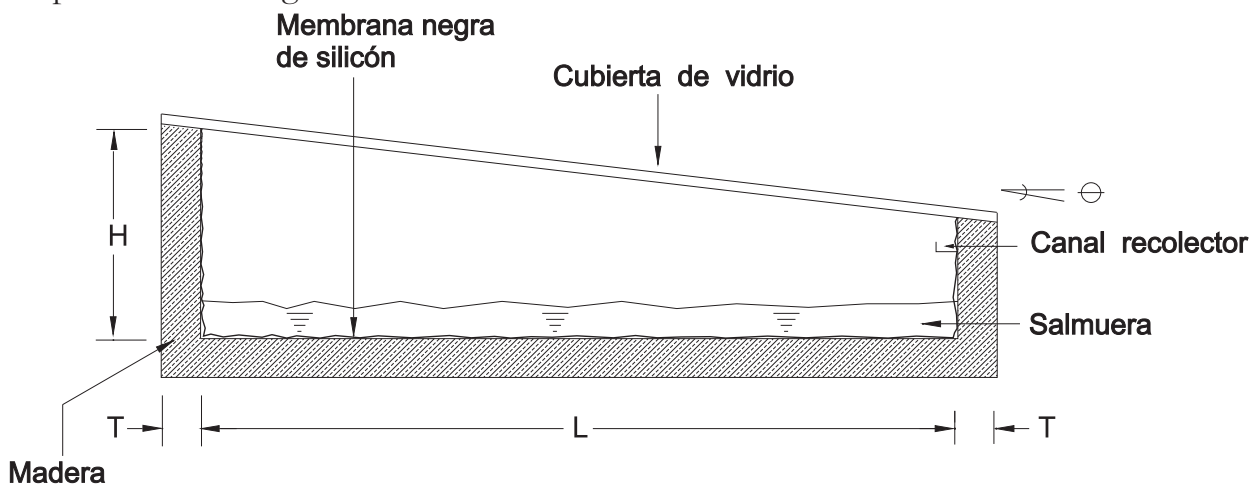


Figura 1. Destilador solar somero tipo McCracken-Porta.

El coeficiente global de transferencia de calor, particularmente entre salmuera-vidrio, es el de mayor importancia en el entendimiento de los mecanismos de transferencia de calor y masa en el interior del destilador; en este coeficiente se agrupan los mecanismos de convección, evaporación, condensación, radiación y difusión.

Para entender el funcionamiento de los destiladores solares se plantea un análisis con base en un balance de energía en cada uno de los elementos del sistema: condensador (g), salmuera (w) y fondo (b), con base en un sistema de tres ecuaciones diferenciales de parámetros concentrados, cada elemento se representa con un valor de temperatura.

El uso de parámetros concentrados es una práctica establecida; los modelos matemáticos de este tipo son referidos ocasionalmente con el nombre de modelos de Cooper para dar crédito de P.I. Cooper, quien probablemente fue el primero en dar a este enfoque amplia difusión (Cooper, 1969).

Balance energético

El balance energético en cada uno de los elementos se hace con fundamento en el principio básico de la ley de la conservación de la energía, que en su forma general expresa los cambios respecto al tiempo de la cantidad de energía almacenada en alguno de los elementos de un sistema, en función de las energías que entran y salen del mismo, considerando ausencia de trabajo mecánico:

$$\frac{dE_z}{dt} = E_i - E_0 \quad (1)$$

donde : E_z Energía almacenada en el sistema.

E_i Energía que entra al sistema.

E_0 Energía que sale del sistema.

Balance en el condensador

La cantidad de calor acumulado por unidad de área horizontal en el condensador, está determinado por la energía solar disponible menos las pérdidas al ambiente y a la salmuera, determinadas por los coeficientes globales de transferencia de calor y sus diferencias de temperatura respectivamente, de tal forma que:

$$U_{wg}(T_w - T_g) + a_g G - U_{ga}(T_g - T_a) = m_g c_g \frac{dT_g}{dt} \quad (2)$$

- U_{wg} Coeficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y la cubierta.
 U_{ga} Coeficiente global de transferencia de calor entre la cubierta y el ambiente.
 T_w Temperatura de la salmuera.
 T_g Temperatura de la cubierta.
 T_a Temperatura ambiente.
 a_g Coeficiente de absorción para la cubierta.
 G Radiación solar en el plano inclinado.
 m_g Masa de la cubierta.
 c_g Calor específico de la cubierta.

además:
$$a_g = \alpha_g(1 - \rho_g) \quad (3)$$

en la que:

- α_g Absortancia de la cubierta.
 ρ_g Reflectancia de la cubierta.

Balance en la salmuera

La energía acumulada por unidad de área en la salmuera se determina mediante la diferencia entre la energía solar transmitida por el condensador y las pérdidas al vidrio y al fondo que se calculan con base en las diferencias de temperatura, y en los coeficientes globales de transferencia de calor respectivamente:

$$a_w G - U_{wg}(T_w - T_g) - U_{wb}(T_w - T_b) = m_w c_w \frac{dT_w}{dt} \quad (4)$$

donde:

- U_{wb} Coeficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y el fondo.
 T_b Temperatura del fondo.
 a_w Coeficiente de absorción para la salmuera.
 m_w Masa de la salmuera.
 c_w Calor específico de la salmuera.

además:

$$a_w = \alpha_w \tau_g (1 - \rho_g)(1 - \rho_w) \quad (5)$$

en la que:

- α_w Absortancia de la salmuera.
- τ_g Transmitancia de la cubierta.
- ρ_w Reflectancia de la salmuera.

Balance en el fondo

La energía acumulada por unidad de área en el fondo del destilador está dada por la fracción de la energía solar que alcanza el fondo, determinada por las propiedades ópticas tanto de la salmuera como del condensador, menos las pérdidas térmicas al medio ambiente y a la salmuera calculadas con las diferencias de temperatura y los coeficientes globales de transferencia de calor:

$$a_b G + U_{wb} (T_w - T_b) - U_{ba} (T_b - T_a) = m_b c_b \frac{dT_b}{dt} \quad (6)$$

donde:

- U_{ba} Coeficiente global de transferencia de calor entre el fondo y el ambiente.
- a_b Coeficiente de absorción para el fondo.
- m_b Masa del fondo.
- c_b Calor específico del fondo.

además:

$$a_b = \alpha_b \tau_g \tau_w (1 - \rho_g)(1 - \rho_w)(1 - \rho_b) \quad (7)$$

en la que:

- α_b Absortancia del fondo.
- τ_w Transmitancia de la salmuera.
- ρ_b Reflectancia del fondo.

En las ecuaciones anteriores se cumple que para un mismo elemento del sistema la suma de reflectancia, transmitancia y absortancia es igual a la unidad.

Números adimensionales

En el caso de transferencia de masa entre dos fluidos de diferente peso molecular como la destilación de agua, se requiere un número especial de Grashof, tal y como Sharpley y Boelter (1938) lo han descrito según Malik *et al.* (1982), lo que implica modificar la diferencia de temperaturas en el número de Grashof normal por una nueva diferencia aparentemente mayor debida a la diferencia de las presiones de vapor entre el evaporador y el condensador:

$$\Delta T' = (T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g)T_w}{2.8 - P_w} \quad (8)$$

donde:

- $\Delta T'$ Diferencia de temperatura modificada.
 P_w Presión parcial de vapor de la salmuera.
 P_g Presión parcial de vapor de la cubierta.

Por lo que el número especial de Grashof es:

$$Gr_e = \frac{x^3 g \beta}{\nu^2} \Delta T' \quad (9)$$

donde:

- x Distancia característica.
 g Aceleración normal de la gravedad.
 β Coeficiente térmico de expansión volumétrico.
 ν Viscosidad cinemática.

y por tanto el número de Rayleigh especial es:

$$Ra_e = Gr_e Pr \quad (10)$$

donde el número de Prandtl es: $Pr = c_p \frac{\mu}{k}$

Para el cálculo del número de Nusselt experimental se utiliza la expresión:

$$Nu = h_{wg} \frac{x}{k} \quad (11)$$

donde h_{wg} se mide experimentalmente con el flujo másico del destilado por la entalpía de cambio de fase entre la diferencia de temperaturas de la salmuera y la cubierta, y es igual al coeficiente global de transferencia de calor U_{wg} .

Según Malik *et al.* (1982), cuando existe transferencia de calor y masa simultáneamente, y el número de Lewis es igual a uno, como es el caso de la destilación solar, quiere decir que la transferencia de calor es análoga a la de la masa, y por tanto, se pueden establecer las

correlaciones de transferencia de masa cambiando el número de Nusselt por el de Sherwood, y el número de Prandtl por el de Schmidt.

Como el interés de este experimento es solamente evaluar el cambio de la producción de agua destilada con respecto a la variación de la distancia de la salmuera a la cubierta, no se muestran gráficas de temperaturas ni de velocidad de viento.

Mediciones físicas

Para medir la influencia de la producción como función de la distancia (d) entre la salmuera y el vidrio se construyeron seis destiladores con distintas distancias.

La radiación solar registrada en W/m^2 para tres días seleccionados de experimentación, con los seis destiladores solares de campo, se muestra en la fig. 2. Como puede apreciarse, solamente en uno de esos días se tiene una cierta nubosidad. La fig. 3 muestra la producción acumulada de agua destilada a lo largo de uno de los tres días de experimentación, utilizando intervalos de 15 minutos.

Al final de cada día se obtuvo la producción diurna total de las 07:00 a las 19:00 h. Se midió el acumulado de la producción nocturna de agua destilada de las 19:00 h a las 07:00 h. La fig. 4 muestra la producción acumulada de cada destilador para los tres diferentes días. Debe notarse que para la escala del eje de producción de agua destilada, sólo aparece un intervalo entre 5 y 6.4 Kg por lo que el efecto se ve magnificado. Como puede apreciarse para el trabajo de campo, aparentemente existe una cierta influencia de d en la producción, ya que ésta no decrece monótonamente y pueden notarse repuntes a ciertas distancias.

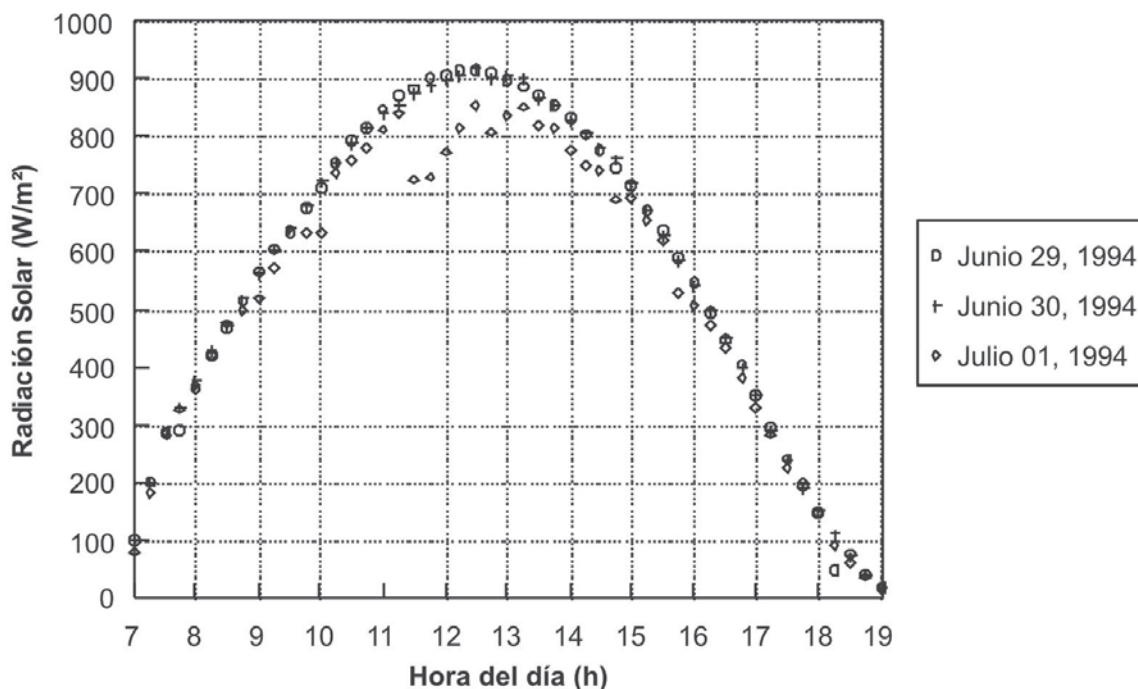


Figura 2. Radiación solar a lo largo de tres días de experimentación.

29 de Junio de 1994

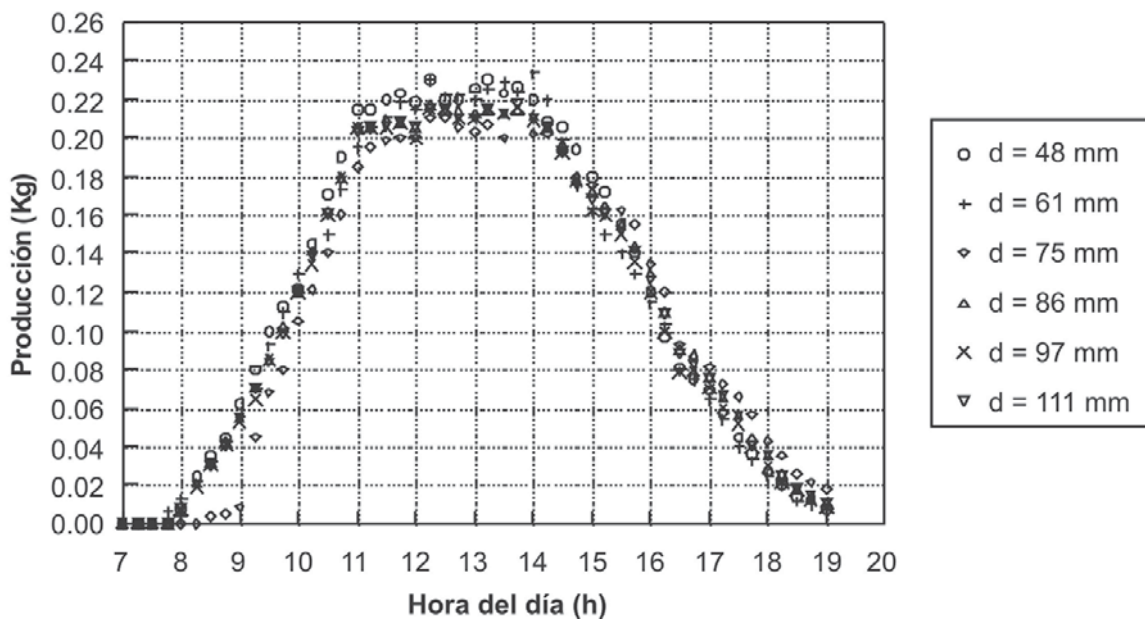
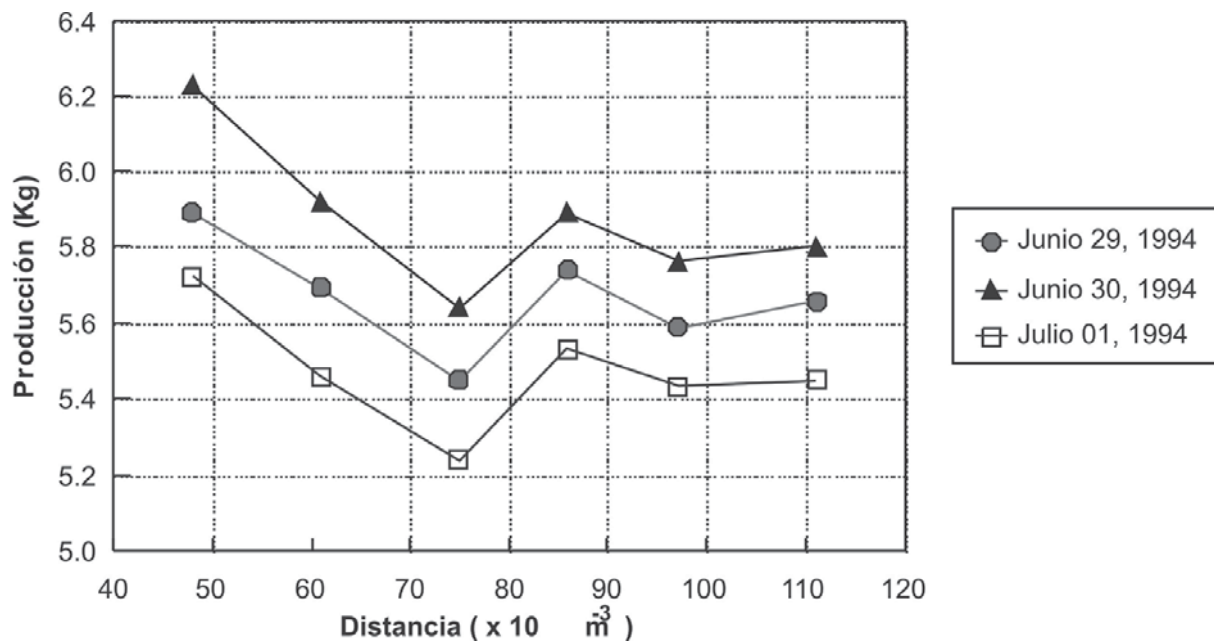


Figura 3. Producción acumulada en intervalos de 15 minutos a lo largo de uno de los tres días de experimentación.



Destilador $d \times 10^{-3} \text{ m}$	29 de junio Kg	30 de junio Kg	1 de julio Kg
48	0.60	0.70	0.58
62	0.55	0.60	0.55
75	0.50	0.58	0.50
86	0.55	0.60	0.56
97	0.52	0.59	0.55
111	0.52	0.60	0.55

Figura 4. Producción total diaria como función de la distancia entre la salmuera y la cubierta d , en el campo y producción acumulada nocturna.

Del trabajo anterior surgió la necesidad de identificar, bajo condiciones controladas la producción de destilado como función de d . Para este fin, se hicieron corridas experimentales isotermas con duración de dos horas cada una, para cuatro distintas diferencias de temperatura entre el vidrio y el agua a evaporar. La temperatura del vidrio se mantuvo controlada en 53°C

Puede notarse que para la mayor diferencia de temperaturas se obtiene la mayor producción, sin embargo como puede apreciarse en la fig. 5, no se aprecia una tendencia clara de la producción a disminuir con d .

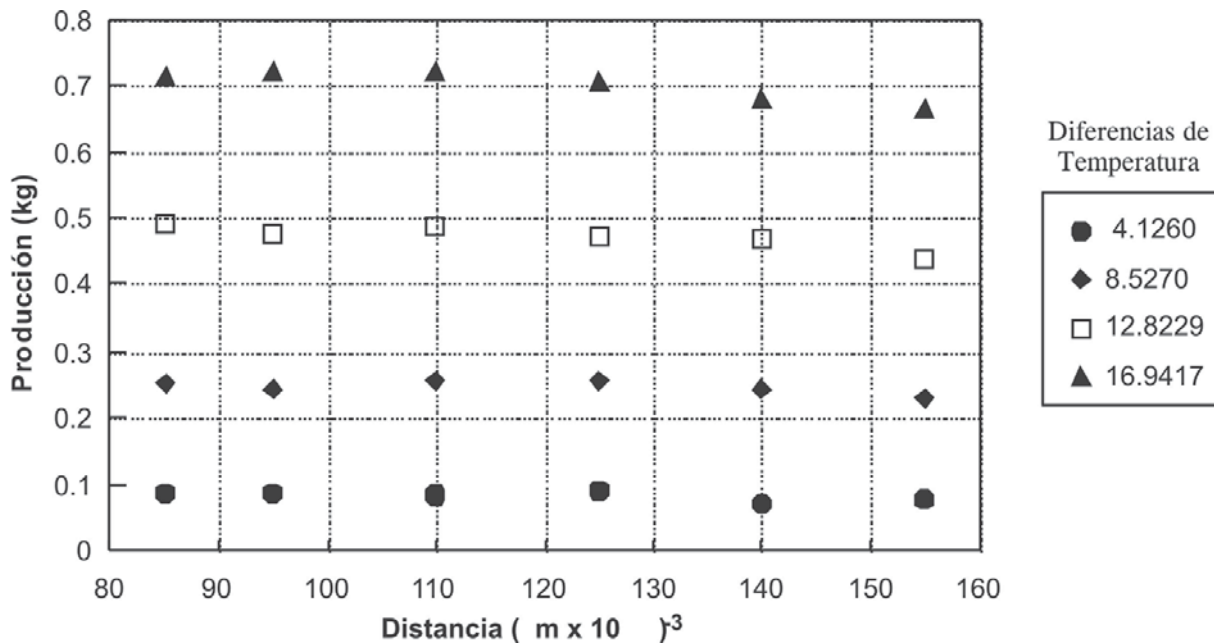


Fig. 5 Producción acumulada de dos horas respecto a la distancia entre la salmuera y la cubierta para diferentes diferencias de temperatura.

Se explora ahora con más detalle la probable evolución de la producción a lo largo del día. Para ello se atiende al hecho de que las diferencias de temperatura entre agua y cubierta varían

a lo largo del tiempo como función de las variaciones de insolación y temperatura ambiental fundamentalmente. Así puede emplearse información de los experimentos isotérmicos del laboratorio y los otros dinámicos del campo. Con éstos, se determinan las temperaturas como función del tiempo, y con las isotérmicas la producción para cada diferencia de temperaturas

Se puede construir un escenario probable en el cual las temperaturas varíen a lo largo del día de modo tal que las diferencias entre agua y cubierta correspondan a los valores empleados para construir la fig. 5. Puede suponerse que la diferencia entre agua y cubierta, alrededor del mediodía, va de 17°C y que dure dos horas; así mismo, la diferencia de 13°C dure dos horas, una en la mañana y otra en la tarde. Lo mismo para las otras dos diferencias.

Así la producción de un día se obtendría de sumar las producciones medidas como aparecen en la fig. 5, para las cuatro diferencias de temperaturas para cada d . El resultado de hacer esta suma aparece en la fig. 6. Como se aprecia, existe una cierta tendencia al repunte de la producción para ciertas distancias tal como ocurrió en los destiladores de campo.

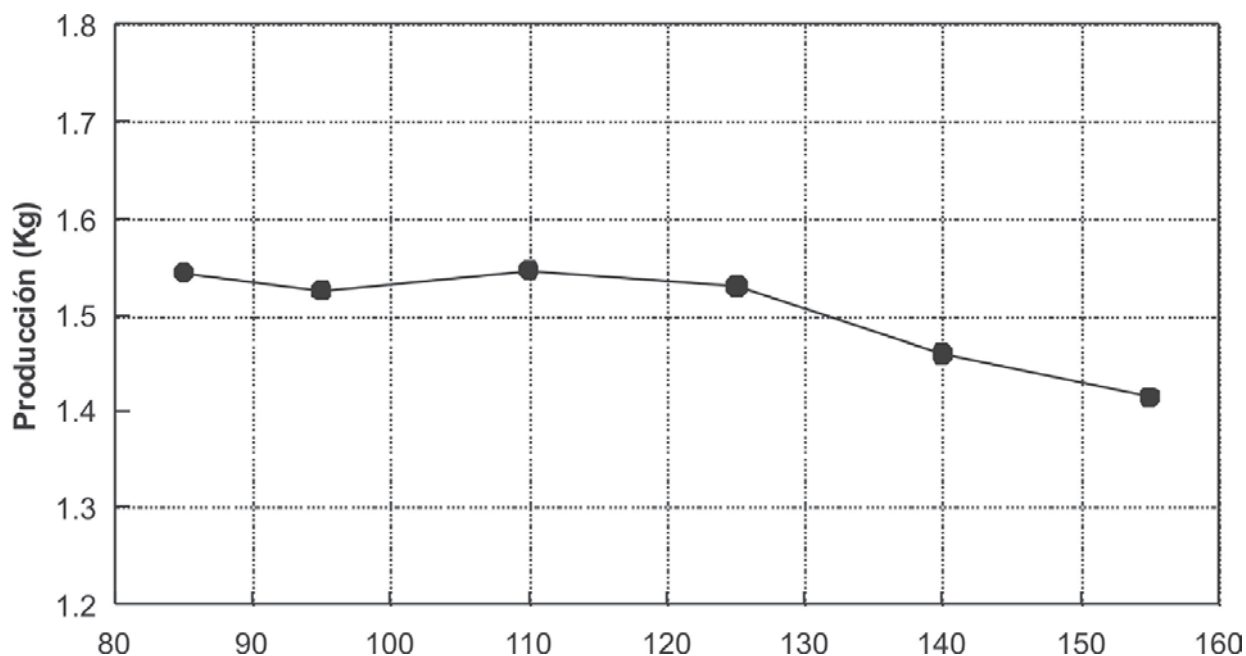


Fig. 6. Producción acumulada para las distintas diferencias de temperatura como función de la distancia d .

Resulta imprescindible el visualizar en el interior del destilador para diferentes distancias y diferencias de temperatura para tener más elementos de juicio y por tanto tener un mejor entendimiento del fenómeno.

Se desarrollaron diversos experimentos para visualizar el movimiento del fluido en el interior del destilador solar de laboratorio para caracterizar el flujo.

En la fig. 7 se muestra la naturaleza del movimiento del fluido en el interior del destilador. Los seis diferentes patrones de flujo corresponden a distintas condiciones los cuales se escogieron de entre más de 500 imágenes para mostrar la diversidad de las formas.

Como puede observarse se forman celdas de convección de eje horizontal tipo vórtice, los cuales transportan fundamentalmente en la parte periférica el fluido del evaporador al condensador.

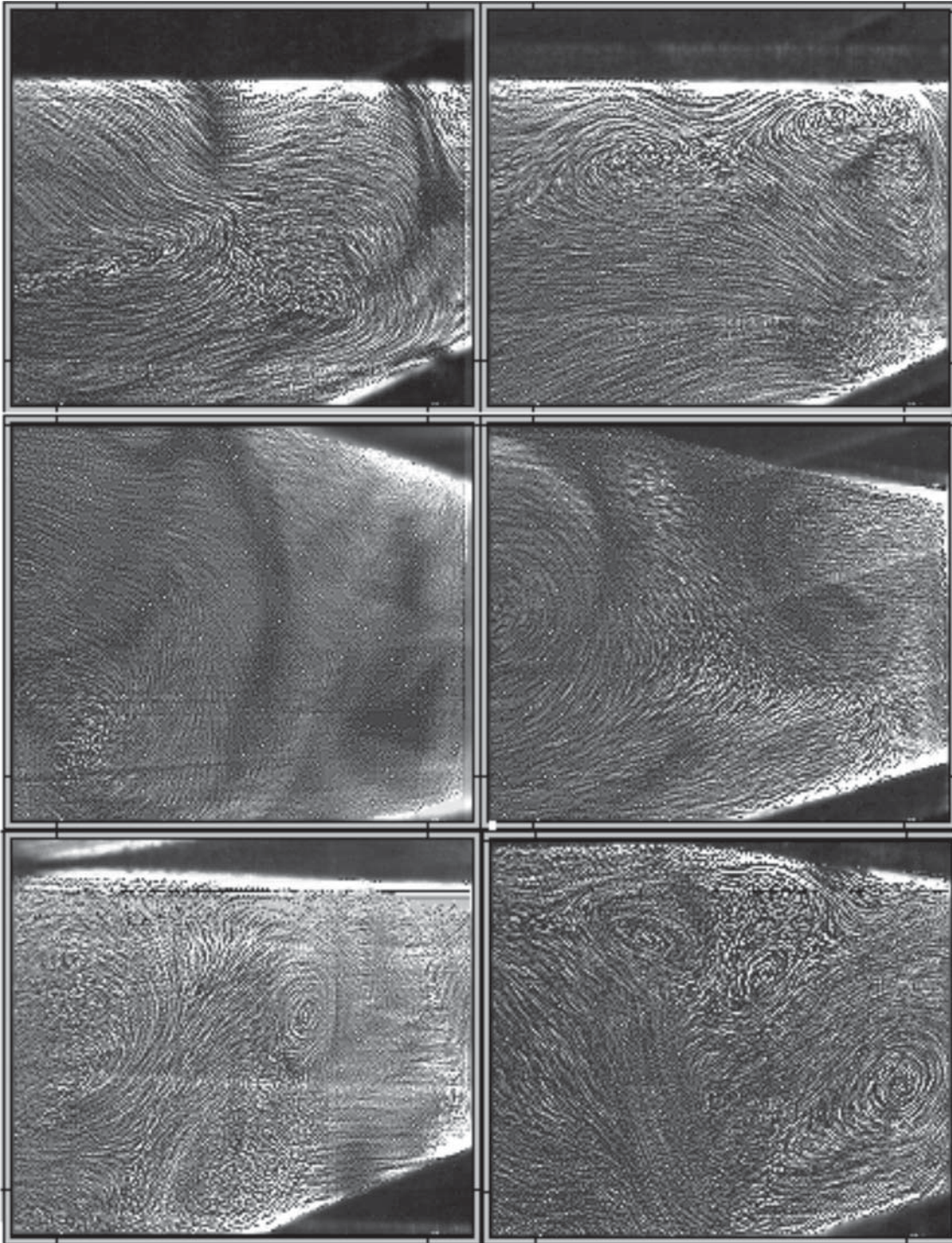


Figura 7. Naturaleza del fluido en el interior del destilador de laboratorio.

Se diseñó un experimento para verificar cuál es el cambio en la actividad de los vórtices bajo las condiciones extremas y comparar las principales diferencias estructurales que se pueden establecer en las celdas del destilador de laboratorio. La fig. 8 muestra cuatro condiciones extremas: la menor y mayor distancia d (8.5 y 15.5×10^{-2} m) con la menor y mayor diferencia de temperaturas (4.1 y 16.9°C). Estas cuatro imágenes digitales fueron escogidas de un conjunto de más de 200, y son las más representativas.

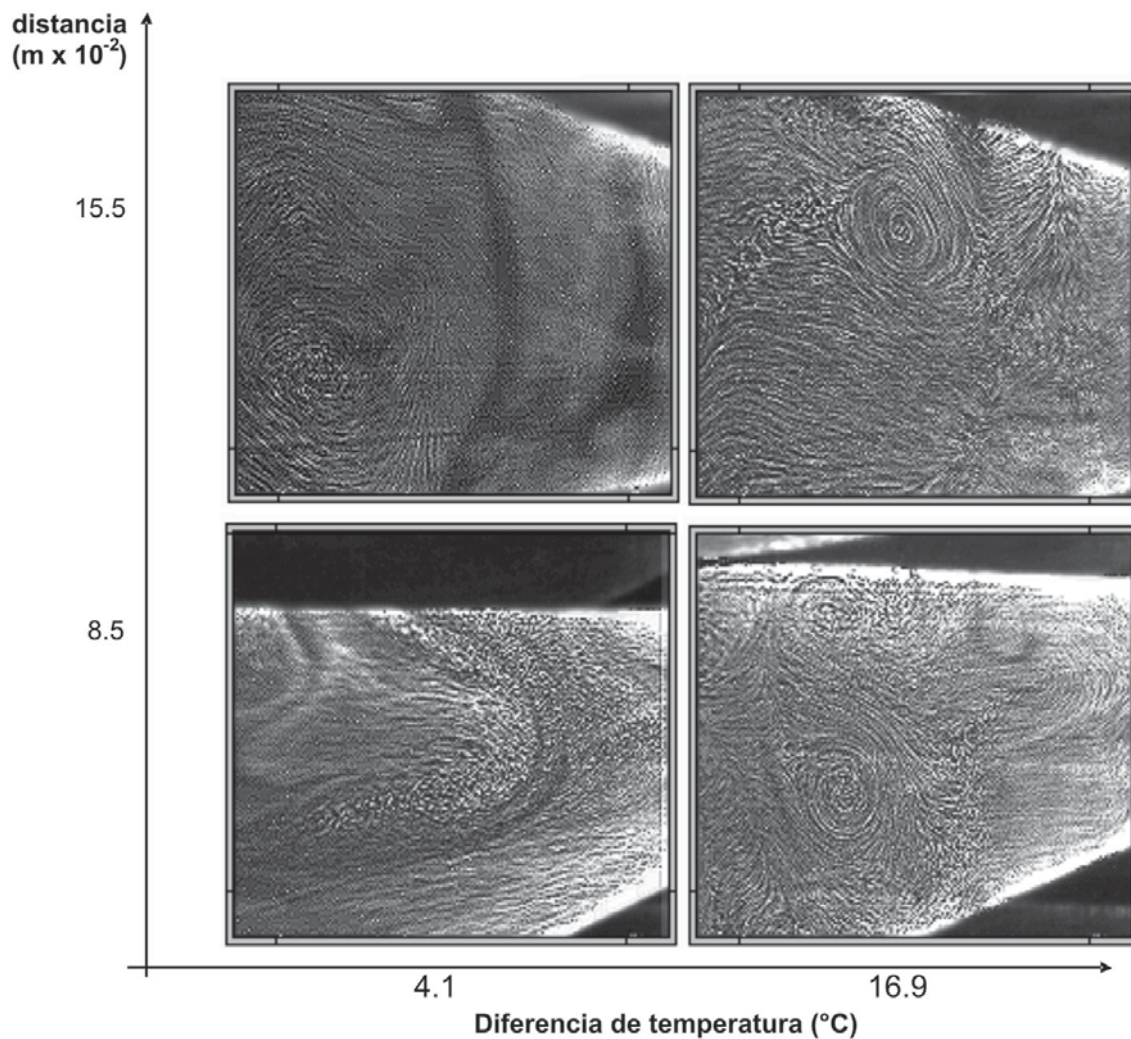


Figura 8. Cuatro patrones de flujo bajo condiciones extremas de operación en el destilador experimental de laboratorio.

Para la diferencia de 4.1°C y la distancia $d = 8.5 \times 10^{-2}$ m la actividad de los vórtices no está bien desarrollada y el movimiento del fluido se aprecia como *plumas*; para la misma distancia pero a la máxima diferencia de temperaturas de 16.9°C la actividad de los vórtices es máxima, la rapidez del movimiento es la mayor observada durante el experimento. Para la distancia máxima de 15.5×10^{-2} m y una diferencia de temperaturas de 4.1°C parece que esta geometría permite más la formación de vórtices pero muy inestables. Hacia la parte

media superior de la imagen, se observa una pequeña franja vertical de color negro la cual es producida por la ausencia de humo que se depositó por debajo de la cubierta junto con el agua condensada. Para la misma distancia pero con una diferencia de temperaturas de 16.9°C se aprecia un vórtice muy grande y bastante estable, probablemente debido a la máxima relación de aspecto de la cavidad de destilación.

Con objeto de medir la velocidad del fluido en la sección extrema izquierda del destilador donde los vórtices son más estables, como función de la diferencia de temperaturas entre salmuera-cubierta y para distintas distancias d , se analizaron más de 20 imágenes en tiempo real, registradas en la videocámara analógica para diversas combinaciones de estas dos variables, los resultados se muestran en la fig. 9.

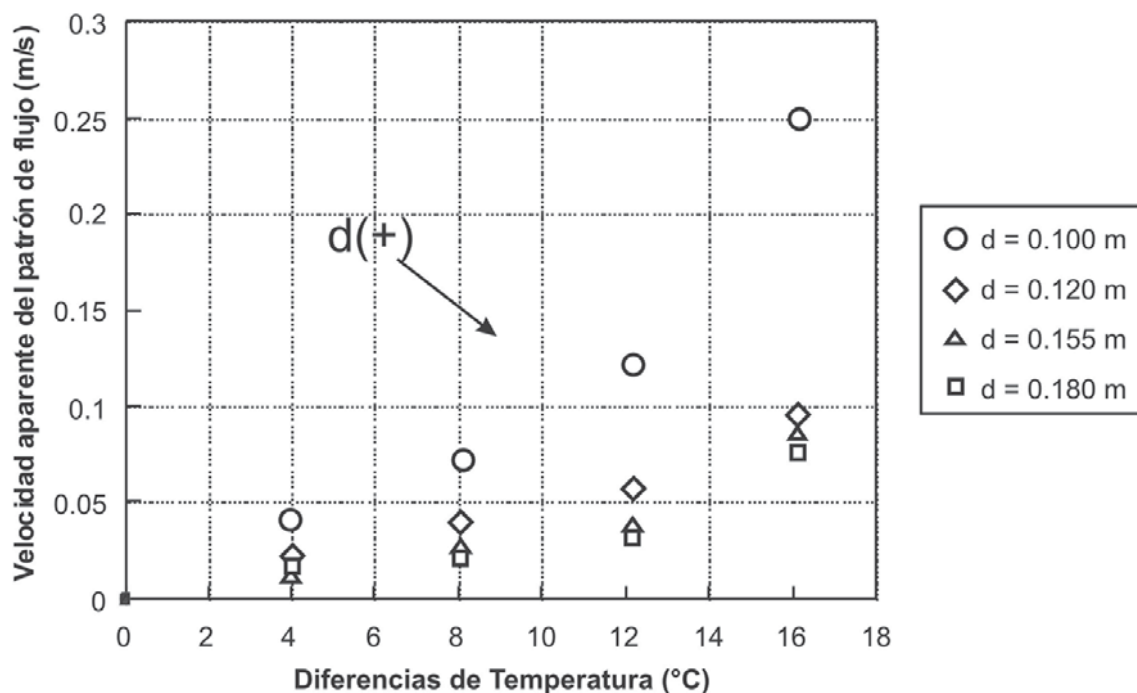


Figura 9. Velocidad del fluido para diferentes condiciones de operación.

Los valores presentados en la fig. 9 son los promedios de las distintas mediciones. Como se ve, la velocidad del fluido es inversamente proporcional a la distancia, *i.e.*, para una menor distancia d se tienen las mayores velocidades. También es importante observar que la velocidad del fluido se incrementa mientras mayor es la diferencia de temperaturas. Además, la gráfica es cóncava hacia arriba.

Otro parámetro que pudo estimarse es la velocidad de desplazamiento de los vórtices con base en imágenes consecutivas, las cuales están espaciadas en lapsos iguales debido a que la información de cada imagen ocupa el mismo espacio en la memoria de la computadora.

Se desarrolló un procedimiento computacional para medir la velocidad de desplazamiento de los vórtices (Porta *et al.* 1996) con base en las imágenes digitales.

En la fig. 10 se muestran tres imágenes en las cuales se mide la velocidad de desplazamiento. En los experimentos se advirtió que estas velocidades también dependen fuertemente de la diferencia de temperaturas entre la salmuera y la cubierta, así que de alguna manera esto determina el *nivel* de actividad en el interior del sistema. Se han medido velocidades relativamente bajas de 2×10^{-2} m/s para diferencias de temperatura de 4°C , hasta velocidades de alrededor de 9×10^{-2} m/s para diferencias de temperatura de 17°C

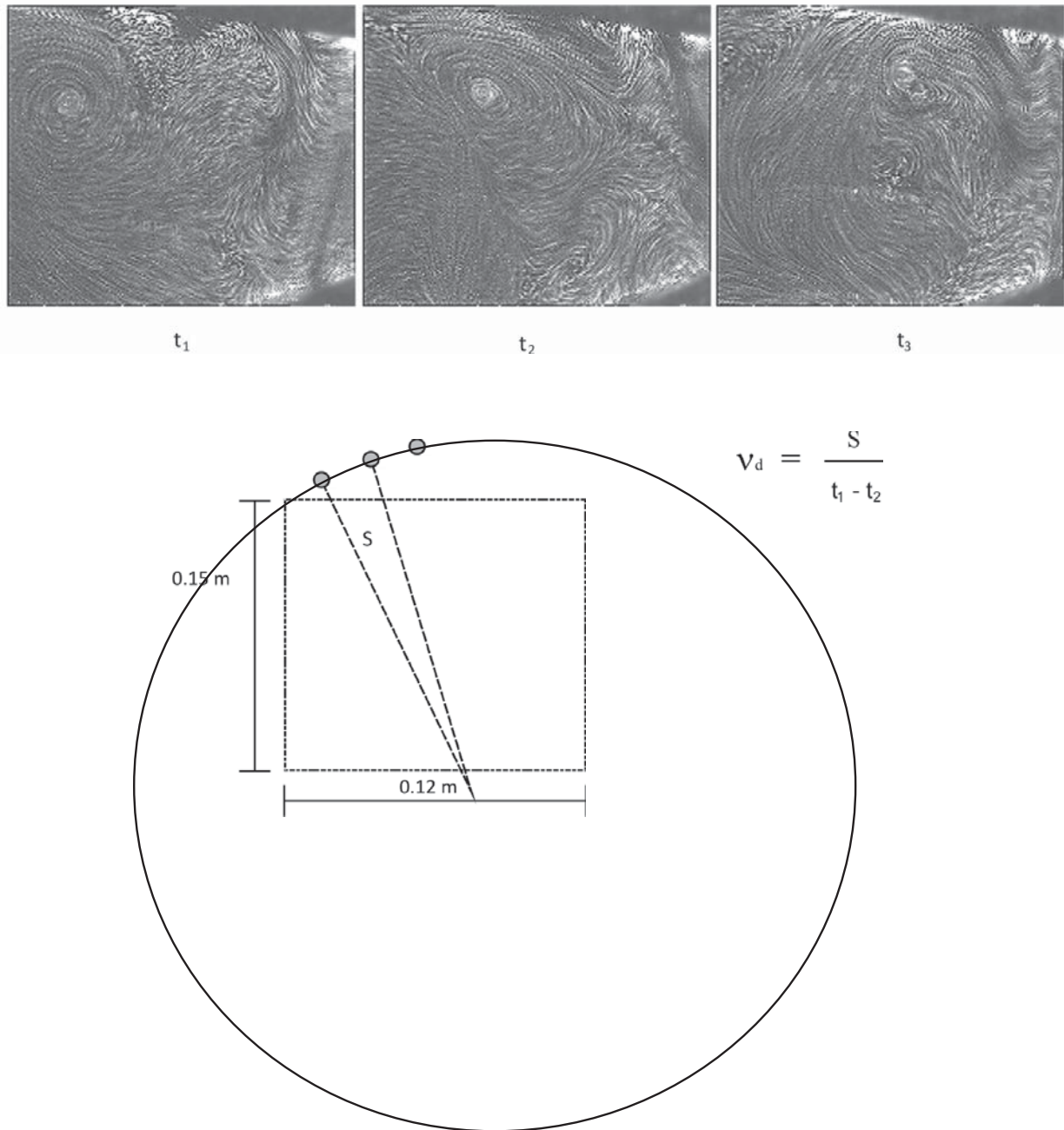


Figura 10. Imágenes consecutivas para la medición del desplazamiento del vórtice.

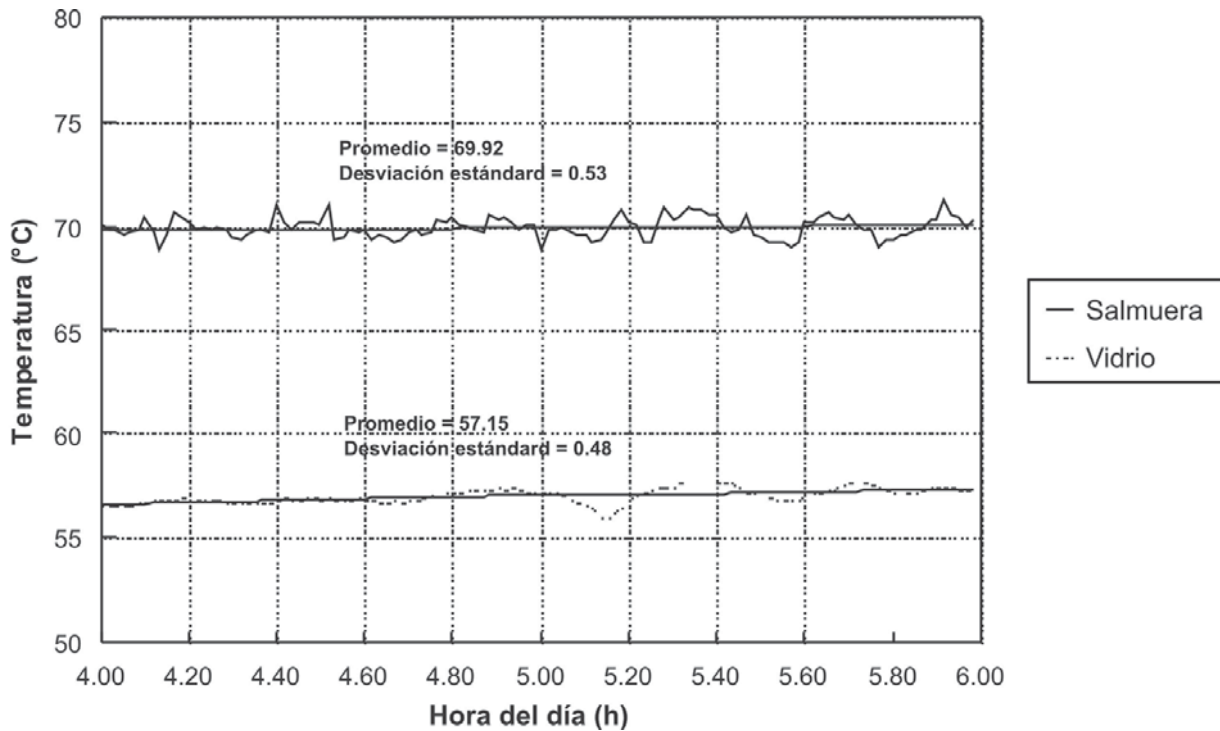


Figura 11. Temperaturas de la salmuera y la cubierta para el destilador de laboratorio.

Para medir de manera experimental el coeficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y la cubierta U_{wg} , se diseñó un experimento con el destilador de laboratorio, para 17 combinaciones de diferencias de temperatura entre salmuera-cubierta, y diferentes temperaturas de salmuera.

La fig. 11 muestra un caso de la calidad del control que se estableció para mantener las temperaturas constantes durante los periodos de experimentación que se dieron a lo largo de dos horas. Como puede observarse, existe una desviación alrededor del nivel seleccionado de temperatura de la salmuera de 70°C, el promedio es de 69.92°C con una desviación estándar de 0.53°C, mientras que para la temperatura del vidrio, la temperatura seleccionada estuvo en 57°C con un promedio de 57.15°C y una desviación estándar de 0.48°C, lo cual es bastante aceptable, dada la complejidad de los fenómenos reales.

A través de la medición de la producción de agua destilada en el intervalo de dos horas y la entalpía de evaporación a la temperatura de la salmuera (T_w), se puede estimar el flujo de calor. La fig. 12a muestra el resultado de este experimento. Se ajustaron rectas para cada temperatura de salmuera, con lo cual para conocer el coeficiente U_{wg} basta dividir el flujo de calor entre la diferencia de temperaturas, tal como se muestra en la fig. 12b. Como puede observarse, este coeficiente depende tanto de la diferencia de temperaturas como de la temperatura de la salmuera.

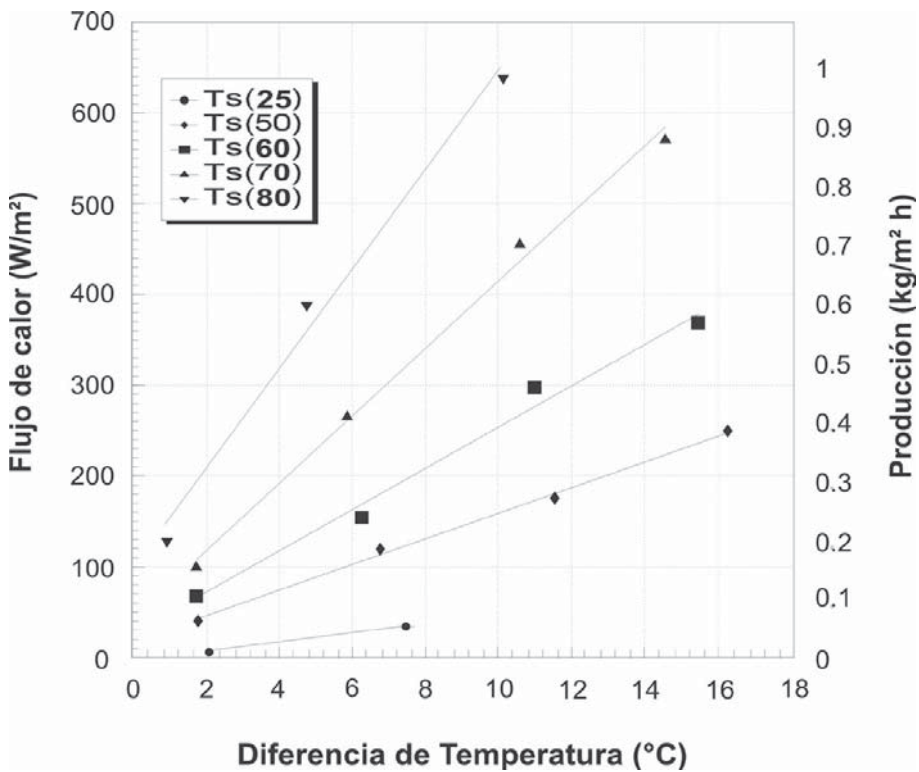


Figura 12a. Gráfico para la estimación del coeficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y el vidrio.

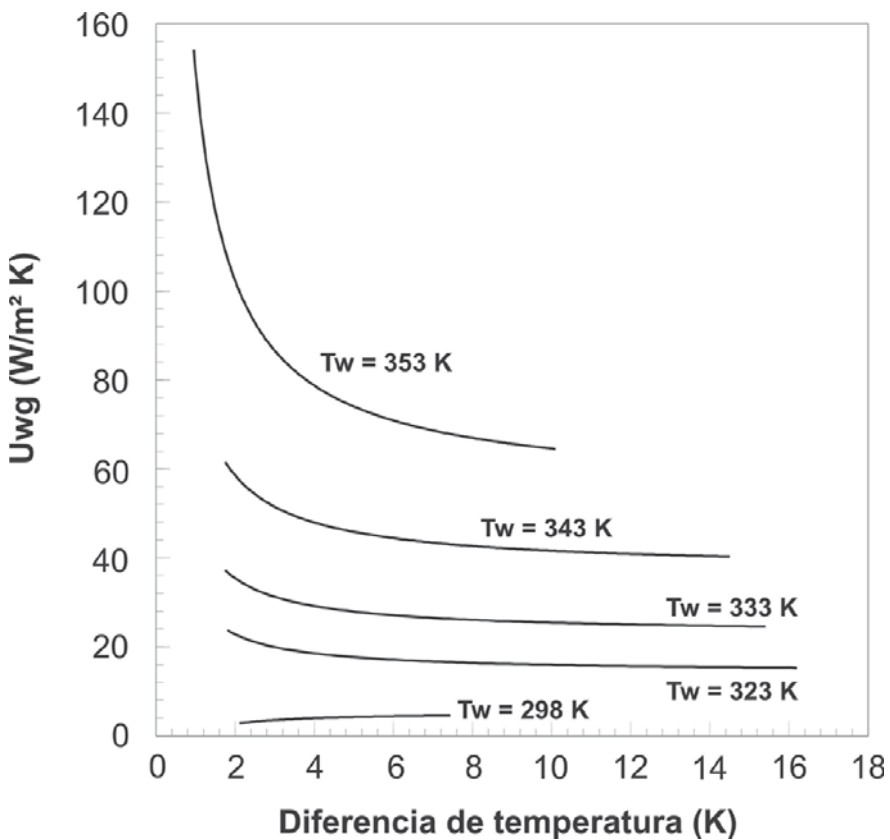


Figura 12b. Gráfico del coeficiente U_{wg} respecto a la diferencia de temperatura.

Para evaluar el coeficiente global de transferencia de calor entre el vidrio y el ambiente , se desarrollaron una gran diversidad de experimentos. En los resultados se muestra una selección de 4 días. La fig. 13 muestra cuatro días de radiación solar en los cuales se puede observar prácticamente ausencia de nubosidad, lo cual resulta ideal para la evaluación experimental de este coeficiente.

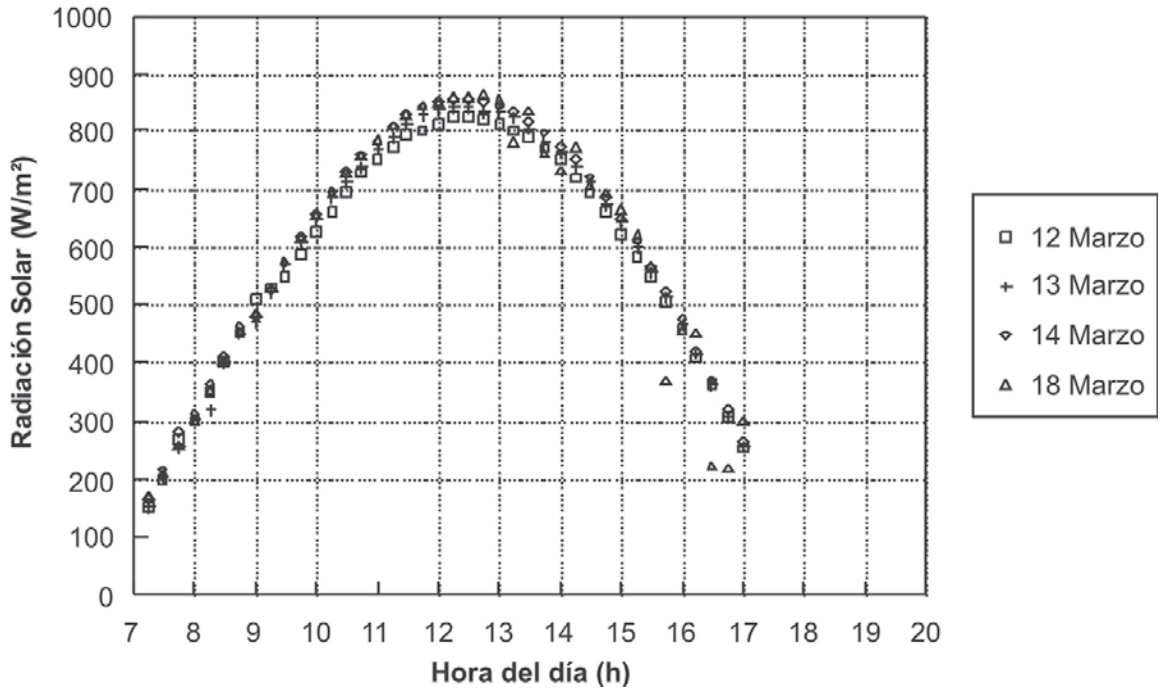


Figura 13. Radiación solar a lo largo del día para cuatro días de experimentación en campo.

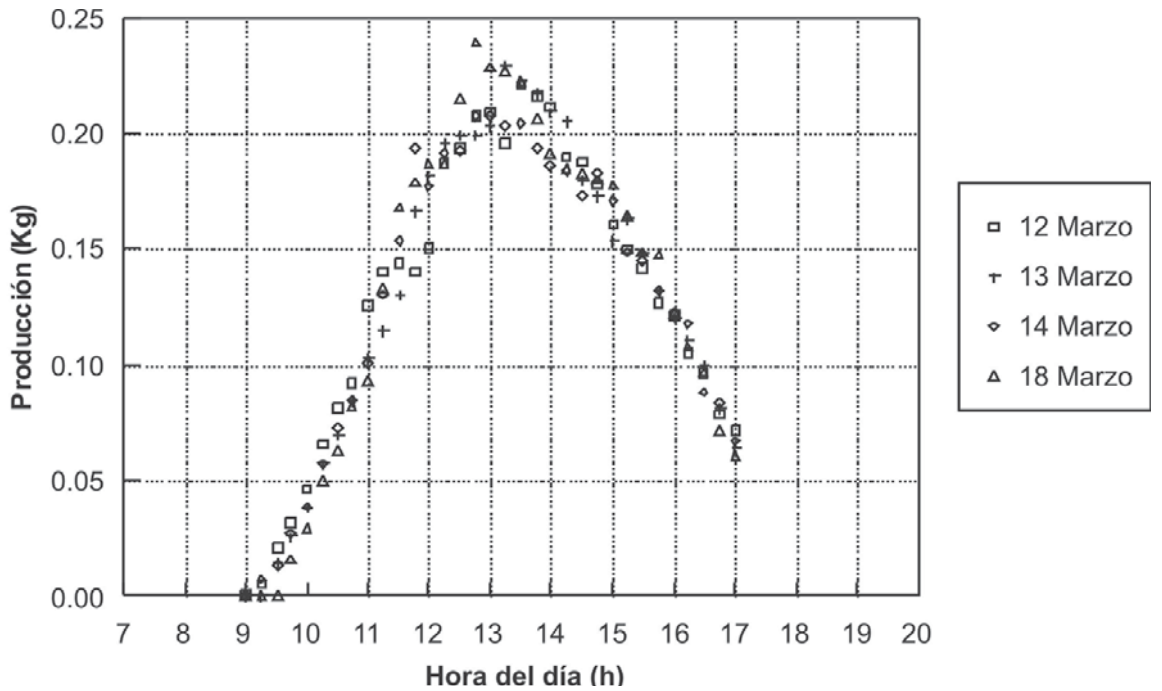


Figura 14. Producción de agua destilada como función del tiempo.

La producción de agua destilada se midió en intervalos de 0.25 h para los diferentes días, la fig. 14 muestra los resultados.

En los días seleccionados, se tienen velocidades de viento hasta de 6.3 m/s, como puede apreciarse en la fig. 15, lo que permite evaluar este coeficiente en un rango muy amplio de operación para condiciones típicas de playa, en donde normalmente se tiene un viento con sentido dominante de mar a tierra durante el día.

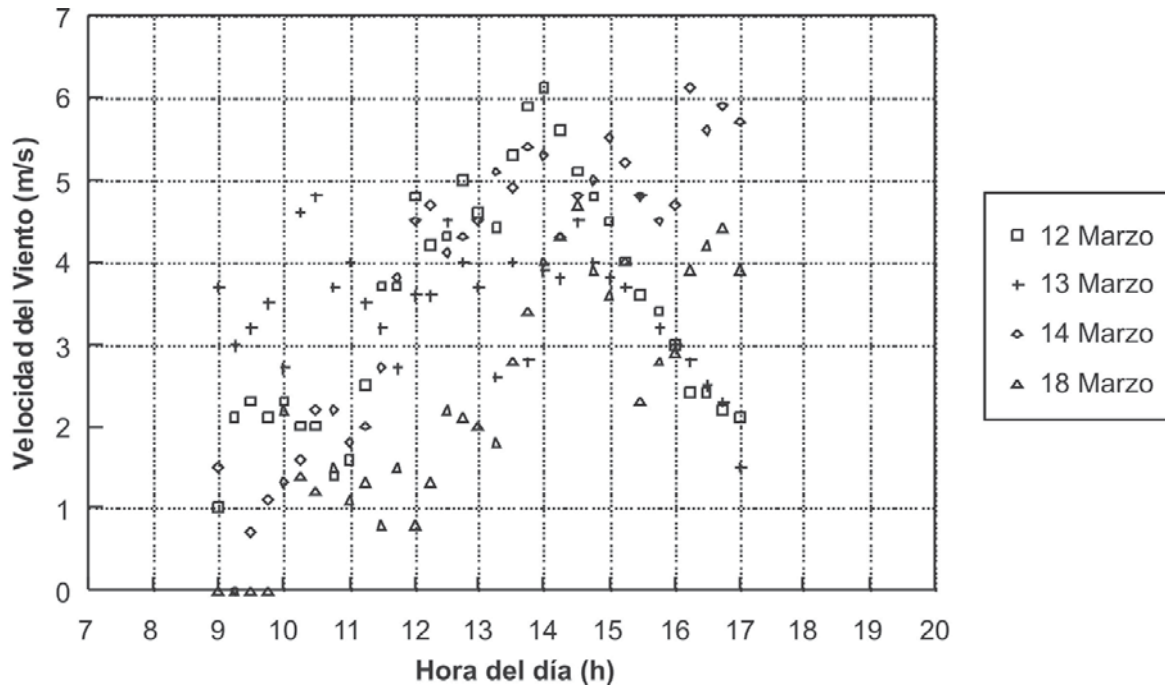


Figura 15. Velocidad del viento a lo largo del día para cuatro días de experimentación en campo.

La fig. 16 muestra las diferencias de temperatura de la cubierta y del ambiente para los cuatro días de experimentación.

Al medir el flujo másico del agua destilada producida en intervalos de 0.25 h y al multiplicar por la entalpía de evaporación a la temperatura de la cubierta (T_g) se estima el flujo de calor. Con éste se determina el coeficiente, al dividir entre la diferencia de temperaturas de la cubierta al ambiente. Ya que se tienen mediciones de viento para cada intervalo, entonces se puede establecer el valor del coeficiente como función de la velocidad media de viento. La fig. 17 muestra este resultado.

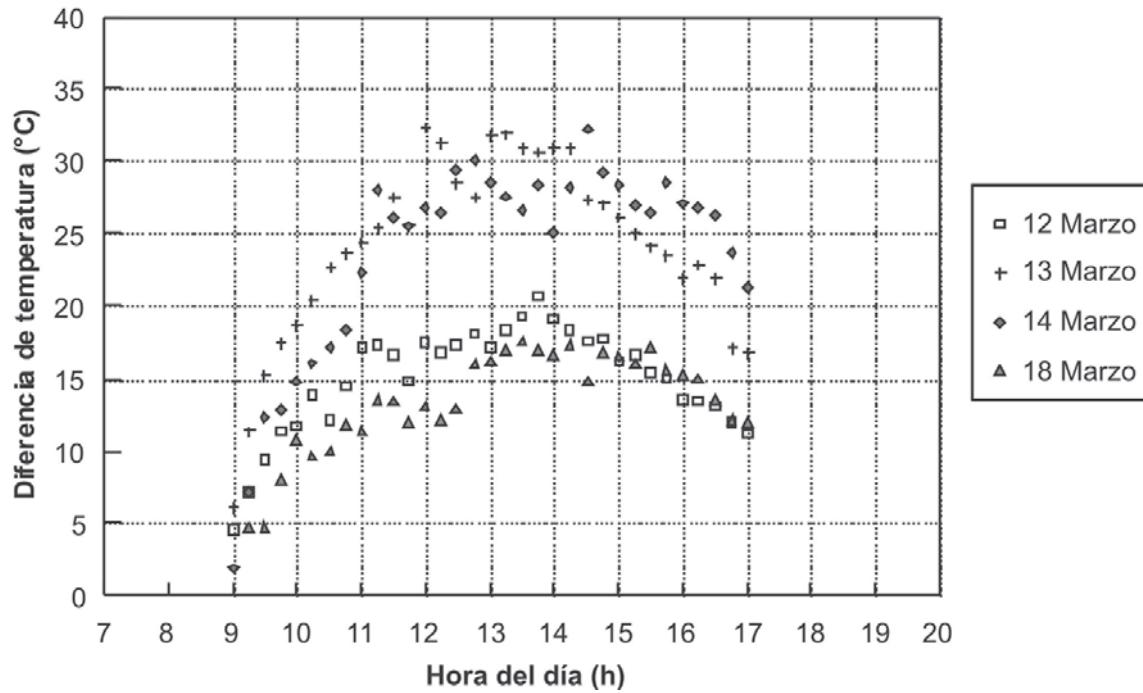


Figura 16. Diferencias de temperatura de la cubierta y del ambiente para el periodo de experimentación.

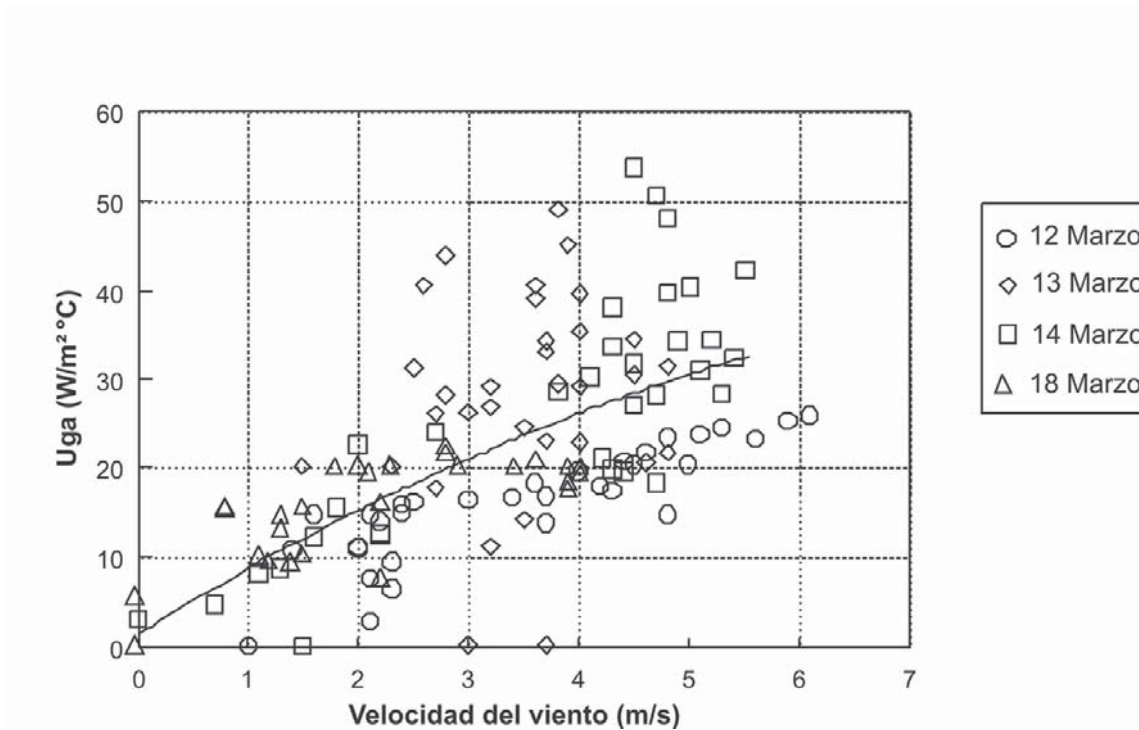


Figura 17. Coeficiente global de transferencia de calor entre la cubierta y el ambiente.