

MODELIZACIÓN TÉRMICA DE ESTANQUES PARA PRODUCCIÓN DE LA MICROALGA ESPIRULINA (ARTHROSPIRA PLATENSIS).

M. Medina^{1,2}, A. Gastón^{1,2}, R. Abalone^{1,3}, M. A. Lara^{1,3}

¹-Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. (UNR).

²-Consejo de Investigaciones. (UNR)

³-Instituto de Física Rosario –IFIR- (CONICET- UNR).

e-mail. mmedina@fceia.unr.edu.ar / analiag@fceia.unr.edu.ar / rabalone@fceia.unr.edu.ar / malara@fceia.unr.edu.ar /
 Av. Pellegrini 250, (2000) Rosario. Argentina.

RESUMEN: La espirulina (*Arthrospira platensis*) es una cianobacteria, rica en micronutrientes fácilmente asimilables por el organismo humano. El intervalo de mayor producción de esta microalga se sitúa entre los 35 y 40 °C, obteniéndose producciones aceptables con 20 °C en el agua. En este trabajo se modelizó el proceso de transferencia de calor en un estanque, con una cubierta tipo invernadero, considerando las condiciones climáticas más severas. Se evaluaron las pérdidas por conducción a través de la base, convección y radiación por la superficie en forma global. Con una aislación con poliestireno expandido en la base se logra un aumento de la temperatura media del 24%. Si se utiliza una manta aislante nocturna en la superficie del estanque, el aumento es del orden de 15% y el efecto conjunto da un aumento considerable de la temperatura media del orden de 45%, lo que haría más productivo el estanque.

Palabras clave: Espirulina, estanque de producción, transferencia de calor, simulación numérica.

INTRODUCCIÓN

La espirulina es una microalga (0.3 mm de largo), de tres millones de años de antigüedad, cuyo nombre científico es cianobacteria *Arthrospira platensis*, que vive de la fotosíntesis como las plantas y prospera naturalmente en los lagos salados y alcalinos de las regiones cálidas. Ha sido el alimento tradicional de los aztecas y de los Kanembous de Tchad. Es más rica en proteínas que la carne y actualmente es cultivada en grandes establecimientos en Estados Unidos, India, China y Tailandia. En la naturaleza, la espirulina sólo necesita para vivir una cavidad arcillosa que retenga agua salina y alcalina, en un clima cálido, y con algunos desechos animales. Se presenta en forma de filamentos espiralados (ver Figura 1) constituidos por células yuxtapuestas, la reproducción es asexual y se hace por división de filamentos.

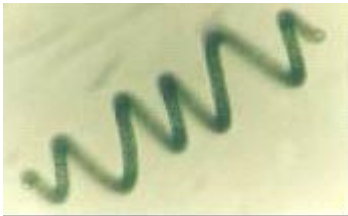


Figura 1: Imagen microscópica de la espirulina (Jourdan, 1999).

La espirulina es extraordinariamente rica en micro nutrientes fácilmente asimilables por el organismo humano, ya que carece de pared celular. Es rica en beta-caroteno (a partir del cual se forma la vitamina A), en hierro, en vitamina B12, en ácido gammalinolénico, en ácidos grasos esenciales y en otros micro nutrientes indispensables. Los ensayos clínicos realizados han demostrado que la ingestión diaria de entre 1 y 3 gramos de espirulina, durante 4 a 6 semanas, es suficiente para complementar eficazmente las comidas de los niños entre los 0 y los 5 años de edad y sacarlos de la desnutrición (Falquet, 1996).

Por lo anteriormente dicho, el cultivo de estas cianobacterias es importante desde el punto de vista económico y social. En Argentina, en la provincia de Santa Fe, se ha comenzado a cultivarlas desde los años noventa. Crecen en estanques de poca profundidad, donde se les provee un conjunto de sales de las cuales se alimenta. Se separan del medio de cultivo por filtración, y luego son secadas como única forma de garantizar la conservación de sus propiedades en el tiempo. Se considera como producción óptima 10 gr/m² día, en promedio.

La producción industrial requiere el control en los estanques de los parámetros temperatura, radiación solar, agitación, basicidad y salinidad (Zarrouk C., 1966). La experiencia muestra que la temperatura parece ser uno de los más importantes factores para aumentar la velocidad de crecimiento. El intervalo de mayor productividad se sitúa entre los 35 y 40 grados centígrados, obteniéndose producciones aceptables (todavía económicamente rentables) con 20 grados centígrados de temperatura en el agua.

Es deseable mantener la temperatura del agua de los estanques dentro de este rango, especialmente durante la estación fría. Las dimensiones de los estanques son de varias decenas de metros de largo por 4 o 5 metros de ancho, con una profundidad media de 15 cm, y se encuentran al aire libre, protegidos por una cubierta tipo invernadero. El volumen de agua implicado descarta la utilización de energías convencionales por su costo, por lo que es imprescindible minimizar las pérdidas de la energía solar captada.

El objetivo de este trabajo es cuantificar las pérdidas debidas a diferentes condiciones de aislación en los estanques para utilizar esta información en el diseño de futuros estanques. Para ello se plantea un modelo numérico simplificado que permite

analizar diferentes materiales para la base (arena o poliestireno expandido) y la influencia del uso de una manta aislante colocada sobre el estanque durante las horas de la noche para disminuir las pérdidas por convección y radiación. Se presenta la simulación de un estanque tipo operando bajo varios ciclos diarios. En particular se consideraron las condiciones climáticas más severas, el día de menor irradiación (21 de junio) junto con las temperaturas del día más frío del año 2000 de la zona aledaña a Rosario, Santa Fe.

MODELIZACION TERMICA DE LOS ESTANQUES

Se modeliza un estanque en producción de espirulina, de 10.80 m de largo por 4.80 m de ancho. La profundidad del agua es de 15 cm. Fue construido sobre una cama de arena de 0.03 m que reposa sobre una losa de hormigón de 0.10 m. Tiene una cubierta tipo invernadero a dos aguas de polietileno LDT de 150 μ m de espesor con una altura máxima de 1.15 m en la parte central (ver Figura 2).

Dadas las dimensiones del estanque, el área lateral representa menos del 10 % del área del fondo y la transferencia de calor se realiza mayormente en sentido vertical. Por este motivo, el cálculo térmico se puede aproximar a un problema de transferencia de calor unidimensional transitorio. La Figura 3 muestra una sección transversal del estanque indicando la distribución de las distintas capas de material que conforman el sistema (agua – arena – hormigón – suelo). Las propiedades de estos materiales se indican en la Tabla 1. El balance entre la energía solar captada por la superficie de agua y las pérdidas que sufre por dicha superficie al medio ambiente y por conducción a la base, gobierna la evolución de la temperatura del estanque.



Figura 2: Foto del estanque.

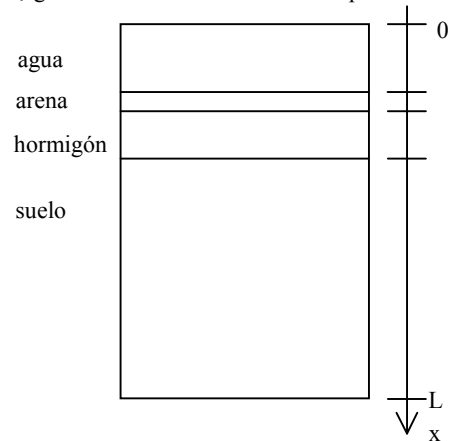


Figura 3: Corte transversal del estanque (dominio de cálculo)

La transferencia de calor en el estanque, si el mecanismo predominante de transferencia es por conducción (Incropera y De Witt, 1990), es

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla T \quad 0 < x < L \quad (1)$$

En la superficie del agua, se consideró una pérdida de energía global estimándose un coeficiente que incluye tanto la pérdida por convección como por radiación entre la superficie y la cubierta y entre la cubierta y el medio ambiente:

$$q_{\text{pérdidas}} = h_{\text{total}} (T_s - T_{\text{amb}}) \quad \text{en } x = 0 \quad (2)$$

Entonces la condición de contorno correspondiente es

$$q_{\text{neto}} = S - q_{\text{pérdidas}} \quad \text{en } x = 0 \quad (3)$$

siendo S la irradiancia solar absorbida por la superficie del agua.

El medio en estudio se extendió hasta una profundidad L de forma tal que la temperatura en esa posición pueda suponerse constante:

$$T_L = 12 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{en } x = L \quad (4)$$

La resolución numérica se efectuó por el método de los elementos finitos, utilizando el software ALGOR, 2001 Ver 13.06.

Estimación del coeficiente global h_{total}

En la Figura 4 se muestra el circuito eléctrico equivalente para modelizar el intercambio de calor entre la superficie del agua y la cubierta y entre la cubierta y el medio ambiente (Daguenet, 1985).

Material	k (W/ m°C)	ρ (Kg/m ³)	c_p (J/Kg °C)
Suelo	0.52	2050	1840
Hormigón	1.4	2100	880
Arena	0.27	1515	800
Agua	0.611	996	4178
Aire	0.0267	1.177	1005
Poliestireno expandido	0.027	55	1210

Tabla 1. Propiedades térmicas de los materiales

La irradiancia solar absorbida por la superficie del agua, S es:

$$S = (\tau\alpha) G \quad (5)$$

donde $\tau = 0.8$ y $\alpha = 0.75$.

La irradiancia solar global normal en la superficie de la Tierra G se calculó en base al modelo C (Iqbal, 1983) de transferencia radiativa de la atmósfera, utilizando parámetros atmosféricos estándares para la zona. Debido a la alta concentración de las algas de color verde oscuro en los primeros centímetros del estanque, se consideró que la radiación incidente es totalmente absorbida en la superficie.

Resistencias entre la superficie del agua y la cubierta de polietileno

El intercambio de energía por radiación entre dos superficies grises de igual área es linealizado para obtener la siguiente expresión ($\epsilon_s = 0.8$ y $\epsilon_p = 0.5$):

$$q_{r,s-p} = \frac{\sigma(T_s^4 - T_p^4)}{\frac{1}{\epsilon_s} + \frac{1}{\epsilon_p} - 1} = h_{r,s-p}(T_s - T_p) \quad (6)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección se calculó con la relación (Mills, 1995)

$$N_{ul} = 0.14 R_{al}^{1/3} \quad 2 \cdot 10^7 \leq R_{al} \leq 3 \cdot 10^{10} \quad (7)$$

Resistencias entre la cubierta de polietileno y el medio ambiente

El intercambio de energía por radiación entre la cubierta y el medio ambiente es linealizado y referido a la temperatura ambiente para obtener la siguiente expresión ($\epsilon_c = 0.65$):

$$q_{r,p-amb} = \epsilon_c \sigma(T_p^4 - T_c^4) = h_{r,p-amb}(T_p - T_{amb}) \quad (8)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección debido al efecto del viento se estimó en $h_{conv, p-amb} = 10 \text{ W/ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (Duffie y Beckman, 1980).

RESULTADOS OBTENIDOS

Se simularon varios ciclos diarios para las mismas condiciones climáticas. Se consideró la radiación solar incidente correspondiente al día 21 de junio (menor radiación anual) y la variación diaria de temperatura ambiente del día mas frío del año 2000. Los coeficientes de transferencia de calor, por convección y radiación, que dependen de las temperaturas, fueron evaluados en forma promedio. Se trabajó en la simulación numérica con dos valores globales (h_{total}) constantes, 2.5 y 5 W / m² °C.

Se obtuvo la evolución de la temperatura para diferentes configuraciones de materiales en el piso y diferentes condiciones de aislamiento de la superficie del estanque como se detalla a continuación:

1. Configuración del piso original, indicada en la figura 3, pérdidas por convección y radiación.
2. Configuración del piso original, pérdidas nocturnas disminuidas en un 50% respecto de la configuración 1.
3. Configuración del piso original, aislamiento perfecto durante la noche.
4. La capa de arena es reemplazada por una capa de poliestireno expandido, pérdidas por convección y radiación.

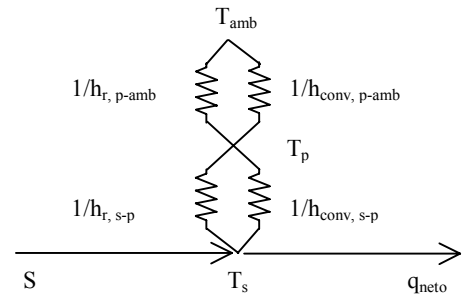


Figura 4: Circuito eléctrico equivalente

5. La capa de arena es reemplazada por una de poliestireno expandido, pérdidas nocturnas disminuidas en un 50%.
6. La capa de arena es reemplazada por una capa de poliestireno expandido, aislamiento perfecto durante la noche.
7. La capa de hormigón es reemplazada por tierra seca, pérdidas por convección y radiación.
8. La capa de hormigón es reemplazada por tierra húmeda, pérdidas por convección y radiación.

Para realizar la simulación correspondiente a la configuración del piso original (Caso 1) se partió de una dada distribución inicial de temperatura de referencia y se observó que a partir del tercer ciclo se alcanza una estabilidad dinámica de la temperatura media del agua del estanque. Las variaciones respecto de esta configuración original se analizaron tomando la distribución de temperatura correspondiente al final del tercer ciclo como distribución inicial (ver Figura 5).

En la Figura 6 se grafica la temperatura media del agua para los casos 1, 2 y 3. Se observa que en el caso 1 la temperatura media oscila siempre por debajo de los 20 °C.

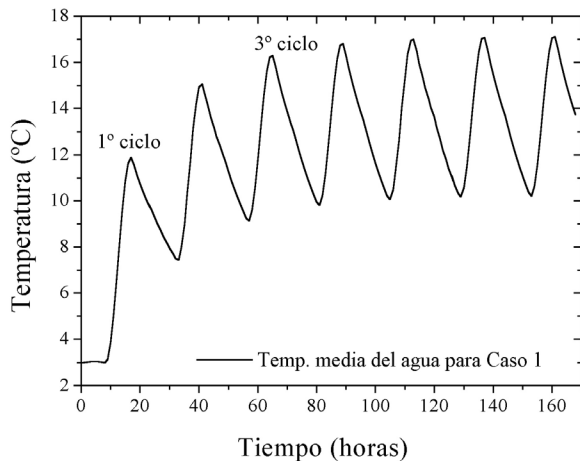


Figura 5: Evolución de la temperatura media del agua para varios ciclos consecutivos para el Caso 1.

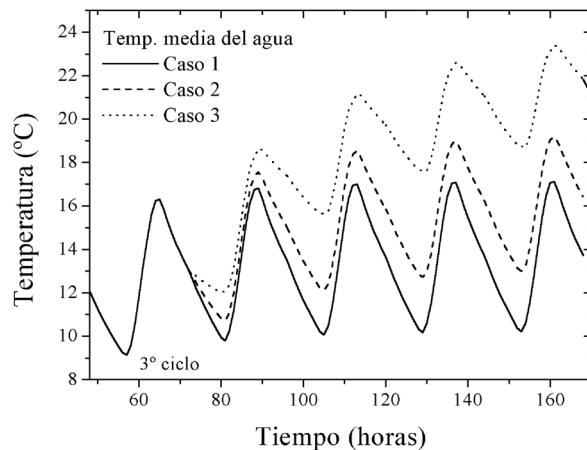


Figura 6: Comparación de la evolución de la temperatura media del agua para los Casos 1, 2 y 3.

Si se reducen las pérdidas nocturnas por convección y radiación en un 50% (el coeficiente de transferencia global se reduce de 5 a 2.5 W/m² °C), se observa una ganancia del orden de dos grados en la temperatura media. Esta reducción se puede lograr mediante la colocación de una manta aislante sobre la superficie del agua. Con la anulación total de las pérdidas nocturnas por convección y radiación se logran temperaturas medias siempre aptas para la producción.

En la Figura 7 se grafica la temperatura media del agua para el caso 1, 4, 5 y 6. Se observa que en el caso 4 la colocación de la capa de poliestireno expandido permite una ganancia del orden de 3 grados en la temperatura media del agua. La reducción en un 50% de las pérdidas nocturnas mejora considerablemente las condiciones de trabajo disminuyendo la amplitud de oscilación de la temperatura media durante el día. A modo ilustrativo, se consideró la supresión total de las pérdidas por la superficie, observándose un continuo incremento de la temperatura, ya que la energía acumulada en cada ciclo es mayor que la perdida por conducción.

En la Figura 8 se muestran las temperaturas en la superficie y el fondo del estanque para las tres condiciones de aislación nocturna (Caso 1, 2 y 3). Se produce un importante gradiente de temperatura, de forma tal que en una capa de agua de aproximadamente 3 cm la temperatura es superior a 20 °C durante las horas de máxima radiación. Esto permite una producción de espirulina durante ese período en la superficie, a pesar de que la temperatura media es menor que la temperatura de producción.

La aparición de un campo de temperatura inestable entre 0 y 10 horas depende del valor del coeficiente de transferencia de calor global superficial. Cuando se reducen las pérdidas nocturnas desaparece la inestabilidad, con lo cual la hipótesis de modelo conductivo para modelizar la temperatura en el estanque es válida.

Un forma alternativa para modelizar la evolución de la temperatura del estanque es suponer que debido a las corrientes convectivas el agua tiene una temperatura uniforme. Los resultados de aplicar este modelo en el caso 1, se observan en la Figura 9 en la cual se compara la temperatura del agua obtenida con el modelo de temperatura uniforme y la media obtenida con el modelo conductivo. La diferencia entre los valores calculados entre las 0 y 10 horas, en el cual el modelo conductivo tiene un campo de temperatura inestable es inferior al 3%. En el período diurno esta diferencia aumenta como máximo a un 6%. No obstante, suponer una temperatura uniforme en el agua no brinda información sobre los gradientes de temperatura diurnos que se desarrollan en el estanque por la radiación absorbida a nivel superficial, y que son un dato de interés para este problema. También fueron comparados los resultados de temperatura en los diferentes casos, obteniéndose menores diferencias entre las temperaturas de cada modelo.

Los resultados del caso 4 correspondientes al uso del poliestireno expandido como aislante (con una conductividad un orden menor a la de la arena), indican que los gradientes de temperatura en el período diurno se reducen en un 14 %. (ver Figura 10). Nuevamente la aparición de un campo de temperatura inestable depende del valor del coeficiente de transferencia global.

Además se analizó la modificación de las pérdidas por conducción al cambiar la capa de hormigón por tierra seca (Caso 7) y tierra húmeda (Caso 8). Estas modificaciones no producen cambios importantes en las resistencias conductivas y las gráficas de temperaturas medias no presentan variaciones significativas respecto del caso 1 como se aprecia en la Figura 11.

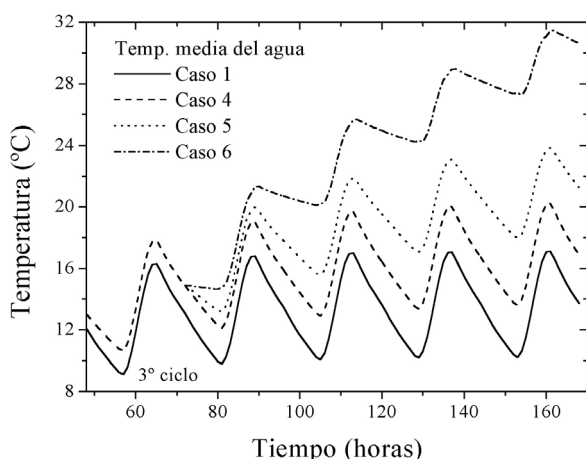


Figura 7: Comparación de la evolución de la temperatura media del agua para los Casos 1, 4, 5 y 6.

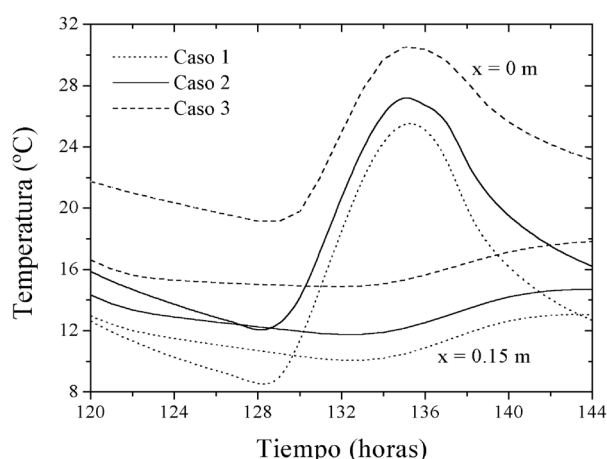


Figura 8: Variación diaria de la temperatura del agua de la superficie y del fondo del estanque para los casos 1, 2 y 3.

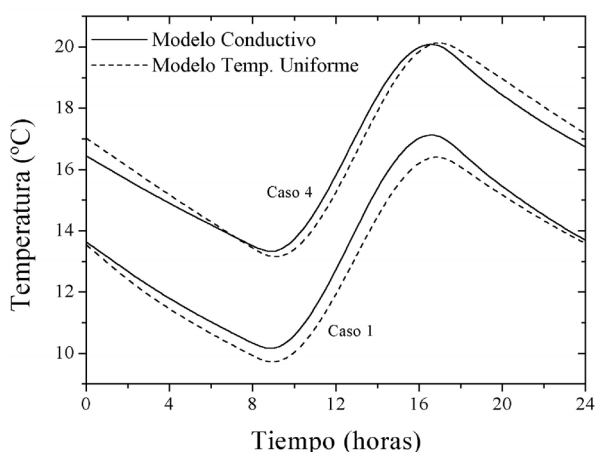


Figura 9: Temperaturas del agua calculadas con el modelo conductivo y de temperatura uniforme para los casos 1 y 4.

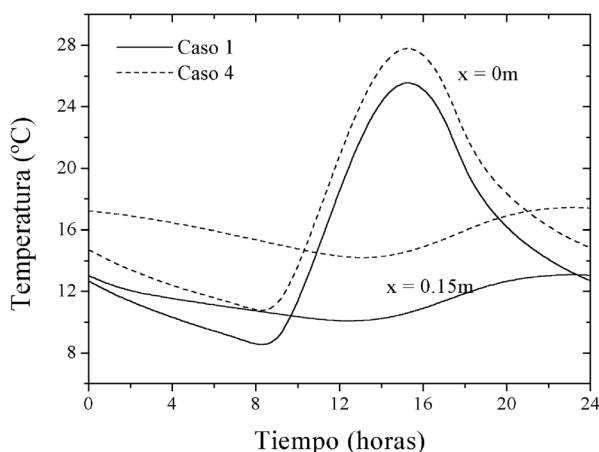


Figura 10: Variación diaria de la temperatura del agua de la superficie y del fondo del estanque para los casos 1 y 4

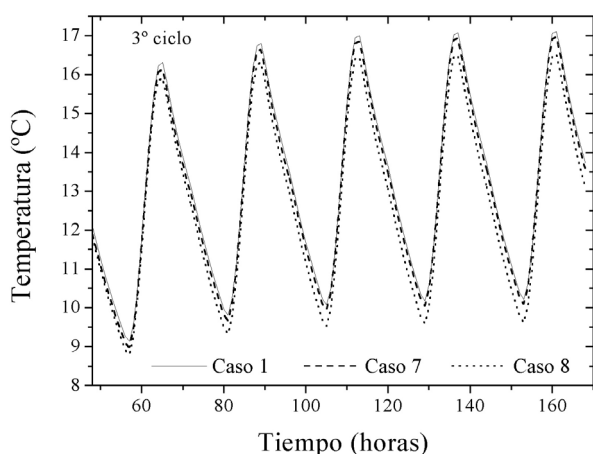


Figura 11: Comparación de la evolución de la temperatura media del agua para los Casos 1, 7 y 8.

CONCLUSIONES

La espirulina es una microalga que para reproducirse significativamente necesita que la temperatura del estanque de cultivo sea mayor de 20 °C. En este trabajo se ha modelizado un estanque, con el objetivo de evaluar las pérdidas de calor y

cuantificar la influencia de algunos parámetros: utilización de poliestireno expandido en el fondo, en lugar de la capa de arena y colocación de una manta aislante nocturna en la superficie. Con la aislación en la base se logra un aumento de la temperatura media del 24%. Si se utiliza una manta aislante, el aumento es del orden de 15% y el efecto conjunto da un aumento considerable de la temperatura media del orden de 45%, lo que haría más productivo el estanque. En el caso del uso del poliestireno resta evaluar el aspecto económico, ya que debido a las grandes dimensiones de las piletas, representa un costo elevado. Por otro lado, habría que estudiar el comportamiento térmico en verano, y asegurar que el estanque no supere los límites nocivos para la vida del alga.

El modelo conductivo presenta inestabilidades que dan origen a corrientes convectivas durante un período nocturno para ciertos valores del coeficiente de transferencia de calor, perdiendo validez en esas condiciones. Las corrientes de convección que pueden generarse uniformizan la temperatura dentro del estanque. El otro modelo límite simplificado que se puede plantear para analizar la evolución de la temperatura es suponer que el agua está totalmente mezclada con una temperatura uniforme. De la comparación de ambos modelos se concluye que son válidos para evaluar las pérdidas y el efecto de los aislantes, no obstante el modelo conductivo brinda información respecto al gradiente de temperatura diurna. A pesar de que la temperatura media se sitúa por debajo de los 20°C, una capa superior del orden de 0.03 m, supera este valor, permitiendo un cierto nivel de producción. Se obtienen ‘cosechas’ en invierno, aunque con valores menores al rendimiento esperado.

NOMENCLATURA

		Subíndices
c_p	calor específico, J/kg°C	amb ambiente
G	irradiancia solar normal en la superficie de la Tierra, W/m ²	c cielo
h	coeficiente de transferencia de calor, W/m ² °C	conv convección
k	conductividad térmica, W/m°C	L $x = L$
N_{uL}	número de Nusselt	p cubierta de polietileno
q	flujo de calor, W/m ²	r radiación
R_{aL}	número de Rayleigh	s superficie del agua
S	irradiancia solar absorbida por la superficie del agua, W/m ²	
t	tiempo, s	
T	temperatura en función de la variable espacial y temporal, °C o K	
\square	absorbancia de la superficie del agua	
\square	emitancia	
\square	densidad, kg/m ³	
\square	constante de Stefan-Boltzmann, $5.6697 \cdot 10^{-8}$ W/m ² K ⁴	
\square	transmitancia de la cubierta de polietileno	

REFERENCIAS

- ALGOR (2001). Versión 13.06-WIN.
- Daguenet M. (1985). Les séchoirs solaires: théorie et pratique, UNESCO.
- Duffie J. y Beckman W. (1980). Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons.
- Falquet J. (1996). Spiruline: Aspects Nutritionnels, Publicaciones Antenna Technology.
- Incropera F. P. y De Witt D. P. (1990). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3rd edition. John Wiley & Sons.
- Iqbal M. (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press.
- Jourdan J. P. (1999). Cultivez votre spiruline. Publicaciones Antenna Technology.
- Mills A. F. (1995). Transferencia de Calor. Editorial Irwin.
- Zarrouk C. (1966). Contribution à l'étude d'une cyanophycée: influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de *Spirulina maxima* (Setch et Gardner) Geitler. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de l'Université de Paris.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración del Dr. Eduardo Luccini por el aporte en el cálculo de la radiación solar.

HEAT TRANSFER MODEL OF SPIRULINA (ARTHROSPIRA PLATENSIS) POND CULTIVATION SYSTEM

ABSTRACT

The spirulina (cyanobacteria *Arthrospira platensis*) is an aquatic micro-organism (0,3 mm in length), rich in micronutrients easily absorbed by the human organism. The interval of greater production of the algae locates between the 35 and 40 °C, obtaining itself acceptable productions with 20°C in the water. The objective is to reduce heat losses to control the temperature of the pond cultivation system within this range without conventional energy supply. In this work, the heat transfer process in a pond with a greenhouse cover type, is modeled taking into account extreme climatic conditions. A global loss heat transfer coefficient due to convection and radiation is assumed. Particularly, the influence of different materials in the bottom of the pond and the use of an additional insulating cover to reduce top losses are analyzed in order to stabilize the temperature of the pond in the production range.

Keywords: Spirulina, pond cultivation, heat transfer, numerical simulation