

## ESCALADO DEL CULTIVO EN RESIDUALES DE LA MICROALGA *Chlorella vulgaris* EN FOTOBIOREACTORES DE CAPA FINA

Orlando Ginés Alfaro Vives  
Centro de Investigaciones de Energía Solar

*Se aplica la Teoría de los Modelos para identificar las razones de escala y los parámetros que caracterizan el sistema para el escalado de un cultivador de capa fina a cielo abierto, dedicado al cultivo mixotrófico de la microalga *Chlorella vulgaris*, utilizando como única fuente de materia orgánica y nutrientes el residual líquido porcino.*

*Se demostró utilizando las razones de escala que:*

*La irrigación en el modelo y el prototipo debe ser la misma para que exista semejanza dinámica.*

*La profundidad de la columna de líquido en el modelo y el prototipo será la misma siempre que las pendientes de las canales sean las mismas.*

*Si la irrigación y la pendiente son iguales entonces el coeficiente global de evaporación de líquido es el mismo en el modelo y el prototipo y por tanto la evaporación por unidad de área será idéntica, esto garantiza que la temperatura en la suspensión será la misma en el modelo y el prototipo.*

*Si la irrigación y la pendiente son las mismas entonces el coeficiente global de transferencia de masa es el mismo en el modelo y el prototipo y por tanto se libera igual cantidad de  $CO_2$  al medio por unidad de área.*

*El tiempo de residencia de la suspensión sobre la superficie de cultivo debe ser igual en el modelo y el prototipo para garantizar velocidades de crecimiento de las microalgas semejantes en ambos.*

*Si el tiempo de residencia del residual es el mismo en el modelo y el prototipo, se pueden alcanzar velocidades de crecimiento bacteriano similares en ambos. Para lograrlo debe añadirse el residual en proporciones equivalentes a la velocidad con que este es utilizado por las bacterias.*

**Palabras clave:** modelos y métodos de escalado, microalgas, tratamiento residual.

*The Theory of the Models is applied to identify the scale ratios and the parameters that characterize the system to scale up of outdoor thin layer cultivators dedicated to the mixotrophic cultivation of the microalga *Chlorella vulgaris*, using as organic matter and nutritious source the swinish waste water.*

*The application of the models theory could demonstrate using scale ratios that:*

*The irrigation in the model and the prototype should be the same so that exist dynamic similarity.*

*The depth of the fluent column in the model and the prototype should always be the same in the meantime the canal pendants are the same.*

*If the irrigation and the pendent are the same, then the global coefficient of dissipation of fluent is the same in the model and the prototype and therefore the dissipation per area unit will be the same.*

*If the irrigation and the pendent are the same, then the global coefficient of mass transference is the same in the model and the prototpe and therefore it is released equal amount of  $CO_2$  to the environment per area unit.*

*The time of residence of the suspension on the cultivation surface should be the same in the model and the prototype to guarantee similar speeds of growth of microalgas in both.*

*If the time of residence of the waste water is the same in the model and the prototype, similar speeds of bacterial growth can be reached in both. To achieve it the residual should be added in equivalent proportions to the speed with it is used by the bacterias.*

**Key words:** models and scale up methods , microalgae, waste water treatment.

### Introducción

El uso de las microalgas en el tratamiento de residuales líquidos de alta carga orgánica, ha sido investigado por Oswald (1959) y otros, durante un

cuarto de siglo aproximadamente. Estos trabajos han demostrado que cantidades significativas de nitrógeno, fósforo, materia orgánica y otros elementos solubles en los residuales, pueden ser reducidos mediante el cultivo de microalgas. El

problema más importante asociado a la producción de algas en los últimos tiempos, ha sido el desarrollo de técnicas adecuadas para la separación de la biomasa de la suspensión de cultivo. El método más utilizado ha sido la centrifugación, la que resulta muy costosa cuando las concentraciones de algas que se alcanzan son muy bajas.

Nuestro grupo de investigación ha desarrollado el cultivo en canales abiertos, por los que circula la suspensión de cultivo en forma de película que desciende por la inclinación de la canal (fotobioreactor de cascada o de capa fina). Estas instalaciones que permiten alcanzar concentraciones de biomasa 10 veces superiores a las obtenidas en las lagunas de algas de alto rendimiento, desarrolladas por Oswald, y el tiempo de residencia se reduce 3 veces es decir hasta un día, revoluciona el tratamiento de residuos de alta carga orgánica en lagunas de baja profundidad. Las altas concentraciones que se alcanzan facilitan el proceso de separación de la biomasa y reduce el gasto por esta causa.

Los cultivadores de película descendente constan de tres instalaciones: la superficie de cultivo a cielo abierto, tanque guarda de la suspensión y el sistema de bombeo y de aireación.

La superficie de cultivo esta compuesta por canales con una pendiente longitudinal que oscila entre 1,5 - 3 %, lo más lisa posible y con pendiente transversal nula.

El tanque guarda permite la recolección de toda la suspensión de cultivo al finalizar el día, por lo que su volumen debe cubrir esta necesidad y tener reservas por otras causas imprevistas como lluvias, las que no deben caer en el tanque, el mismo debe permanecer comunicado con la superficie de cultivo durante la noche y estar cubierto por un techo que facilite la respiración de los microorganismos durante la noche.

El sistema de bombeo debe garantizar durante el día la recirculación de la suspensión de cultivo desde el tanque guarda hasta la parte más alta de la superficie de cultivo, desde donde descenderá por gravedad a través de la misma hasta el tanque guarda.

El sistema de aireación suministra al tanque guarda el oxígeno, necesario para garantizar la respiración de los microorganismos durante la noche y con ello evitar pérdidas de biomasa.

El escalado de estas instalaciones para el tratamiento del residual líquido porcino es indispensable. Es propósito de este trabajo aplicar la teoría de los modelos para conocer las razones de escala que se derivan de la semejanza dinámica, térmica y química y comparar los resultados experimentales obtenidos en una instalación de 3500m<sup>2</sup> con los obtenidos en una instalación piloto de 500m<sup>2</sup>.

## Materiales y métodos

Si el sistema de cultivo es una canal con una inclinación con respecto a la horizontal, con un ancho  $b$  en (m), por el que desciende una película de líquido newtoniano (suspensión de algas-bacterias) de viscosidad  $\mu$  en (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>) y densidad  $\rho$  en (kg.m<sup>-3</sup>). El gasto volumétrico de la suspensión es  $Q_v$  en (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) y el espesor de la película es  $p$  en (m). Las dimensiones características del sistema según (Bird, R. 1964) son  $p$  y  $\Gamma$ .

$$\Gamma = v \cdot p \quad (1)$$

donde  $\Gamma$  es la densidad de irrigación (m<sup>3</sup>.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>) y  $v$  es la velocidad de la película (m.s<sup>-1</sup>).

Semejanza dinámica en el cultivador de película descendente para el cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris*.

Las fuerzas que actúan sobre el sistema descrito son:

Fuerza inercia                      Dimensionalmente

$$F_i = \rho \cdot v^2 \cdot p^2 = \rho \cdot \Gamma^2 \quad [F_i] = [\rho \cdot \Gamma^2] \quad (2)$$

Fuerza gravitacional              Dimensionalmente

$$F_g = \rho \cdot v \cdot g_\theta \quad [F_g] = [\rho \cdot p^3 \cdot g_\theta] \quad (3)$$

$$g_\theta = g \cdot \text{sen } \theta \quad (4)$$

$g \Rightarrow$  Aceleración de la gravedad en m.s<sup>-2</sup>.

---

Fuerza viscosa

$$F\mu = \mu \cdot v \cdot p$$

Dimensionalmente

$$[F\mu] = [\mu \cdot \Gamma] \quad (5)$$

Fuerza de fricción en los límites sólidos

$$Ff = \tau_p \cdot A$$

Dimensionalmente

$$[Ff] = [\tau_p \cdot p^2] \quad (6)$$

Si relacionamos estas fuerzas se pueden formar tres grupos adimensionales:

$$\left[ \frac{Fi}{F\mu} \right] = \left[ \frac{Fi'}{F\mu'} \right] = \left[ \frac{\rho \cdot \Gamma}{\mu} \right] = \left[ \frac{\rho' \cdot \Gamma'}{\mu'} \right] = \left[ \frac{\Gamma}{\gamma} \right] = [\text{Re}] \quad \text{Número de Reynolds} \quad (7)$$

$\gamma = \frac{\rho}{\mu}$  Viscosidad cinemática

$$\left[ \frac{Fi}{Fg} \right] = \left[ \frac{Fi'}{Fg'} \right] = \left[ \frac{\Gamma^2}{p^3 \cdot g_\theta} \right] = [Fr] \quad \text{Número de Froude} \quad (8)$$

$$\left[ \frac{Ff}{F\mu} \right] = \left[ \frac{Ff'}{F\mu'} \right] = \left[ \frac{\tau_p \cdot p^2}{\rho \cdot \Gamma^2} \right] = [f] \quad \text{Coeficiente de fricción} \quad (9)$$

$\tau_p$  Esfuerzo cortante

Por tanto y teniendo en cuenta que la suma de todas las fuerzas que actúan sobre el sistema es igual a 0.

Es decir  $\sum Fi = 0$  se cumple que:

$$f(\text{Re}, Fr, f_f) = 0 \quad (10)$$

Aplicando un balance de energía mecánica sobre la película descendente en régimen estacionario y multiplicando por  $\left(\frac{p^2}{\Gamma^2}\right)$  se obtiene

$$f_f = f\left(\frac{1}{2 \cdot Fr}\right) \quad (11)$$

Al combinar las ecuaciones (1.10) y (1.11) se obtiene:

$$f\left(\frac{\Gamma}{\gamma}, \frac{\Gamma^2}{p^3 \cdot g_\theta}\right) = 0 \quad (12)$$

Si se busca una relación entre  $\Gamma$  y  $p$  el uso de la ecuación criterial anterior presenta dificultades, en este caso se puede eliminar  $\Gamma$  del segundo término de la ecuación (1.12) dividiendo por  $\left(\frac{\Gamma}{\gamma}\right)^2$  y se obtiene:

$$f\left(\frac{\Gamma}{\gamma}, \frac{\gamma^2}{p^3 \cdot g_\theta}\right) = 0 \quad (13)$$

Semejanza térmica en cultivo mixto de la microalga *Chlorella vulgaris* en residuales en un cultivador de película descendente.

Los flujos de calor existente en el sistema son:

$H_R \Rightarrow$  Flujo de calor por radiación

Dimensionalmente es:

$$H_R = a_s \cdot I_r \cdot A \quad [H_R] = [a_s \cdot I_r \cdot L^2] \quad (14)$$

donde:  $a_s \Rightarrow$  Absorbancia de la suspensión,  $I_r \Rightarrow$  Radiación incidente ( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) y  $A \Rightarrow$  Área ( $\text{m}^2$ )

Flujo de calor por convección

Dimensionalmente es

$$H_V = \rho \cdot C_p \cdot v \cdot A \cdot \Delta t_1 \quad [H_V] = [\rho \cdot C_p \cdot v \cdot L^2 \cdot \Delta t] \quad (15)$$

donde:  $\rho \Rightarrow$  Densidad de la suspensión ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $C_p \Rightarrow$  Calor específico de la suspensión ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$ ), Velocidad de la suspensión ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) y  $\Delta t \Rightarrow$  Diferencia de temperatura ( $^\circ\text{C}$ )

Flujo de calor en los límites del sistema

Dimensionalmente

$$H_f = h \cdot A \cdot \Delta t_2 \quad [H_f] = [h \cdot L^2 \cdot \Delta t] \quad (16)$$

donde:  $h \Rightarrow$  coeficiente de transferencia de calor entre el fluido y el aire ( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) y  $\Delta t_2 \Rightarrow$  Diferencia de temperatura entre la suspensión y el medio ( $^\circ\text{C}$ )

Se pueden formar los siguientes grupos adimensionales:

$$\left[ \frac{H_f}{H_R} \right] = \left[ \frac{H_f}{H_R} \right] = \left[ \frac{h \cdot \Delta t}{I_r \cdot (a_s)} \right] = [K_1] \quad (17)$$

$$\left[ \frac{H_R}{H_V} \right] = \left[ \frac{H_R}{H_V} \right] = \left[ \frac{I_r \cdot (a_s)}{\rho \cdot C_p \cdot v \cdot \Delta t} \right] = [K_2] \quad (18)$$

Si se multiplica  $K_1$  por  $K_2$  se obtiene:

$$K_3 = \frac{h}{\rho \cdot C_p \cdot v} \quad (19)$$

Por tanto para que exista semejanza térmica se debe cumplir que:

$$K_2 = f(K_3, \text{Re}) \quad (20)$$

Si se realiza un balance de calor en régimen estacionario:

$$a_s \cdot I_r = \rho \cdot C_p \cdot v \cdot A \cdot \Delta t_1 + h \cdot A \cdot \Delta t_2 \quad (21)$$

Se puede demostrar que:

$$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = f(K_3, \text{Re}) \quad (22)$$

donde:  $\Delta t_1 \Rightarrow$  Diferencia de temperatura de la suspensión ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $\Delta t_2 \Rightarrow$  Diferencia de temperatura entre la suspensión y el medio ( $^{\circ}\text{C}$ )

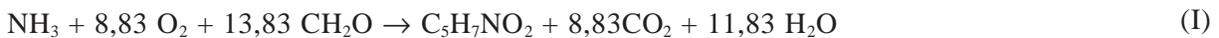
Por tanto el gradiente de temperatura es función de:

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = f\left(\frac{h \cdot p}{\rho \cdot C_p \cdot \Gamma}, \frac{\Gamma}{\gamma}\right) \quad (23)$$

Si se multiplica el primer término por el segundo se obtiene:

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = f\left(\frac{h \cdot p}{\rho \cdot C_p \cdot \gamma}, \frac{\Gamma}{\gamma}\right) \quad (24)$$

La acción de los microorganismos heterotróficos en estos sistemas es similar a los procesos de tratamiento en lodo activado, donde los microorganismos descomponen la materia orgánica en presencia de oxígeno, la ecuación estequiométrica para estos procesos según (Buhr, H et all, 1980) es:



Semejanza química en cultivo mixto de la microalga *Chlorella vulgaris* en residuales en un cultivador de película descendente

Par el análisis realizaremos un balance de carbono.

Carbono suministrado en el residual:

$$Nr = V_r \cdot \Delta C_c$$

Dimensionalmente

$$Nr = \left[ L^3 \cdot \Delta C \cdot \frac{1}{T_r} \right] \quad (25)$$

donde:  $V_r \Rightarrow$  Volumen de residual añadido al sistema ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ),  $C_c \Rightarrow$  Concentración de carbono en el residual añadido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Carbono liberado (en forma  $\text{CO}_2$ ) por las bacterias.

$$N_B = Y_{cb} \cdot \mu_B \cdot \Delta C_B \cdot V_T$$

Dimensionalmente

$$[N_B] = [Y_{cb} \cdot \mu_B \cdot \Delta C \cdot L^3] \quad (26)$$

donde:  $Y_{cb} \Rightarrow$  Carbono liberado en forma de  $\text{CO}_2$  por las bacterias por kg de bacterias producidas ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $\mu_B \Rightarrow$  Velocidad media de crecimiento de las bacterias ( $\text{h}^{-1}$ ) y  $\Delta C_B \Rightarrow$  Incremento en la concentración de las bacterias ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) y  $V_T \Rightarrow$  Volumen total de la suspensión ( $\text{m}^3$ ).

Carbono consumido por las bacterias

$$N_C = Y_C \cdot \mu_B \cdot \Delta C_B \cdot V_T$$

Dimensionalmente

$$[N_C] = [Y_C \cdot \mu_B \cdot \Delta C \cdot L^3] \quad (27)$$

donde:  $Y_{cb} \Rightarrow$  Carbono consumido por kg de bacterias producido ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

Se pueden formar los siguientes grupos adimensionales

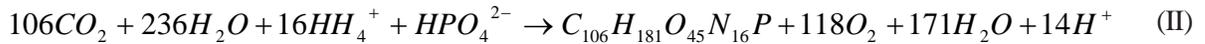
$$\left[ \frac{N_B}{N_C} \right] = \left[ \frac{N_B}{N_C} \right] = \left[ \frac{Y_{cb}}{Y_C} \right] = \left[ \frac{Y_{cb}}{Y_C} \right] = [R] = [R']_{\text{constante}} \quad (28)$$

$$\left[ \frac{N_r}{Nc} \right] = \left[ \frac{N_r'}{Nc'} \right] = \left[ \frac{1}{Yc \cdot \mu_B \cdot Tr} \right] = \left[ \frac{1'}{Yc \cdot \mu_B \cdot Tr'} \right] = [R_1] = [R_1'] \quad (29)$$

Si hacemos un balance de masa de esta etapa del proceso nos percatamos que ambos grupos adimensionales están correlacionados como es lógico.

$$R = f(R_1) \quad (30)$$

En cultivos empleando residuales, la síntesis del material celular del alga se produce en correspondencia con la ecuación estequiométrica propuesta por (Oswald, 1976).



Dióxido de carbono producido por las bacterias

Dimensionalmente

$$N_B = Ycb \cdot \mu_B \cdot \Delta C_B \cdot V_T \quad [N_B] = [Ycb \cdot \mu_B \cdot \Delta C \cdot L^3] \quad (31)$$

donde:  $Ycb \Rightarrow$  Dióxido de carbono liberado por kg de bacterias producido ( $kg \cdot kg^{-1}$ ),  $\mu_B \Rightarrow$  Velocidad de crecimiento de las bacterias y  $\Delta C_B \Rightarrow$  Incremento de concentración de las bacterias.

Dióxido de carbono consumido por las algas

Dimensionalmente

$$N_A = Yca \cdot \mu_A \cdot \Delta C_A \cdot V_{ss} \quad [N_A] = [Yca \cdot \mu_A \cdot \Delta C \cdot L^3] \quad (32)$$

donde:  $Yca \Rightarrow$  Dióxido de carbono consumido por cada kg de alga producido en ( $kg \cdot kg^{-1}$ ),  $\mu_A \Rightarrow$  Velocidad media de crecimiento del alga ( $h^{-1}$ ),  $C_A \Rightarrow$  Incremento Concentración inicial de algas ( $kg \cdot m^{-3}$ ) y  $V_{ss}$  Volumen sobre la superficie de cultivo ( $m^3$ ).

Dióxido de carbono intercambiado con el medio

Dimensionalmente

$$Nf = Ka \cdot A \cdot \Delta CO_{21} \quad [Nf] = [Ka \cdot L^2 \cdot \Delta C] \quad (33)$$

donde:  $Ka \Rightarrow$  Coeficiente de transferencia de masa con el medio ( $1 \cdot seg^{-1}$ ),  $\Delta CO_{21} \Rightarrow$  Variación de concentración del  $CO_2$  disuelto en el medio y la interfase (líquido-vapor) ( $kg \cdot m^{-3}$ ) y  $A \Rightarrow$  área de la superficie de cultivo  $m^2$ .

Flujo de  $CO_2$  que se difunde en el líquido

Dimensionalmente

$$Nd = D \cdot A \cdot \Delta CO_2 \cdot \frac{1}{L} \quad [Nd] = [D \cdot L \cdot \Delta C] \quad (34)$$

donde:  $D \Rightarrow$  Difusividad ( $m^2 \cdot seg^{-1}$ ),  $\Delta CO_2$  Variación de concentración del  $CO_2$  disuelto en la fase líquida de la interfase líquido - gas ( $kg \cdot m^{-3}$ ) y en la suspensión de cultivo.

Flujo de  $CO_2$  disuelto en la suspensión de cultivo

$$Nv = \Delta CO_2 \cdot v \cdot A \quad [Nv] = [\Delta C \cdot \Gamma \cdot L] \quad (35)$$

donde:  $\Delta CO_2 \Rightarrow$  Variación de la concentración de  $CO_2$  en el medio de cultivo ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$$\left[ \frac{Nv}{Nf} \right] = \left[ \frac{Nv'}{Nf'} \right] = \left[ \frac{\Gamma}{Ka \cdot p} \right] = \left[ \frac{\Gamma}{Ka' \cdot p'} \right] = [P_1] = [P_1']$$

si multiplicamos este número adimensional por el inverso del Reynold obtenemos uno equivalente que es

$$\left[ \frac{Nv}{Nf} \right] = \left[ \frac{Nv'}{Nf'} \right] = \left[ \frac{\gamma}{Ka \cdot p} \right] = \left[ \frac{\gamma'}{Ka' \cdot p'} \right] = [P_1] = [P_1'] \quad (36)$$

$$\left[ \frac{Nf}{Nd} \right] = \left[ \frac{Nf'}{Nd'} \right] = \left[ \frac{ka \cdot p}{D} \right] = \left[ \frac{Ka' \cdot p'}{D'} \right] = [Sh] = [Sh'] \quad \text{No. Sherwood} \quad (37)$$

$$\left[ \frac{N_A}{N_B} \right] = \left[ \frac{N_A'}{N_B'} \right] = \left[ \frac{Yca \cdot \mu_A}{Ycb \cdot \mu_B} \right] = \left[ \frac{Yca' \cdot \mu_A'}{Ycb' \cdot \mu_B'} \right] = [P_2] = [P_2'] = \text{constante} \quad (38)$$

$$\left[ \frac{N_A}{N_v} \right] = \left[ \frac{N_A'}{N_v'} \right] = \left[ \frac{1}{Yca \cdot \mu_A \cdot Trs} \right] = \left[ \frac{1}{Yca' \cdot \mu_A' \cdot Trs'} \right] = [P_3] = [P_3'] \quad (39)$$

$Trs \Rightarrow$  Es el tiempo de exposición de la suspensión de cultivo al Sol (s).

Entonces se cumple que:

$$Sh = f(P_1, P_2, P_3) \quad (40)$$

Si hacemos un balance de masa puede demostrarse que la razón de concentraciones  $\alpha$  es función de:

$$Ycb \cdot \mu_B \cdot \Delta C_B \cdot V_T = Yca \cdot \mu_A \cdot \Delta C_A \cdot V_{SS} + Ka \cdot \Delta CO_{21} \cdot V_{SS} + \Delta CO_2 \cdot Qv \quad (41)$$

$$Sh = f(P_1, P_3) \quad (42)$$

Para garantizar semejanza dinámica y térmica se debe cumplir:

$$\frac{\Delta C_A}{\Delta C_B} = f\left(\frac{\gamma}{ka \cdot p}, Yca \cdot \mu_A \cdot Trs, \frac{1}{Yc \cdot \mu_B \cdot Tr}, \frac{T}{\gamma}, \frac{h \cdot p}{\rho \cdot Cp \cdot \gamma}\right) \quad (43)$$

$$\frac{\overline{\Delta CO_{21}}}{\Delta C_B} = f\left(\frac{\gamma}{ka \cdot p}, Yca \cdot \mu_A \cdot Trs, \frac{1}{Yc \cdot \mu_B \cdot Tr}, \frac{T}{\gamma}, \frac{h \cdot p}{\rho \cdot Cp \cdot \gamma}\right) \quad (44)$$

$$\frac{\overline{\Delta CO_2}}{\Delta C_B} = f\left(\frac{\gamma}{ka \cdot p}, Yca \cdot \mu_A \cdot Trs, \frac{1}{Yc \cdot \mu_B \cdot Tr}, \frac{T}{\gamma}, \frac{h \cdot p}{\rho \cdot Cp \cdot \gamma}\right) \quad (45)$$

Se planificó un experimento a escala piloto que permitió conocer que (Manso *et al.* 1990):

La relación volumen en la oscuridad / volumen sobre la superficie debe ser la mínima posible para garantizar que el tiempo de residencia de la suspensión de cultivo sobre la superficie sea el mayor posible.

La densidad de irrigación en las canales óptima es  $\Gamma = 0,0012 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

La profundidad óptima  $p = 1 \text{ cm}$

Agua evaporada  $0,007\text{-}0,008 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$

La concentración inicial de microorganismos óptima es de  $7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Se realizaron experimentos en dos instalaciones una de  $500 \text{ m}^2$  piloto y una de  $3500 \text{ m}^2$  donde se tuvieron en cuenta las razones de escala en el diseño y operación de la misma.

Durante los experimentos se empleo una mezcla de microorganismos: autotróficos (*Chlorella* sp.) y heterotróficos (Consorsium bacteriano) fue cultivada en fotobioreactores de capa fina de

superficie lisa a cielo abierto (Setlik *et al.*, 1970)) utilizando concentraciones iniciales de microorganismos  $7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  de peso seco.

La fuente de carbono utilizada fue residual líquido porcino con una DQO de  $10 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ , la cual se suministró a razón de  $90 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . La temperatura de la suspensión se midió cada una hora y osciló entre  $24$  y  $37 \text{ }^\circ\text{C}$ . La radiación solar total se registró a través de un piranómetro (np-42), acoplado a un sistema de adquisición de datos (Data Logger Mp-110) donde se obtienen los valores integrados de la radiación horaria.

Durante el período de la evaluación se determinó al inicio y final de cada día la concentración de biomasa por gravimetría, la DQO del sobrenadante de la suspensión del cultivo (centrifugado a  $4000 \text{ rpm}$ ) por una técnica semi-micro (Bartos *et al.*, 1978) y el contenido de clorofila a y b de la biomasa de microorganismos midiendo la densidad óptica en extracto de metanol a  $645$  y  $665 \text{ nm}$  para estimar la relación algas bacterias (Armas, 1988).

## Resultados y discusión

Las razones de escala para que exista semejanza dinámica son:

$$\frac{\Gamma}{\gamma} = \frac{\Gamma'}{\gamma'} \quad \text{o sea} \quad \frac{C_\Gamma}{C_\gamma} = 1 \quad \frac{\gamma^2}{p^3 \cdot g_\theta} = \frac{\gamma'^2}{p'^3 \cdot g_\theta'} \quad \text{o sea} \quad \frac{C\gamma^2}{Cp^3 \cdot Cg_\theta} = 1 \quad (46)$$

Se puede afirmar que para que exista semejanza dinámica entre prototipo y modelo se debe garantizar igual irrigación en ambos si se trata de fluidos homólogos, si se desea escalar el cultivador de película descendente desde  $500 \text{ m}^2$  a  $3500 \text{ m}^2$ , es necesario garantizar que

en el cultivador de  $3500 \text{ m}^2$  exista la misma irrigación  $\Gamma$  que en el de  $500 \text{ m}^2$ , para ello debe suministrarse el mismo flujo de líquido por cada  $\text{m}$  de ancho que tenga el cultivador, siempre que la inclinación de las canales en ambas instalaciones sea la misma.

Las razones de escala para que exista semejanza térmica son:

$$\frac{C_\Gamma}{C_\gamma} = 1 \quad \frac{C_h \cdot C_p}{C_\rho \cdot C_{Cp} \cdot C_\gamma} = 1 \quad \frac{C_{\Delta t}}{C_{\Delta t}} = 1 \quad (47)$$

Para fluidos homólogos, en canales con igual pendiente la profundidad  $p$  permanece constante entre el modelo y el prototipo lo que implica igual coeficiente de transferencia de calor por evaporación, por tanto, el gradiente de temperatura

entre modelo y prototipo será el mismo. Lo anterior demuestra que si se construye el cultivador de  $3500 \text{ m}^2$  existirá la misma evaporación por  $\text{m}^2$  que en el de  $500 \text{ m}^2$  y por tanto la temperatura de la suspensión será la misma en ambas instalaciones.

Las razones de escala para que exista semejanza química son:

$$C_{Ka} = C_p \quad \frac{C_{CA}}{C_{CB}} = 1 \quad C_r = 1 \quad C_h = C_p \quad C_{Tr} = C_{\mu B} \quad C_{Trs} = C_{\mu A} \quad (48)$$

El tiempo de residencia de la suspensión de cultivo sobre la superficie debe ser igual en el modelo y el prototipo para garantizar velocidades de crecimiento algal semejantes. Es indispensable reducir al máximo la relación volumen en la oscuridad volumen sobre la superficie de cultivo para alcanzar valores óptimos del tiempo de residencia.

Para garantizar igual velocidad de crecimiento bacteriano en el modelo y el prototipo debe existir igual tiempo de residencia del residual en el modelo y el prototipo. Para lograrlo debe añadirse el residual en proporciones equivalentes a la velocidad con que este es utilizado por las bacterias.

Los resultados experimentales obtenidos en el CIES (Armas *et al*, 1991).

Tabla 1  
Valores máximos, mínimos y promedios obtenidos en 20 corridas experimentales con una concentración inicial de microorganismos de  $7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  en una instalación de  $500 \text{ m}^2$

	Máximo	Mínimo	Promedio
Concentración final ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	12,9	10	11,8
Pnt ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ )	59	30	48
Y (%)	73	37,5	60
R (%)	97,8	71,4	88
Epa (%)	6,7	4,85	6
Io ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )	20,11	14,2	18,4
Ca (%)	1,5	1,15	1,2
Cb (%)	0,62	0,37	0,49

Tabla 2  
Valores máximos, mínimos y promedios obtenidos en 20 corridas experimentales con una concentración inicial de microorganismos de  $7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  en una instalación de  $3\ 500 \text{ m}^2$

	Máximo	Mínimo	Promedio
Concentración final ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	12,6	10	11,6
Pnt ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ )	60	30	48
Y (%)	74	37,6	60
R (%)	97	71,3	86
Epa (%)	6,6	4,84	5,8
Io ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )	20,11	14,2	18,4
Ca (%)	1,51	1,14	1,21
Cb (%)	0,61	0,38	0,49

Pnt  $\Rightarrow$  Productividad neta total en ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ), Epa  $\Rightarrow$  Eficiencia fotosintética aparente en %, Io  $\Rightarrow$  Radiación solar incidente en ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ), Y (%)  $\Rightarrow$  Rendimiento del carbono en %, R (%)  $\Rightarrow$  Remoción de materia orgánica en %, Ca (%)  $\Rightarrow$  Clorofila a (%), Cb (%)  $\Rightarrow$  Clorofila B en (%).

Como se puede observar en experimentos realizados en un cultivador de 3 500 m<sup>2</sup>, diseñado teniendo en cuenta las razones de escala y manteniendo constante los parámetros identificados como más importante a través de la teoría de los modelos se alcanzaron resultados similares a los obtenidos en una instalación de 500 m<sup>2</sup> empleando concentración inicial de microorganismos en 7 kg · m<sup>-3</sup> que es la óptima según (Armas, E., y otros 1992).

$$C_{Ka} = C_p \quad \frac{C_{CA}}{C_{CB}} = 1 \quad C_r = 1 \quad C_h = C_p \quad C_{Tr} = C_{\mu B} \quad C_{Trs} = C_{\mu A}$$

Se demostró utilizando las razones de escala que:

- La irrigación en el modelo y el prototipo debe ser la misma para que exista semejanza dinámica.
  - La profundidad de la columna de líquido en el modelo y el prototipo será la misma siempre que las pendientes de las canales sean las mismas.
  - Si la irrigación y la pendiente son las mismas entonces el coeficiente global de evaporación de líquido es el mismo en el modelo y el prototipo y por tanto la evaporación por unidad de área será la misma, esto garantiza iguales gradientes de temperaturas y por tanto la temperatura en la suspensión será la misma en el modelo y el prototipo.
  - Si la irrigación y la pendiente son las mismas entonces el coeficiente global de transferencia de masa es el mismo en el modelo y el prototipo y por tanto se libera igual cantidad de CO<sub>2</sub> al medio por unidad de área.
  - El tiempo de residencia de la suspensión de cultivo sobre la superficie debe ser igual en el modelo y el prototipo para garantizar velocidades de crecimiento algal semejantes.
  - Para garantizar igual velocidad de crecimiento bacteriano en el modelo y el prototipo debe garantizarse igual tiempo de residencia del residual en el modelo y el prototipo. Para lograrlo debe añadirse el residual en proporciones equivalentes a la velocidad con que este es utilizado por las bacterias.
2. Si se desea escalar un cultivador de película descendente a cielo abierto utilizado para el cultivo mixotrófico de la microalga *Chlorella vulgaris* desde 500 m<sup>2</sup> hasta 3 500 m<sup>2</sup> o más es

## Conclusiones

1. Si se desea escalar un cultivador de película descendente utilizado en el cultivo mixotrófico de la microalga *Chlorella vulgaris* desde 500 m<sup>2</sup> hasta 3 500 m<sup>2</sup> o más es necesario tener en cuenta que:

Para fluidos homólogos las razones de escala son:

necesario tener en cuenta que: la relación volumen en la oscuridad/volumen sobre la superficie debe ser la mínima posible, la densidad de irrigación óptima es  $\Gamma = 4-5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , la profundidad óptima  $p = 1 \text{ cm}$  y la concentración inicial de microorganismos óptima es de  $7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

3. Los resultados experimentales muestran que es posible obtener resultados similares en cuanto a productividad neta total, eficiencia fotosintética aparente, rendimiento del carbono y remoción de materia orgánica si se tienen en cuenta las razones de escala al diseñar y operar un cultivador de película descendente de mayor área dedicado al cultivo mixotrófico de la microalga *Chlorella vulgaris* en residual líquido porcino.

## Bibliografía

- Armas, E. (1989): Relación entre el contenido de clorofila a y b y el peso seco en cultivos autotróficos de *Chlorella* sp. Y *Scenedesmus obliquus*. (Inédito). Informe Interno, CIES, ACC.
- Armas, E., Juantorena, A. y Castilla H. (1991) Evaluación del cultivo liso de 500m<sup>2</sup> en condiciones de explotación. Cultivo de *Chlorella* sp con diferentes concentraciones de microorganismos. Informe final de Resultado. CIES.1992.
- Armas, E., Alfaro O. Rubio D y Juantorena, A.. (1992) Evaluación en condiciones de explotación del cultivador de película descendente de 3500m<sup>2</sup> de el Brujo. Cultivo de *Chlorella* sp sobre residual porcino. Informe final de Resultado. CIES.1992.
- Bartos, J., Conde, J. y Reyes, A.. (1978): Determinación rápida de la DQO. Revista ICIDCA. Sobre los derivados. 12, 3 pp 21-31..
- Buhr, H.; And Miller S.(1980): Dynamic model of the

- 
- High rate Algal -Bacterial Waste Treatment Pond. Water Res. 17. pp 29-37.
- Manso, L et al. (1990): Desarrollo de una tecnología para el cultivo intensivo de microalgas. Informe Final del resultado. Informe de Resultado. Centro de Investigaciones de Energía Solar. Santiago de Cuba.
  - Oswald, J.(1976): Pilot plant high rate pond for study of waste treatment and algae production. Regional office for the western Pacific. United Nations. Ave. P.O. Box 2932, 12115 Manila, Philippines.
  - Setlik, I., Sust, V. Y Malek, I. (1970): Dual purpose open circulation units for large scale culture of algae interperate zones. Algol. Studies. Trebon pp 11 - 164.