

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Figura 1. Muestra una vista isométrica de los elementos y componentes que conforman el Sistema Híbrido de Biofertilización (1).

5 **Figura 2.** Muestra dos vistas isométricas, una vista frontal y una vista superior de los elementos del Sistema Híbrido de Biofertilización (1).

Figura 3. Muestra una vista ortogonal del Tanque reservorio (3.1).

Figura 4. Muestra una vista isométrica del Fotobiorreactor (2).

Figura 5. Muestra una vista isométrica de los componentes que hacen parte del Fotobiorreactor (2).

10 **Figura 6.** Muestra una vista isométrica del tanque reservorio (3.1) y arreglo de tubos (4) PVC.

Figura 7. Muestra una vista isométrica del arreglo de tubos (4) PVC.

Figura 8. Muestra un diagrama de flujo del proceso que sucede en el sistema de biofertilización (1).

15 **Figura 9.** Muestra unas fotografías de los resultados obtenidos del consorcio alga bacteria. Tercer montaje.

Figura 10. Muestra una tabla de resultados de la biomasa ganada en peso (g) experimento 2 (*Lactuca sativa* variedad. Batavia.).

Figura 11. Muestra una tabla de resultados de la biomasa ganada en peso (g).

20 **Figura 12.** Muestra una tabla de resultados de biomasa ganada en peso (g) experimento 2 (*Lactuca sativa* variedad. Crispa).

Figura 13. Muestra una vista isométrica de los elementos y componentes que conforman el fotobiorreactor (2).

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INVENCION

25 La invención desarrolla un sistema de biofertilización (1), conformado por un fotobiorreactor (2) tipo airlift de tubos concéntricos para el cultivo de microalgas, donde el tubo externo (2.1) está hecho de manguera de polietileno, preferiblemente y el tubo (2.2) interno de PVC, preferiblemente. El fotobiorreactor

(2) (Ver figura No.4) cuenta también con un compresor de aire conectado al sistema (1), que burbujea aire desde el fondo, y una fuente de luz LED (2.4) (Ver figura No.5). Asimismo el sistema de biofertilización (1) cuenta con un sistema de alimentación (3) para el fotobiorreactor (2) compuesto por un tanque reservorio (3.1) de polietileno y una bomba de agua (3.2) conectada al fotobiorreactor (2) (Ver figuras No.1 y No.3). Por último, el sistema de biofertilización (1) también cuenta con un arreglo de tuberías (4) de PVC (Ver figura No.7) para el riego de las plantas usando el agua rica en microalgas proveniente del fotobiorreactor (2).

Como características novedosas de la presente invención, se presentan a continuación las siguientes:

- La mejora consiste en reemplazar el fertilizante inorgánico comercial por un biofertilizante producido *in-situ* empleando un fotobiorreactor (2) acoplado al sistema (1).
- Es común el uso de bolsa de polietileno para la construcción de fotobiorreactores. En este caso, como novedad en nuestra invención, agregamos un tubo (2.2) rígido interno, dentro del cual se lleva a cabo el burbujeo. Esto se convierte en un fotobiorreactor (2) tipo *airlift*, el cual presenta ventajas en cuanto la aireación y mezcla.

En los fotobiorreactores el uso de luz es necesario para el crecimiento de microalgas. Por otro lado, como novedad en nuestro sistema (1), el fotobiorreactor (2) tipo *airlift* de tubos concéntricos cuenta con un sensor de luz (5) de referencia BH-1750, embebido en resina epóxica, para que se pueda sumergir en agua sin que se dañe.

- Una de las alternativas consideradas para este sistema (1) es no usar agua residual como fuente de nitrógeno sino agregar cianobacterias al fotobiorreactor (2), las cuales son capaces de capturar nitrógeno directamente de la atmosfera.

- Es común usar agua residual para fertilizar cultivos. Sin embargo no es una práctica recomendable para cultivos de plantas alimenticias. Aquí se propone mantener el uso de agua residual, pero no usarla directamente como fertilizante. En lugar de eso, se reciclan los nutrientes presentes en el agua residual, incorporándolos en la biomasa microalgal mediante el empleo del fotobiorreactor (2).

Las ventajas de la presente invención son las siguientes:

- El reemplazo del fertilizante inorgánico NPK por biofertilizante a partir del reciclaje de nutrientes contenidas en aguas residuales amarillas.
- La disminución del dióxido de carbono atmosférico, que es una de las causas del calentamiento global, y la disminución de costos de operación en la fertilización inorgánica.
- El funcionamiento y operación del sistema de riego puede ser por gravedad.
- El sistema de biofertilización (1) tiene una ventaja en cuanto a que puede funcionar en ambientes abiertos y cerrados (invernaderos) para la producción de biomasa microalgal como fertilizante. Es un sistema de fertilización (1) con base en un fotobiorreactor (2) para producción de microalgas.
- Este sistema (1) puede funcionar a partir de energías renovables si se reemplaza la luz LED (2.4), por luz solar. Es una solución de bajo costo para el reciclaje de nutrientes contenidas en aguas residuales.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

Después de revisar los antecedentes, se puede determinar el alcance que posee esta invención, puesto que se presenta como alternativa a los fertilizantes NPK tradicionales, además utilizándose en un sistema de biofertilización (1), donde se mantiene el concepto de riego y fertilización simultáneas, pero se cambia el

fertilizante a base de sustancias químicas inorgánicas NPK, por biomasa de microalgas producidas *in-situ*.

Ahora bien, ahondando aún más en la configuración del sistema de biofertilización (1), éste está conformado por un fotobiorreactor (2) tipo airlift de tubos concéntricos para el cultivo de microalgas, donde el tubo externo (2.1) está hecho de manguera de polietileno y el tubo interno (2.2) de PVC. El fotobiorreactor (2) (Ver figura No.4) cuenta también con un compresor de aire conectado al sistema (1), que burbujea aire desde el fondo, y una fuente de luz LED (2.4) (Ver figura No.5). Asimismo el sistema de biofertilización (1) cuenta con un sistema de alimentación (3) para el fotobiorreactor (2) compuesto por un tanque reservorio (3.1) de polietileno y una bomba de agua (3.2) conectada al fotobiorreactor (2) (Ver figuras No.1 y No.3). Por último el sistema de biofertilización (1) también cuenta con un arreglo de tuberías (4) de PVC (Ver figura No.7) para el riego del cultivo usando el agua rica en microalgas proveniente del fotobiorreactor (2).

El sistema (1) se alimenta con agua residual para reciclar los nutrientes presentes en ésta, incorporándolos a la biomasa microalgal. El fotobiorreactor (2) mantiene condiciones apropiadas para el crecimiento de las microalgas mediante una buena aireación e iluminación, contralada electrónicamente. La biomasa microalgal producida en el fotobiorreactor (2) es la que actúa como fertilizante, de manera que al estar suspendida en el agua permite la irrigación y fertilización simultánea de un cultivo. Esto se logra mediante el arreglo de tuberías (4). La combinación de un fertilizante biológico con un sistema de irrigación se denomina biofertilización (1).

En cuanto al montaje del sistema de biofertilización (1), éste se compone de un fotobiorreactor (2) que es un biorreactor tipo *airlift* de tubos concéntricos, donde el tubo externo (2.1) debe ser transparente. Como una configuración preferida el tubo externo (2.1) está hecho de manguera de polietileno de alta densidad de 12 pulgadas (304.8 mm) y el tubo interno (2.2), como una configuración preferida es tubería PVC para ventilación de 3 pulgadas (76.2 mm) de diámetro. Estos 2 tubos (2.1, 2.2) deben ser resistentes al agua para evitar la corrosión, lo que se logra

empleando material plástico. En este fotobiorreactor (2) se cultivan microalgas, las cuales necesitan dióxido de carbono (proveniente del aire) y otros nutrientes como nitrógeno y fósforo. Para el suministro de dióxido de carbono es necesario conectar un compresor de aire al fotobiorreactor (2). El compresor burbujea el
5 aire desde el fondo del fotobiorreactor y por dentro del tubo interno (2.2), con un caudal entre 1 L/min y 4 L/min.

Las microalgas también requieren luz blanca para hacer fotosíntesis y crecer. Esta se suministra a partir de bombillos LED (2.4) de 6500K. La temperatura del
10 fotobiorreactor (2) es controlada por un circuito electrónico (6) conectado a un cordón (6.1) preferiblemente de resistencia de 158 ohm/m, para mantener una temperatura entre 25°C y 28°C. El sistema de alimentación (3) para el fotobiorreactor (2) compuesto por un tanque reservorio (3.1) de polietileno, o cualquier otro plástico, y una bomba de agua (3.2). El tanque reservorio (3.1)
15 contiene agua residual amarilla compuesta por orina y agua, por tanto actúa como fuente de nutrientes. El agua rica en microalgas que sale del fotobiorreactor (2) pasa al arreglo de tuberías (4) que actúa como sistema de riego para llevar la suspensión de biomasa microalgal hasta el suelo. También puede servir como suministro de nutrientes para un cultivo hidropónico. La
20 biomasa que sale del arreglo de tuberías (4), sistema que funciona por gravedad, se degrada en el suelo liberando lentamente los nutrientes que fertilizan el cultivo.

Por otra parte, es común el uso de bolsa de polietileno para la construcción de
25 fotobiorreactores. En este caso, como novedad, agregamos un tubo rígido (2.2) interno al sistema (1), dentro del cual se lleva a cabo el burbujeo. Esto convierte al fotobiorreactor (2) en un fotobiorreactor tipo *airlift*, el cual presenta ventajas en cuanto la aireación y la mezcla. En los fotobiorreactores, el uso de luz es necesario para el crecimiento de microalgas, por otro lado, como novedad, el
30 sistema cuenta con sensor de luz (5), de referencia BH-1750, embebido en resina epóxica, para que se pueda sumergir en agua sin que se dañe.

Una de las alternativas consideradas para este sistema (1) es el uso de cianobacterias fijadoras de nitrógeno (por ejemplo del género *Anabaena*) para

complementar al agua residual como fuente de nitrógeno. Las cianobacterias pueden absorber nitrógeno directamente del aire y es posible cultivarlas en consorcio con las microalgas.

5 Es común usar agua residual para fertilizar cultivos. Sin embargo, no es una práctica recomendable para cultivos de plantas alimenticias. Aquí se propone mantener el uso de agua residual, pero no usarla directamente como fertilizante. En lugar de eso, se reciclan los nutrientes presentes en el agua residual, incorporándolos en la biomasa microalgal mediante el empleo del fotobiorreactor (2).

Es importante presentar algunos resultados que se consiguieron durante las pruebas. Se realizó un montaje utilizando tanto orina como caldo alga como fuente de nutrientes (Ver figura No.9). Luego de tres semanas, se observó un rápido crecimiento y una mayor densidad celular (microalgas), al usar orina, en comparación con experimentos anteriores en donde se alimentaron los reactores con caldo alga en vez de orina. Se concluyó que la orina funciona mejor que el caldo alga, debido a la concentración de nitrógeno (aprox. 7195 mg N / L, basado en datos obtenidos).

20 La figura No.10 muestra los resultados obtenidos al evaluar el crecimiento de una especie de lechuga fertilizada con microalgas. Al utilizar suelo esterilizado por calor (equivalente a un suelo degradado) y suelo sin fertilizar, la adición de microalgas generó un aumento de peso en las lechugas y mantuvo su crecimiento, lo que permite resaltar el efecto nutritivo de la biomasa sobre la recuperación de un suelo degradado o carente de nutrientes. Como control positivo, el suelo fertilizado con orina generó un notable aumento en el peso de la plántula, demostrando su alto potencial como nutriente y fertilizante; aunque cabe recordar que el uso de orina o agua residual no es recomendable para cultivos alimenticios. Los resultados obtenidos en los otros dos ensayos se pueden observar en las figuras No.11 y No.12.

Por otra parte, se determinó que para un óptimo funcionamiento del fotobiorreactor (2) tipo *airlift*, éste se debe operar a temperaturas entre 25°C y 26°C.

Una vez el fotobiorreactor (2) se estabilizó, mientras se alimentaba con orina de forma continua, se pudo aumentar el caudal de alimento desde 2,75 ml/h a 9,6 ml/h y 29 ml/h, obteniéndose hasta 230 ml y 696 ml de suspensión de microalgas por día respectivamente, siendo el fotobiorreactor (2) más estable cuando el caudal de alimentación fue de 9.6 ml/h.

Debido a la alimentación continua, y por lo tanto mayor disponibilidad de nutrientes, el fotobiorreactor (2) fue capaz de alcanzar densidades celulares mucho más altas (alrededor de 0.900 unidades de absorbancia a una longitud de onda de 680 nm) que las logradas con el mismo reactor operando por lotes (0.400).

En el momento de cambiar el régimen de operación del fotobiorreactor (2) del tipo por lotes al tipo continuo, se debe empezar con caudales de alimento bajos y luego aumentarlos gradualmente, teniendo en cuenta que el fotobiorreactor (2) muestra mejor respuesta cuando el cambio se realiza en una fase estable (poca variación de la densidad celular). Se sugiere realizar los cambios en absorbancias mayores a 0.600. En caso de que se detecte una disminución alta de la absorbancia (valores menores a 0.450), es recomendable volver al caudal anterior con el fin de que el sistema no muera.

Una vez el fotobiorreactor (2) se logra estabilizar, es posible mantener su funcionamiento por periodos largos de tiempo (107 días para el caso del experimento) y llegar a recuperar grandes cantidades de biomasa (230 ml/día).

Debido al reemplazo del fertilizante inorgánico NPK por biofertilizante a partir del reciclaje de nutrientes contenidas en aguas residuales amarillas, en el sistema de biofertilización se encuentran ventajas como la disminución de dióxido de carbono atmosférico que es una de las causas del calentamiento global, disminución de costos de operación en la fertilización inorgánica y mitigación de los peligros al utilizar mezclas fertilizantes o agua residual sin procesar.

Por otra parte, la operación del sistema de riego puede ser por gravedad, y el sistema completo de biofertilización puede funcionar en ambientes abiertos y cerrados (como invernaderos) para la producción de biomasa microalgal y su uso como fertilizante. Adicionalmente, este sistema puede funcionar a partir de energías renovables si se reemplaza la luz LED, por luz solar, lo cual es una

solución de bajo costo para el reciclaje de nutrientes contenidos en aguas residuales.

En cuanto al biofertilizante producido *in-situ*, dado que éste se consigue a partir del reciclaje de nutrientes contenidos en aguas residuales amarillas, no se tiene porque utilizar agua potable destinada para uso humano, de manera que es un proceso respetuoso con el medio ambiente que adicionalmente remueve dióxido de carbono del ambiente gracias a la fotosíntesis llevada a cabo por las microalgas. También se pueden tener tasas de producción de microalgas elevadas ya que las cosechas son diarias, generando una biomasa con un excelente perfil bioquímico, puesto que además del contenido de carbono, nitrógeno y fósforo, similar al de otros microorganismos, también contienen cantidades importantes de potasio, el cual es indispensable para la fotosíntesis, propia tanto de plantas como de microalgas.

Los criterios específicos son los siguientes:

- **Temperatura de cultivo de microalgas**

El fotobiorreactor (2) produce biomasa de microalgas en condiciones de temperatura entre 25-28 ° C (grados centígrados).

- **Intensidad lumínica suministrada al fotobiorreactor (2)**

Al fotobiorreactor (2) se le deben proporcionar condiciones apropiadas de intensidad de luz para el crecimiento de microalgas, con una intensidad lumínica entre 2000 y 4000 lux.

- **Biofertilización**

Fertilización y riego simultáneo con ahorro de costes económicos. Esta palabra es una combinación 3 palabras: biológico, fertilización e irrigación.

- **Reciclaje de nutrientes**

El reciclaje eficiente de nutrientes es de un 90% en aguas residuales cuando se utilizan microorganismos fotosintéticos en un fotobiorreactor que funciona de manera continua.

- **Tiempo de retención hidráulico**

El sistema de biofertilización (1) debe tener un tiempo de retención hidráulico de alrededor de 20 días. Éste se calcula del cociente entre el volumen del reactor y el caudal de alimentación con aguas residuales amarillas.

- **Selección de la Microalga**

Se requieren microorganismos de fácil crecimiento como aquellos de los géneros *Clorella* y *Scenedesmus*. Estos microorganismos se encuentran presentes en la mayoría de cuerpos de agua dulce.

Tecnología propuesta

- **Compresor de aire (2.3):** mantiene el flujo de aire (dióxido de carbono atmosférico) y genera mezclado dentro del reactor *airlift*.
- **Tubo concéntrico (2.2):** genera mezclado ascendente dentro del reactor *airlift*.
- **Circuito electrónico (6):** mantiene condiciones de temperatura controladas en el sistema (1) mediante un cordón de resistencia (6.1) y un termostato (6.2).
- **Sensor de luz (5):** mide la intensidad lumínica.
- **Lámpara led (2.4):** suministra la radiación visible para la fotosíntesis.
- **Tubería de riego (4):** transporta la suspensión de microalgas para su uso como fertilizante y agua de riego.