



Implementación de sistemas de oxigenación para mejorar el desarrollo de plantas en invernaderos de horticultura

Implementation of oxygenation systems to improve the development of plants in horticultural greenhouses

Implementação de sistemas de oxigenação para melhorar o desenvolvimento de plantas em estufas hortícolas

Fabián Bastidas^I

fbastidas@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-3238-4072>

Santiago López^{II}

sa_lopez@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-6314-6299>

Lidia Castro^{III}

lidia.castro@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-0471-2879>

Christian Flores^{IV}

giovanni.flores@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-0132-8326>

Correspondencia: fbastidas@epoch.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 23 de marzo de 2022 * **Aceptado:** 12 de abril de 2022 * **Publicado:** 29 de mayo de 2022

- I. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- IV. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Resumen

Las plantas del invernadero de horticultura no se desarrollan de la manera adecuada debido a la falta de oxígeno disuelto en el agua, por lo que se realiza un estudio de los métodos y sistemas de oxigenación más utilizados en la industria, para lo cual se analiza las características principales de cada uno de ellos, y por tanto escoger los tres más adecuados para ser implementados en los tanques que se encuentran parcialmente abandonados dentro del invernadero de horticultura de la Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH. En este caso los sistemas por recirculación, por gravedad y mecánico, son seleccionados con el propósito de obtener mediciones de oxígeno disuelto por encima de 7 mg/l, se realizaron tomas con un medidor de oxígeno que arrojaron datos correspondientes de cada uno y se determinó que los tres aumentan el oxígeno disuelto de tal manera que cumplen con las necesidades requeridas, hay que tomar en cuenta que para recomendar un sistema de oxigenación se debe considerar el incremento de la cantidad de oxígeno disuelto y el factor económico.

Considerando la parte técnica, es decir el diseño del sistema y análisis costo beneficio la opción más recomendada para el mejoramiento del nivel de oxígeno en un cultivo hidropónico es el sistema mecánico, cabe mencionar que se implementó un sistema de control mediante un temporizador para programación de riego cuya finalidad es controlar que la cantidad de oxígeno disuelto se mantenga constante, para esto se tomaron datos cada cinco minutos sin que los sistemas de oxigenación estén en funcionamiento, y se concluyó que el tiempo más óptimo de oxigenación es de 30 segundos cada 5 minutos, esto evita que se produzca una caída considerable de oxígeno disuelto. Al final de la experimentación se realizó un cultivo hidropónico de lechugas en cada uno de los tanques para evaluar el desarrollo y crecimiento de las plantas cuando se ha incrementado la cantidad de oxígeno por medio de los sistemas implementados.

Palabras Clave: cultivo hidropónico; mecánico; oxígeno disuelto; recirculación.

Abstract

The plants of the horticultural greenhouse do not develop properly due to the lack of dissolved oxygen in the water, for which a study of the most used oxygenation methods and systems in the industry is carried out, for which the main characteristics of each one of them, and therefore choose the three most suitable to be implemented in the tanks that are partially abandoned inside the horticultural greenhouse of the Faculty of Natural Resources of the ESPOCH. In this case, the

recirculation, gravity and mechanical systems are selected with the purpose of obtaining measurements of dissolved oxygen above 7 mg/l, shots were made with an oxygen meter that yielded corresponding data for each one and it was determined Since all three increase dissolved oxygen in such a way that they meet the required needs, it must be taken into account that in order to recommend an oxygenation system, the increase in the amount of dissolved oxygen and the economic factor must be considered.

Considering the technical part, that is, the design of the system and cost-benefit analysis, the most recommended option for improving the oxygen level in a hydroponic culture is the mechanical system, it is worth mentioning that a control system was implemented through a timer for programming of irrigation whose purpose is to control that the amount of dissolved oxygen remains constant, for this data was taken every five minutes without the oxygenation systems being in operation, and it was concluded that the most optimal time of oxygenation is 30 seconds every 5 minutes , this prevents a considerable drop in dissolved oxygen from occurring. At the end of the experimentation, a hydroponic cultivation of lettuce was carried out in each of the tanks to evaluate the development and growth of the plants when the amount of oxygen has been increased by means of the implemented systems.

Keywords: hydroponic culture; mechanic; dissolved oxygen; recirculation.

Resumo

As plantas da estufa hortícola não se desenvolvem adequadamente devido à falta de oxigênio dissolvido na água, para o que é realizado um estudo dos métodos e sistemas de oxigenação mais utilizados na indústria, para o qual são apresentadas as principais características de cada um deles , e por isso escolher os três mais adequados para serem implementados nos tanques que estão parcialmente abandonados dentro da estufa hortícola da Faculdade de Recursos Naturais da ESPOCH. Neste caso, os sistemas de recirculação, gravidade e mecânico são selecionados com o objetivo de obter medições de oxigênio dissolvido acima de 7 mg/l, foram feitos disparos com um medidor de oxigênio que forneceu dados correspondentes para cada um e foi determinado Como todos os três aumentam oxigênio dissolvido de forma que atendam às necessidades requeridas, deve-se levar em conta que, para recomendar um sistema de oxigenação, deve-se considerar o aumento da quantidade de oxigênio dissolvido e o fator econômico.

Considerando a parte técnica, ou seja, o projeto do sistema e a análise de custo-benefício, a opção mais recomendada para melhorar o nível de oxigênio em uma cultura hidropônica é o sistema mecânico, vale ressaltar que foi implementado um sistema de controle através de um temporizador para programação de irrigação cuja finalidade é controlar que a quantidade de oxigênio dissolvido permaneça constante, pois este dado foi obtido a cada cinco minutos sem que os sistemas de oxigenação estivessem em operação, e concluiu-se que o tempo ideal de oxigenação é de 30 segundos a cada 5 minutos, isso evita que ocorra uma queda considerável no oxigênio dissolvido. Ao final da experimentação, foi realizado um cultivo hidropônico de alface em cada um dos tanques para avaliar o desenvolvimento e crescimento das plantas quando a quantidade de oxigênio foi aumentada por meio dos sistemas implementados.

Palavras-chave: cultura hidropônica; mecânico; oxigênio dissolvido; recirculação.

Introducción

El oxígeno es un elemento gaseoso primordial para todos los seres con vida del planeta tierra (Oroxón Fuentes, 2017), ya que este elemento es esencial en los procesos de respiración de casi todas las células vivas, por lo que el oxígeno nos permite permanecer con vida a todos los seres que habitamos en el planeta, este se encuentra en el aire y es el 23% de su masa y el 21% de su volumen, por lo que es el elemento más abundante después del nitrógeno (Avecillas Arellano, 2014).

La cantidad de oxígeno disuelto es uno de los parámetros importantes para que exista un ambiente adecuado que permita el desarrollo de los seres vivos que habitan un ecosistema acuático, muchas de estas especies necesitan de estos valores para la subsistencia de las especies, (Vásquez Salazar et al., 2014).

Una baja concentración de oxígeno en el agua provoca que los seres que se desarrollan en este medio no crezcan de manera adecuada, notándose enfermedades, malformaciones, reducciones de tamaño y aumento en la tasa de mortandad de las especies (Vásquez Salazar et al., 2014).

Si la cantidad de oxígeno disuelto está por debajo del rango necesario se puede optar por implementar los distintos mecanismos y sistemas existentes para incrementar el oxígeno en el agua (Oroxón Fuentes, 2017). Estos sistemas mantienen en constante movimiento al agua por lo que ayudan a romper la tensión superficial y aumentar el área de contacto facilitando el intercambio de oxígeno entre el agua y el medio ambiente, además distribuyen de manera uniforme el oxígeno en

toda la masa de agua (García Mercado, 2010). En Ecuador se utilizan estos mecanismos principalmente para la crianza de camarones y peces debido a que bajas concentraciones pueden causar pérdidas económicas muy altas, por el bajo peso y hasta la muerte de las especies. También se los utiliza para cultivos hidropónicos, conocidos como técnica de la película de nutriente, donde las plantas crecen sobre una lámina de agua en continuo movimiento, y son enriquecidas con soluciones nutritivas (Mohammed, 2018), reduciendo el consumo de agua y evitando la aplicación de algún tipo de pesticida, (Jordan, Rodrigo; Riveiro Evaldo; De Oliveira, Fabricio; Geisenhoff, Luciano; Martins, 2018).

Método

Medidor de oxígeno y calibración

Para las mediciones de los niveles de oxígeno dentro de los tanques se utilizó el medidor de marca Milwaukee (Figura 1) que consta de los siguientes elementos:

- Monitor
- Sonda
- Protector de la sonda
- 5 membranas
- Empaques
- Solución Electrolite
- Destornillador de calibración (propio del equipo)



Figura 1. Medidor de Oxígeno Disuelto

Para calibrar el medidor de la Figura 1, se debe conectar la sonda al monitor, se quita la protección roja y negra, se introduce el empaque en la membrana, después se coloca la membrana en la sonda

y la se llena de la solución electrolite. Se procede a encender el monitor y a dejar la sonda colgada unos minutos, a continuación, con el destornillador y oprimiendo la tecla CAL se ajusta la calibración a 100 (perilla 100%), y así el equipo quedaría listo para utilizar, solamente se introduce la sonda en el agua y se lee el valor en el monitor(Mayarí Navarro, Rogelio, 2005).

Para estar totalmente seguros de que el equipo este bien calibrado y de valores reales de oxígeno disuelto, se disuelve silica 3 en agua, esta provoca que se desoxigene totalmente, se realiza la medición comprobando el valor de cero.

Reconocimiento de los tanques

La investigación se realiza en los tanques de agua para cultivo hidropónico en el invernadero de horticultura en la Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH.

Son tres tanques que se encontraron parcialmente abandonados y en mal estado ya que tenían grietas y filtraciones, por lo que se procede a realizar los arreglos respectivos. Se coloca pintura impermeable para evitar las filtraciones y se puso malla en las grietas.

Una vez corregidas las fallas en los tanques se llenan, para verificar que el agua no filtre obteniendo resultados positivos, además se obtuvo la cantidad de oxígeno disuelto en los tres tanques con el medidor dándonos una media de 6,2mg/l y para lograr un crecimiento normal y una baja mortalidad, los valores mínimos de oxígeno disuelto se deben mantener por encima de 7 mg/l (Vásquez Salazar, Rubén Darío et al., 2014), valores menores reducen el crecimiento e incrementan la mortandad (Dan Dettmers; Kyle Booth, 2009), por lo que se decide implementar diferentes sistemas de oxigenación para cada tanque y analizar el que más oxígeno disuelto incrementa y que influencia tiene en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Se toma medidas de todas las dimensiones de los estanques, que tienen una profundidad de 0.36 m y un volumen de 13.67 m³, estas medidas son muy importantes para seleccionar los equipos adecuados para cada sistema, como se puede observar en la Figura 2.



Figura 2. Tanques en el invernadero de horticultura

Selección de sistemas de oxigenación

Se estudian los métodos de oxigenación del agua mediante la revisión de material bibliográfico entre los que tenemos:

- Sistema mecánico
- Sistema de inyección de aire
- Sistema por recirculación
- Sistema por bomba vertical
- Sistema por superficie lenta
- Sistema por gravedad

La correcta selección del método de oxigenación en los tanques conlleva un análisis de la demanda de oxígeno, asegurando de esta manera seleccionar un sistema que alcance el rendimiento esperado sin exceder la demanda energética razonable (Andrade Loor; Peña Muñoz, 2017).

Mediante un análisis de ponderación donde se toma en cuenta principalmente la transferencia de oxígeno, el costo y facilidad de implementación, se seleccionan tres sistemas para implementar en los tanques de agua de riego del invernadero de horticultura.

En la Figura 3 se aprecia que los sistemas que transfieren más oxígeno son: mecánico, superficie lenta y por gravedad (Ronzado, E; Danpena, J, 2015).

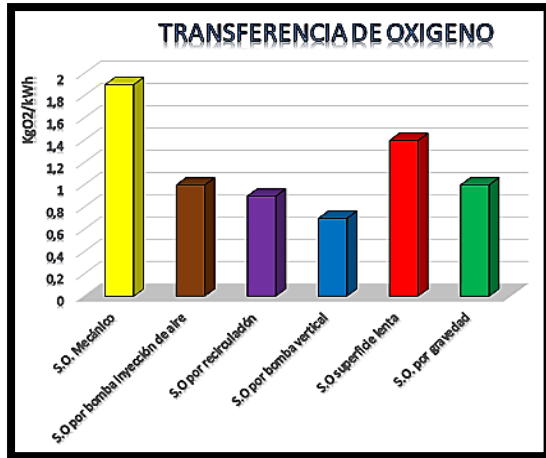


Figura 3. Parámetro de la transferencia de Oxígeno

El costo de implementación se puede observar en la Figura 4, donde se indica que los sistemas menos costosos para implementar en un cultivo hidropónico son: mecánico, por recirculación y por gravedad (Ronzo, E; Danpena, J, 2015).

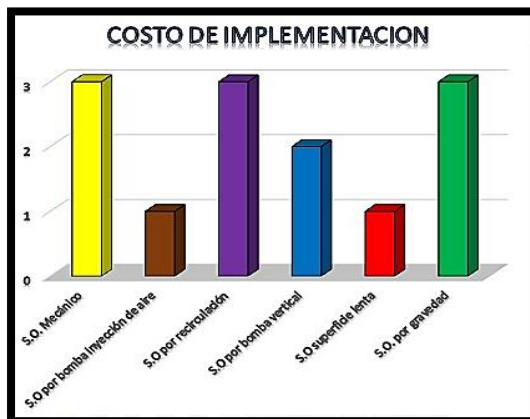


Figura 4. Parámetro de Costo de implementación

El parámetro de facilidad de implementación de los sistemas de oxigenación, se pueden ver en la Figura 5, donde la gráfica de barras presenta que todos los sistemas son fáciles de implementar a excepción del sistema de oxigenación de superficie lenta (Ronzo, E; Danpena, J, 2015).



Figura 5. Parámetro de facilidad de implementación

Analizando las ventajas y desventajas de los sistemas de oxigenación estudiados y las características de los tanques, se seleccionan los sistemas de oxigenación mecánico, por recirculación y por gravedad como los óptimos para ser implementados en el invernadero de horticultura, la ponderación se detalla en la Figura 6.

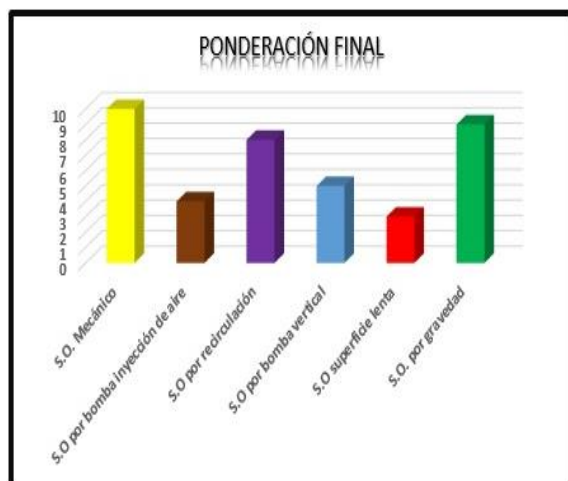


Figura 6. Ponderación de los diferentes sistemas de oxigenación para la selección.

Implementación de los Sistemas de Oxigenación

a) Sistema de Oxigenación por recirculación

Principio de funcionamiento: Recircular el agua para que vuelva a introducirse en el tanque por medio de una manguera con agujeros en el fondo, generando una columna de agua que provoca la

ruptura de la tensión superficial desde la parte inferior del tanque, para que exista el intercambio de Oxígeno Disuelto. Durante este trayecto, las burbujas causan el movimiento y la mezcla del líquido en el tanque y también generan una superficie turbulenta que provocan la oxigenación del agua (Durán Herrera, E; Rojas Meza, G, 2006).

En la Figura 7, se observa el momento de la ruptura de la tensión superficial, lo que permite el intercambio de Oxígeno entre el aire y el agua (Maksymenko, 2014).



Figura 7. Rotura de la tensión superficial desde la parte inferior del tanque

Principales características del sistema por recirculación:

- Económico
- Promedio de transferencia de Oxígeno de 0.9 KgO₂/kw.h
- Genera Burbuja Fina
- Fácil de Instalar

Materiales utilizados en el sistema por recirculación

- Bomba Centrífuga
- Tubería
- Accesorio de Tubería
- Manómetros

b) Sistema de Oxigenación por gravedad

Principio de funcionamiento: Recircular el agua para que vuelva a introducirse en el tanque por medio de una manguera con agujeros que está sujeta a soportes con altura suficiente para generar la ruptura de la tensión superficial desde la parte superior (Figura 8), por lo que aprovechan la energía cinética para que exista el intercambio de Oxígeno (Marcillo Morla, 2010).



Figura 8. Sistema de Oxigenación por gravedad

Principales características del sistema por gravedad

- Económico
- Profundidad máxima de Oxigenación de 2m
- Genera burbuja fina
- Fácil de instalar
- Relativamente silencioso
- Promedio de transferencia de Oxígeno de 1 kgO₂/kw.h

Materiales utilizados en el sistema por gravedad

- Bomba Centrífuga
- Tubería
- Accesorio de Tubería
- Soportes
- Manómetros

c) *Sistema de Oxigenación mecánico*

Principio de Funcionamiento: Los rodetes giran para que las paletas de este se introduzcan en el agua para romper la tensión superficial, permitiendo el intercambio de oxígeno (Figura 9). Además, este sistema hace que cierta cantidad de agua salpique, esta cantidad está en contacto directo con el ambiente, por lo que el agua al regresar al tanque tiene una mayor cantidad de oxígeno (Jover Cerdá, 2015). Por el movimiento rotatorio de las paletas se mezcla el agua lo que ayuda a que la

oxigenación sea uniforme en todo el tanque y se formen ondulaciones por lo que aumenta el área de contacto entre el agua y el ambiente (Merino, O ; Sal, F, 2007).



Figura 9. Sistema de Oxigenación mecánico

Principales características del sistema mecánico

- Económico
- Promedio de Transferencia de Oxigenación 1.9 KgO₂/Kw.h
- Fácil de Instalar
- Fácil mantenimiento

Materiales utilizados en el sistema mecánico

- Motor eléctrico
- Correas
- Caja Reductora
- Poleas
- Catalinas
- Ejes de transmisión
- Cadenas
- Chumaceras

Diseño mecánico del rodete

El rodete es el único elemento que se diseña debido a los esfuerzos altos que debe soportar, este diseño se realiza en el software SolidWorks (Figura 10), donde se hace un análisis estático en flow simulation utilizando las propiedades del PLA, este material se utiliza para realizar una impresión 3D del elemento.

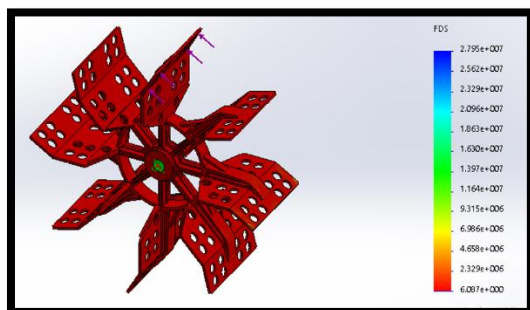


Figura 10. Simulación en solidwords

Tabla 1. Factor de seguridad según la carga

Carga	Factor de seguridad
5 kgf	6.10
10 kgf	3.00
15 kgf	2.00
25 kgf	1.20
30 kgf	1.01
31 kgf	0.98

Este análisis permite determinar la carga que resiste el rodete antes de fracturarse, esto sucede cuando el factor de seguridad es menor a 1. Con los valores que se muestran en la Tabla 1, el rodete resiste hasta una carga de 30kgf. Con la simulación se asegura que los aireadores soportaran las condiciones de trabajo a las que son sometidos y desplazarán la cantidad de agua requerida.

Implementación de un sistema de control

Para programar el tiempo adecuado de encendido y apagado automático de los sistemas y evitar que el oxígeno disuelto baje a menos de 7mg/l y permanezca constante, se implementa un sistema de lazo abierto, dado que el controlador es un temporizador que será programado en función de pruebas previas, se muestran en la (Figura 11), los diagramas de fuerza y de control del sistema.

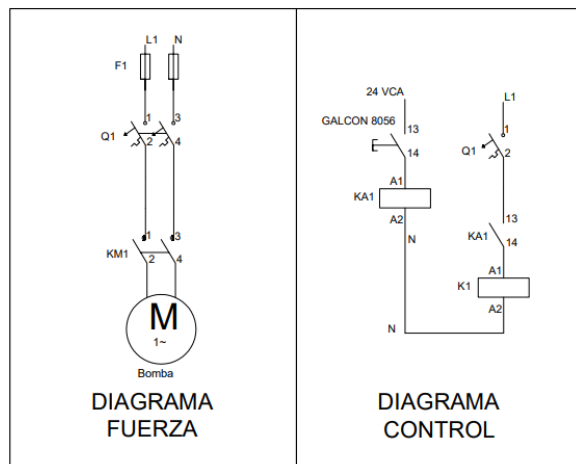


Figura 11. a) Diagrama de Fuerza, b) Diagrama de Control

Además, se considera en la (Figura 12) el sistema de control con los siguientes elementos:

- Temporizador de programación de riego
- Contactor
- Relay de 24V
- Transformador de 120-24V

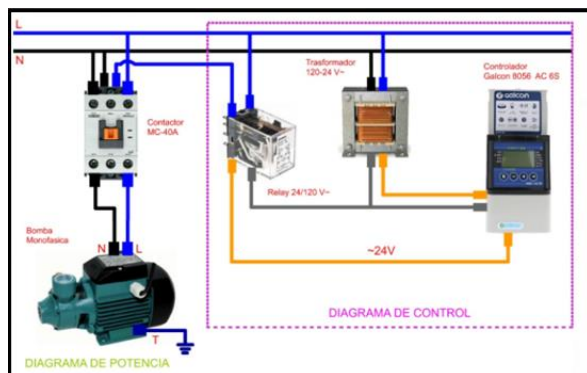


Figura 12. Diagrama del sistema de control

Implementación de sistemas hidropónicos

Una vez instalados los sistemas de oxigenación en cada uno de los tanques, se implementa sistemas hidropónicos con plantas de lechuga para analizar su desarrollo con los diferentes métodos de oxigenación y la cantidad de oxígeno que cada método proporciona. Los principales elementos utilizados para la puesta en marcha de los sistemas son:

- Lechuga hidropónica germinada
- Vasos de Cartón
- Planchas de espumaflex
- Esponja

Análisis Estadístico

Para realizar este análisis se consideran varias mediciones de oxígeno disuelto por varios días, esta información se procesa en Excel Microsoft Office. Con los datos obtenidos se realiza un análisis de varianza y la prueba de Turkey al 5% en Infostat, este procedimiento ayuda a determinar si existen diferencias significativas entre las medidas tomadas para cada sistema con sus repeticiones y posteriormente identificar el que mayor oxígeno disuelto incrementa (Tomalá et al., 2014).

Resultados

Caída de oxígeno disuelto

La Figura 13 indica el tiempo adecuado de oxigenación, donde se analiza la caída de oxígeno disuelto vs el tiempo, tomando datos de oxígeno cada 5 minutos, este intervalo se considera cuando los sistemas trabajan de manera adecuada y se programa un encendido de 30 segundos para poder medir la cantidad de oxígeno disuelto después de airear los depósitos con cada sistema y comprobar que esté en el rango requerido de 7 mg/l a 14mg/l. Cabe mencionar que cuando los sistemas de oxigenación no estén en funcionamiento al cabo de 20 minutos el nivel de oxígeno llega a los 7 mg/l.

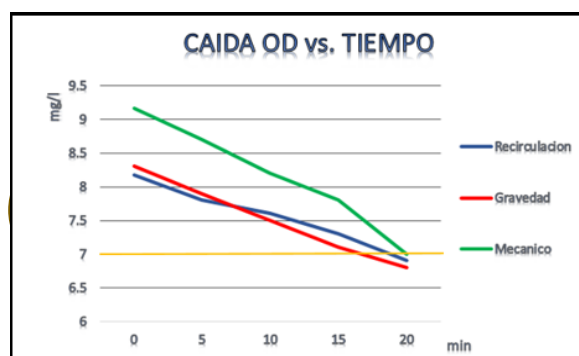


Figura 13. Caída de OD vs Tiempo

Análisis del rendimiento de los sistemas

Para determinar qué sistema es el que mejor rendimiento presenta, es decir mayor cantidad de oxígeno disuelto incrementa, se realiza el análisis de varianza y la prueba de Turkey al 5% con los datos obtenidos. En la Figura 14 se aprecia que el sistema que más oxígeno disuelto incrementa es el mecánico con un valor de 9.17 mg/l.

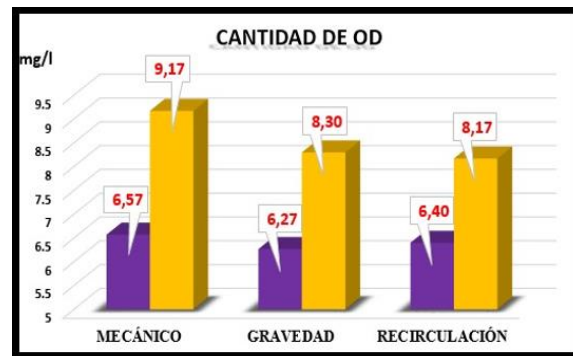


Figura 14. Incremento de Oxígeno Disuelto

Análisis del tamaño y peso de plantas

Para analizar el desarrollo de las plantas en cada uno de los tanques con sus respectivos sistemas de oxigenación, se compara el tamaño entre ellas cada semana. En la Figura 15 se observa que la lechuga que se oxigenó con el sistema mecánico tiene un mejor desarrollo por lo que es más grande.



Figura 15. Lechugas en desarrollo

De la misma manera se realiza la comparación de tamaño entre lechugas de los diferentes tanques cuando terminaron su desarrollo y estaban listas para consumir (Figura 16), pero además se toma los datos de sus respectivos pesos y se calcularon valores medios que se detallan en la Tabla 2.



Figura 16. Lechugas listas para el consumo

Tabla 2. Precio y Peso de lechugas

Sistema	Peso	Precio
S.O. Mecánico	457.68 g	0.55
S.O. Gravedad	312.73 g	0.40
S.O. Recirculación	209.28 g	0.30

Relación Costo-Beneficio

Para seleccionar el sistema más rentable, se realizó la relación costo-beneficio proyectado a un año de producción. En la Tabla 3 se aprecia que el sistema económicamente más rentable es el sistema mecánico con un valor de 118.78% y una relación costo –beneficio de 2.19, seguido por el sistema por gravedad con 75.13% de rentabilidad y una relación de 1.75, finalmente se tiene al sistema por recirculación con una rentabilidad de 67.05 % y un valor de 1.67. Cabe indicar que estos valores que se obtienen de este análisis permiten considerar el sistema de oxigenación más adecuado para

los cultivos hidropónicos que se implementaran en el invernadero de horticultura de la Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH.

Tabla 3. Relación Costo-Beneficio

Sistemas	Relación beneficio/costo	Rentabilidad (%)
S.O. Mecánico	2.19	118.78
S.O. Gravedad	1.75	75.13
S.O. Recirculación	1.67	67.05

Discusión

Para implementar los sistemas de oxigenación se debe primero analizar las condiciones de trabajo, principalmente las dimensiones de los estanques ya que es importante conocer la profundidad del estanque y el volumen de agua a oxigenar para seleccionar los equipos adecuados, también hay que identificar la cantidad de oxígeno requerido ya que de esa cantidad depende el tiempo de oxigenación.

En la Figura 14 se aprecia que el sistema que más oxígeno disuelto incrementa es el mecánico con un valor de 9.17mg/l., seguido por el sistema por gravedad con 8.30 mg/l y finalmente un valor de 8.17 mg/l el sistema por recirculación. Se observa también que en un inicio el agua de los tres tanques no tiene la cantidad de oxígeno requerida y que todos los sistemas cumplen con el nivel mínimo de 7mg/l.

La Figura 15 presenta el desarrollo que se ha logrado en las plantas de lechuga después de estar sometidas a los diferentes sistemas de oxigenación, donde se evidencia que el mecánico es el que mejor rendimiento presenta produciendo una mayor cantidad de oxígeno disuelto y por tanto un crecimiento significativo de las plantas en relación con los demás, razón por la cual las plantas que se alimentan con esta agua tendrán una mejor asimilación de nutrientes y se desarrollan de mejor forma. En cambio, se puede observar que las lechugas que se encuentran dentro del tanque con un

sistema de oxigenación por recirculación son las de menor tamaño y por ende menor cantidad de oxígeno disuelto.

La Tabla 2 permite identificar el precio y tamaño de las lechugas, donde se confirma que el sistema que proporciona una mejor calidad de lechugas es el sistema mecánico, por tanto, las plantas que salgan del tanque con este método de oxigenación tienen un precio un poco más alto. Se puede apreciar la influencia del oxígeno disuelto en el agua para el desarrollo de las plantas, ya que mientras mayor cantidad de oxígeno el desarrollo de las lechugas es considerable.

La Tabla 3 muestra una relación costo beneficio de los sistemas de oxigenación donde el mecánico genera más oxígeno disuelto y presenta un mejor desarrollo en las lechugas, es por eso que la rentabilidad que proporciona este sistema en el crecimiento de los cultivos es superior, comparándolo con cultivos que se realizan de manera tradicional. Considerar que el costo de implementación de este método es más alto, comparándolo con el de gravedad que tendrá un costo inferior.

Para tener un mayor enriquecimiento de nutrientes en el agua se debe tomar en cuenta parámetros como son el nivel de PH y la salinidad, que conjuntamente con el oxígeno disuelto crean un ambiente adecuado para el desarrollo de las plantas en un cultivo hidropónico.

Conclusiones

El método de ponderación permitió conocer detalladamente las características principales de los sistemas de oxigenación más utilizados, permitiendo así seleccionar las tres mejores alternativas para las condiciones de los tanques y el requerimiento de las plantas, que son por recirculación, por gravedad y mecánico.

Al realizar el análisis estadístico entre los tres sistemas de oxigenación implementados, se determinó, que el sistema mecánico es el que más oxígeno disuelto incrementa, con un promedio de 9,2 mg/l para que las plantas asimilen de mejor manera los nutrientes y obtengan un mejor desarrollo.

Las lechugas que se desarrollaron en el tanque con mayor cantidad de oxígeno presentaron un mejor tamaño y peso, por lo que la cantidad de oxígeno disuelto en el agua influye directamente en el crecimiento de las plantas.

El sistema que presenta una mejor relación costo-beneficio es el sistema mecánico con un valor de 2,19 además tiene una rentabilidad bastante alta de 118,78%, incrementando el desarrollo de las lechugas, por tanto, el precio de estas aumenta.

Los tres sistemas de oxigenación implementados lograron cumplir con el requerimiento de oxígeno, cada uno entrega un valor diferente de oxígeno disuelto al agua, pero todos ellos sobre el nivel mínimo de 7mg/l, de tal forma que todas las lechugas crecieron de manera adecuada sin presentar ninguna enfermedad.

Para mantener constante la cantidad de oxígeno disuelto en los tanques se determinó un tiempo adecuado de oxigenación de treinta segundos cada cinco minutos, evitando que pase el límite inferior recomendado y las lechugas presenten problemas en su desarrollo, logrando esto con la adición de un sistema de automatización para los tres sistemas.

Referencias

1. Andrade Loor, Fernando; Peña Muñoz, M. (2017). Universidad de cuenca [Universidad de Cuanca]. [http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/27413/1/Trabajo de Titulación.pdf](http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/27413/1/Trabajo%20de%20Titulaci3n.pdf)
2. Avelillas Arellano, L. A. (2014). Caracterización Físico-Químico del Estereo Salado [Universidad de Guayaquil]. <https://1library.co/document/z1dm44ez-caracterizacion-fisico-quimico-estero-salado-kennedy-efectuado-periodo.html>
3. Dan Dettmers; Kyle Booth. (2009). Oxígeno Disuelto para un mejor crecimiento. Quest. <https://www.questclimate.com/es/dissolved-oxygenbetter-growth-part-plants-need/>
4. Durán Herrera, Esteban; Rojas Meza, G. (2006). Efecto de contaminantes sobre la transferencia de oxígeno en sistemas de aeración analizado mediante un modelo de dos zonas simplificado. Revista de Ciencia y Tecnología, 24(2), 109–127. <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/cienciaytecnologia/article/view/2642>
5. García Mercado, H. D. (2010). Evaluación de transferencia de oxígeno en el sistema de tratamiento con lodos activados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria en la Ciudad de México [Universidad Nacional Autónoma de México]. https://repositorio.unam.mx/contenidos/evaluacion-de-transferencia-de-oxigeno-en-el-sistema-de-tratamientos-con-lodos-activados-de-la-planta-de-tratamiento-d-176788?c=y1dMK3&d=true&q=*&i=1&v=1&t=search_0&as=0

6. Jordan, Rodrigo; Riveiro Evaldo; De Oliveira, Fabricio; Geisenhoff, Luciano; Martins, E. (2018). Yield of lettuce grown in hydroponic and aquaponic systems using different substrates. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(8), 525–529. <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/RBT7RqMs95xZZggZbpgw7tg/?lang=en>
7. Jover Cerdá, M. (2015). *Sistemas de Oxigenación*. Grupo de Agricultura y Biodiversidad. <https://georgiusm.files.wordpress.com/2015/09/oxigenacic3b3n2016.pdf>
8. Maksymenko, O. (2014). Burbujas de aire en la superficie del agua. Alamy. <https://www.alamy.es/foto-burbujas-de-aire-en-la-superficie-del-agua-92938845.html>
9. Marcillo Morla, F. (2010). *Uso de Aireación en camaroneras*. Repositorio ESPOL. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/8971/1/Aireacion.pdf>
10. Mayarí Navarro, Rogelio; Espinosa Lloréns, Ma. del C.; Gutiérrez Marcelina Ruiz, J. (2005). Validación de La Determinación de Oxígeno Disuelto y Demanda Bioquímica de Oxígeno en Aguas y Aguas Residuales. (Spanish). *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 36. <http://ezproxy.net.ucf.edu/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=27617642&site=ehost-live>
11. Merino, O ; Sal, F. (2007). *Sistemas de Recirculación y Tratamiento de agua*. https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/acuicultura/cultivos/_archivos/000000_Otros sistemas/000003-Sistemas de recirculación y tratamiento de agua.pdf
12. Mohammed, S. (2018). *Designing of NFT Hydroponic System*. SpringerBriefs in Plant Science. Springer, Cham. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-99202-0_3
13. Oroxón Fuentes, J. L. (2017). *Diseño de Oxigenador de Agua Programable para estanques* [Universidad de San Carlos Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/8241/1/José Lisandro Oroxón Fuentes.pdf>
14. Ronzado, Eduardo; Danpena, J. L. (2015). *Tratamiento Biológico de las Aguas Residuales* (D. de Santos (ed.)). https://www.imosver.com/es/ebook/tratamiento-biologico-de-las-aguas-residuales_E0002575927
15. Tomalá, D., Chavarría, J., & Escobar, B. E. A. (2014). Evaluación de la tasa de consumo de oxígeno de *Colossoma macropomum* en relación al peso corporal y temperatura del agua. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(5), 971–979. <https://doi.org/10.3856/vol42-issue5-fulltext-4>

16. Vásquez Salazar, Rubén Darío; Pupo Urrutia, Adrián Camilo; Jiménez Aguas, H. J. (2014). Sistema energéticamente eficiente y de bajo costo para controlar la temperatura y aumentar el oxígeno en estanques de cultivo de alevines de tilapia roja An Energy Efficient and Low Cost System, to Control the Temperature and the Oxygen Increase, in the R. Revista Facultad de Ingeniería (Fac. Ing.), 23(36), 9–23. <http://www.scielo.org.co/pdf/rfing/v23n36/v23n36a02.pdf>

© 2022 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).