

MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE LA RENTABILIDAD DE UNA GRANJA VERTICAL PARA LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA CON LUZ LED

Daniel Fuentes Morales^{*}; José Antonio Quevedo Tiznado²; José Agustín Breña Naranjo³

¹Posgrado. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Blvd. Paseo Cuauhnáhuac 8532,
C.P. 62550, Jiutepec, Morelos.
daniel.fuentes@posgrado.imta.edu.mx - 5951152797 (*Autor de correspondencia)

²Subcoordinación de Agua y Alimentos. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532,
Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

³ Coordinación de Seguridad Hídrica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532,
Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

Resumen

La viabilidad del establecimiento de granjas verticales para la producción de lechuga se basa en su rentabilidad, la cual se ve influenciada principalmente por dos parámetros: la inversión inicial y el alto requerimiento de energía eléctrica para la iluminación LED y el sistema de climatización y ventilación (Heating, ventilation and air conditioning, HVAC), en México se carecen de investigaciones que demuestren la rentabilidad de esta tecnología haciendo uso eficiente de la energía eléctrica, razón por la cual el objetivo de este estudio es establecer un modelo que permita conocer la intensidad de luz LED que maximiza la ganancia obtenida en la producción de lechuga en una granja vertical. Se construyó una granja vertical en el interior de una bodega, compuesta por un sistema hidropónico, lámparas LED y un sistema de automatización. Se sembró lechuga Ruby Sky sometida a cuatro intensidades y espectros de luz diferentes con lámparas LED. Después de 40 días de crecimiento se midió el peso fresco, el consumo de agua y energía eléctrica, con los datos se generaron modelos en función de la intensidad de luz y la función objetivo se generó mediante un análisis de ingresos y costos. La ganancia máxima se encontró mediante optimización clásica, obteniéndose que una intensidad de luz de $172.58 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ genera una ganancia máxima de \$590.22. La granja vertical demostró ser rentable haciendo uso eficiente de los recursos al solo necesitarse 100 L y 4.63 m² para obtener \$590.22.

Palabras claves: Hidroponía, .

Introducción

Se estima que la población mundial llegará a 9 mil millones de personas para el 2050 (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2012), en México la población pasará de 127.8 millones a 148.2 millones en 2050 (Consejo Nacional de Población, 2018), este crecimiento poblacional se concentrará en las zonas urbanas, las proyecciones indican que en 2030 62.5% (5 mil millones) de la población mundial vivirán en zonas urbanas y 82.6% de la población de Norte América (United Nations Human Settlements Programme, 2022), el crecimiento urbano desmesurado tendrá como consecuencias el incremento de la contaminación y una mayor demanda de recursos como alimentos, agua, suelo y energía. Para enfrentar estos desafíos se deben implementar tecnologías que produzcan alimentos con un uso eficiente de los recursos y disminuyan la descarga de desechos al medio ambiente, se ha propuesto el uso de granjas verticales en las ciudades como posible solución a dicha problemática (Pinstруп-Andersen, 2018; Benke & Tomkins, 2017; Beacham et al., 2019).

La lechuga es una de las hortalizas más cultivadas en el mundo con un alto valor nutrimental (Still, 2007) y por sus requerimientos agronómicos se cultiva en sistemas bajo tecnologías disruptivas en agricultura urbana o en interiores (Specht et al., 2014). Para su producción en granjas verticales es necesario encontrar la intensidad de luz, longitud de onda y fotoperiodo de las luces LED que permitan obtener el máximo rendimiento con el mínimo consumo de energía eléctrica (Loconsole et al., 2019). En México se carecen de investigaciones que demuestren la rentabilidad de esta tecnología haciendo uso eficiente de la energía eléctrica.

Materiales y Métodos

Modelo de optimización

Para plantear la función objetivo se realizó un balance de ingresos y egresos en una determinada área de siembra, lo cual representa la rentabilidad de la granja vertical.

$$\pi = (TR - TC)A \quad (1)$$

donde π es la ganancia en MXN\$, TR es el total de ingresos en MXN \cdot m⁻², TC es el total de costos en MXN \cdot m⁻² y A es el área sembrada. En el Cuadro 1 se muestran los ingresos y costos de producción considerados en el presente trabajo.

Cuadro 1. Ingresos y costos de producción considerados en el modelo de optimización

Ingresos	
$R_L = P_L Y$	R_L es el ingreso por la venta de lechuga en MXN \cdot m ⁻² P_L es el precio de mercado de la lechuga en MXN \cdot g ⁻¹ Y es el rendimiento de lechuga obtenido en la granja vertical en g \cdot m ⁻²
Costos	

$$C_W = P_W V_C$$

$$C_N = P_N N$$

$$C_E = P_E (E_L + E_{HVAC})$$

$$I = C_V + C_F = \sum_{i=0}^n c_{Vi} + \sum_{i=0}^n c_{Fi}$$

C_W es el costo del agua en $mxn \cdot m^{-2}$

P_W es el precio de mercado del agua en $MXN\$ \cdot L^{-1}$

V_C es el volumen de agua consumida en $L \cdot m^{-2}$

C_N es el costo de los nutrientes en $mxn \cdot m^{-2}$

P_n es el precio de mercado de los nutrientes en $MXN\$ \cdot mL^{-1}$

N es la cantidad de nutrientes utilizados $ml \cdot m^{-2}$

C_E es el costo de la energía eléctrica en $mxn \cdot m^{-2}$

P_E es el precio de mercado de la energía eléctrica en $MXN\$ \cdot kWh^{-1}$

E_L es el consumo de energía eléctrica utilizada para la iluminación en $kWh \cdot m^{-2}$

E_{HVAC} es la cantidad de energía eléctrica utilizada para el HVAC en $kWh \cdot m^{-2}$

I es la inversión en $mxn \cdot m^{-2}$

C_V es el costo variable total en $mxn \cdot m^{-2}$

C_I es el costo fijo total en $MXN\$ \cdot m^{-2}$

c_{Vi} es el costo variable i en $MXN\$ \cdot m^{-2}$

c_{Fi} es el costo fijo i en $MXN\$ \cdot m^{-2}$

Sustituyendo los ingresos y costos del Cuadro 1 en la Ecuación 1 se obtiene la función objetivo.

$$\pi = \left[P_L Y - \left(P_W V_C + P_N N + P_E E_L + P_E E_{HVAC} + \sum_{i=0}^n c_{Vi} + \sum_{i=0}^n c_{Fi} \right) \right] A \quad (2)$$

Para estimar la cantidad de insumos utilizados y el área sembrada se emplean las expresiones mostradas en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Expresiones para estimar la cantidad de insumos utilizados y el área sembrada

Insumos	
$V_C = \frac{Y}{WUE}$	Y es el rendimiento de lechuga obtenido en la granja vertical en $g \cdot m^{-2}$ WUE es la eficiencia de uso de agua en $gFW \cdot l^{-1} \cdot m^{-2}$
$N = nV_C$	N es la cantidad de nutrientes utilizados $ml \cdot m^{-2}$ V_C es el volumen de agua necesaria para satisfacer las necesidades del cultivo en l. n es el volumen de solución nutritiva a utilizar en $mL \cdot l^{-1}$
$E_L = \frac{Y}{EUE}$	Y es el rendimiento de lechuga obtenido en la granja vertical en $g \cdot m^{-2}$ EUE es la eficiencia de uso de energía en $gFW \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$
Área sembrada	
$A = \frac{V_D}{V_C}$	A es el área sembrada V_D es el volumen de agua disponible en l. V_C es el volumen de agua necesaria para satisfacer las necesidades del cultivo en l.

Sustituyendo en la función objetivo las expresiones anteriores obtenemos finalmente la ecuación que nos permitirá obtener los máximos ingresos de nuestra granja vertical.

$$\pi = V_D WUE \left[P_L - P_E \frac{1}{EUE} - \left(\sum_{i=0}^n c_{Vi} + \sum_{i=0}^n c_{Fi} \right) \frac{1}{Y} \right] - V_D (P_W + P_N n) - P_E \frac{V_D WUE}{Y} E_{HVAC} \quad (3)$$

Se buscaron los puntos críticos x_0 , esto es, puntos x_0 tales que $f'(x) = 0$, y en cada uno de dichos puntos se observó el signo de la segunda derivada $f''(x_0)$. Si $f''(x) < 0$, entonces en $f(x_0)$ hay un máximo local de f ; si $f''(x_0) > 0$, entonces $f(x_0)$ es un mínimo local de f ; si $f''(x_0) = 0$, el criterio falla.

$$\begin{aligned} \frac{d\pi}{dI} = V_D WUE & \left[P_E \frac{1}{EUE^2} \frac{dEUE}{dI} + \left(\sum_{i=0}^n c_{Vi} + \sum_{i=0}^n c_{Fi} \right) \frac{1}{Y^2} \frac{dY}{dI} \right] \\ & + V_D \left[P_L - P_E \frac{1}{EUE} - \left(\sum_{i=0}^n c_{Vi} + \sum_{i=0}^n c_{Fi} \right) \frac{1}{Y} \right] \frac{dWUE}{dI} \\ & + P_E V_D \frac{WUE}{Y} E_{HVAC} \left(\frac{1}{Y} \frac{dY}{dI} - \frac{dWUE}{dI} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

6.2. Prototipo de granja vertical

Se diseñó y construyó un prototipo de granja vertical conformada por una bodega exterior de lámina de acero (LargoxAnchoxAlto, 257x142x184 cm), en su interior se colocaron dos estantes de 3 niveles (LargoxAnchoxAlto, 40.4x90.4x183.6 cm) y un sistema hidropónico de raíz flotante que consistía en depósitos de plástico de 39 l con placas de poliestireno de 1" y canastillas hidropónicas de 2". Para la oxigenación se colocó sistema de aireación compuesto por bombas de aire de 80 l (1588, Aquakril, México) y manguera flexible de silicón traslúcido con difusores de aire. Cada nivel contaba con ventiladores de 6" de 117 VCA con 14 W de potencia (Steren, México) para extraer el aire caliente de las lámparas LED (Figura 2).



Figura 2. Prototipo de granja vertical

6.3. Producción

Se sembraron semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) variedad Ruby Sky paletizadas (Rijk Swaan) en espuma agrícola de 144 cavidades (peat FOAM, CDMX, México) en una bodega en total oscuridad, después de dos días cuando la radícula y el hipocótilo rompieron las cubiertas seminales, se colocaron las plántulas a una intensidad de luz de $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ proporcionada por lámparas LED (Samsung LM301B, Green Grow) a un fotoperiodo de 18 horas de luz y 6 de oscuridad diarias (18/6 h·d⁻¹). Cuando las plántulas alcanzaron 2 hojas verdaderas (15 días después de la siembra, DAS) las plántulas se trasplantaron al sistema hidropónico de raíz flotante, colocando 8 plántulas por balsa (0.365 m²) dando una densidad de 22 plantas·m⁻², donde se le dio seguimiento al cultivo durante 25 días después del trasplante (DAT) para completar un ciclo de 40 días.

$200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

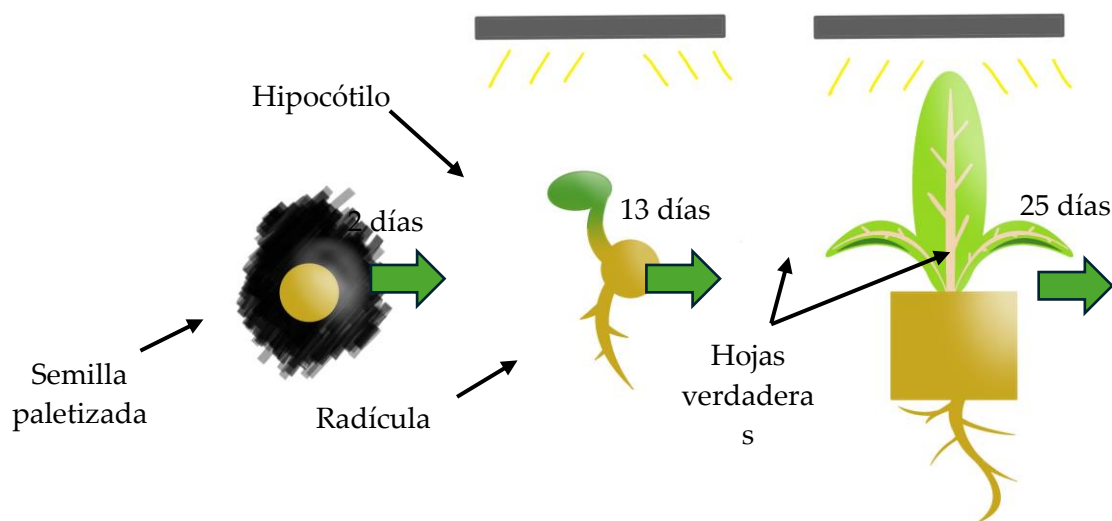


Figura 2. Proceso de producción de lechuga italiana (variedad Ruby Sky) en el prototipo de granja vertical.

La nutrición de las plantas se llevó a cabo con una solución nutritiva para producción de hortalizas de hoja (Hid Cme, México) compuesta por una solución A con los macronutrientes y una solución B con micronutrientes (Tabla 1). Para los primeros 10 días de siembra se emplearon 5.0 mL de A y B por cada litro de agua, esta cantidad de solución madre se midió mediante una pipeta graduada clase A (Sileii, Civeq), posterior a los 10 días se utilizaron 10.0 mL de A y B por cada litro de agua, la medición se realizó con un vaso de precipitados (Pyrex). Después del trasplante la solución nutritiva se reemplazó completamente cada 15 días y se midió el consumo de agua en el periodo. El pH de la solución nutritiva se mantuvo en el rango de 5.5-6.5 midiéndose con tiras reactivas. Al final del ciclo de cultivo, se midió con una balanza de precisión el peso fresco (FW) de cada lechuga sin raíz, el rendimiento se obtuvo con la expresión siguiente:

$$Y = \frac{\overline{FW} * N_p}{A} \quad (5)$$

Donde Y es el rendimiento en $gFWm^{-2}$, \overline{FW} es el peso fresco promedio en g, N_p es el número de lechugas y A es el área cosechada en m^2 .

La eficiencia del uso del agua (WUE) se determinó con la ecuación.

$$Y = \frac{\overline{FW} * N_p}{A} \quad (6)$$

Donde WUE es la eficiencia de uso de agua en $gFW \cdot l^{-1} \cdot m^{-2}$, Y es el rendimiento en $gFW \cdot m^{-2}$ y V_c es el volumen de agua consumida en $L \cdot m^{-2}$

Tratamientos

La lechuga fue sometida a 6 diferentes intensidades de luz (100, 200, 300, 400, 500 y 600 PPFD). La intensidad de luz incidente se midió con un sensor PAR cuántico (Mq-650, Apogee instruments) al inicio del ciclo, en un plano horizontal a una distancia vertical de la fuente de

luz de 25 cm en 24 puntos distribuidos uniformemente. El consumo de energía eléctrica utilizada para la iluminación (E_L) se midió con un wattímetro (SDM220EC, Hiking). La eficiencia del uso de energía eléctrica (EUE) se determinó con la ecuación.

$$EUE = \frac{Y}{E_L}$$

Donde EUE es la eficiencia del uso de energía eléctrica en kWh, Y es el rendimiento en $gFWm^{-2}$ y E_L es el consumo de energía eléctrica utilizada para la iluminación en $kWh \cdot m^{-2}$.

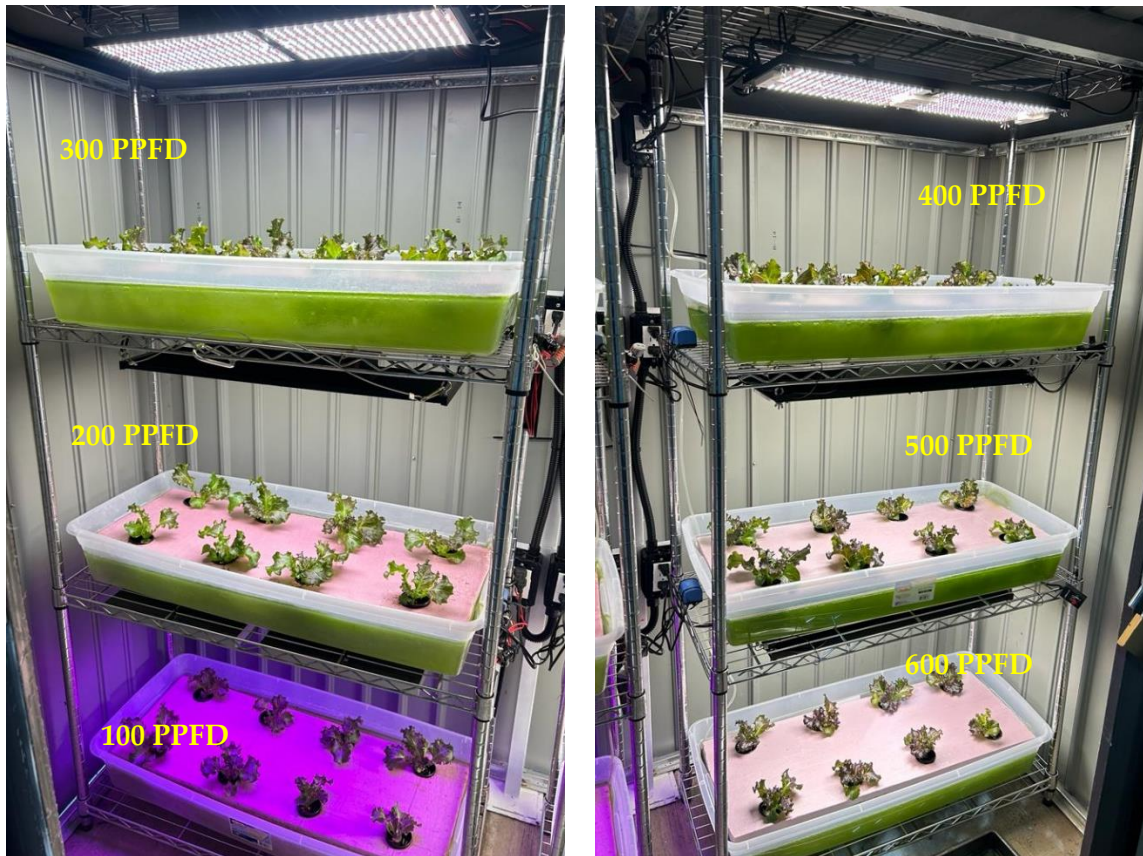
Con los datos obtenidos de Y , WUE y EUE se obtuvieron modelos matemáticos para estimar dichos parámetros en función de la intensidad de luz suministrada por la iluminación LED.

Tabla 2. Tratamientos a los que se sometió la lechuga en la granja vertical.

Tratamiento	Intensidad de luz ¹ ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	Espectro ²	Tipo de Iluminación
L100	100	71.6% R + 26.7% B + 0.85% IR + 0.85% UV	Lámpara de 30x30 cm (Hytekgro, Emasun)
L200	200	11% R + 89% W	Lámpara de 65x20x8 cm (Samsung LM301B, Green Grow)
L300	300	11% R + 89% W	Lámpara de 65x20x8 cm (Samsung LM301B, Green Grow)
L400	400	11% R + 89% W	Lámpara de 65x20x8 cm (Samsung LM301H, Green Grow)
L500	500	11% R + 89% W	Lámpara de 65x20x8 cm (Samsung LM301H, Green Grow)
L600	600	11% R + 89% W	Lámpara de 65x20x8 cm (Samsung LM301H, Green Grow)

¹Intensidad de luz obtenida con un sensor Par Quantum (Mq-650, Apogee) con una precisión de $\pm 5\%$.

²Las fuentes de luz se abrevian de la siguiente manera: LED-Rojo = R, LED-Azul = B, LED-Blanco = W, LED-Infrarrojo = IR y LED-Ultravioleta = UV.



Resultados y Discusión

Modelo de rendimiento

Se observó que la exposición de las plantas a una mayor intensidad de luz provocó el aumento del rendimiento, el máximo rendimiento obtenido fue de 2160.69 gFW·m⁻² con una intensidad de luz de 600 PPFD y el menor rendimiento se obtuvo para una intensidad de luz de 100 PPFD con un valor de 901.63 gFW·m⁻². En la Gráfica se observan los rendimientos obtenidos para diferentes intensidades de luz. Carotti et al. (2021) obtuvieron un rendimiento de 2300 gFW·m⁻² para un sistema aeropónico y 2200 gFW·m⁻² para un sistema ebb-and-flow con una intensidad de luz de 200 PPFD en contraste en este estudio se obtuvo un rendimiento de 1813.86 gFW·m⁻². Los datos obtenidos mostraron que un modelo de regresión polinomial de segundo orden fue el que mejor representó la relación entre el rendimiento de peso fresco y la intensidad de luz suministrada por la iluminación LED.

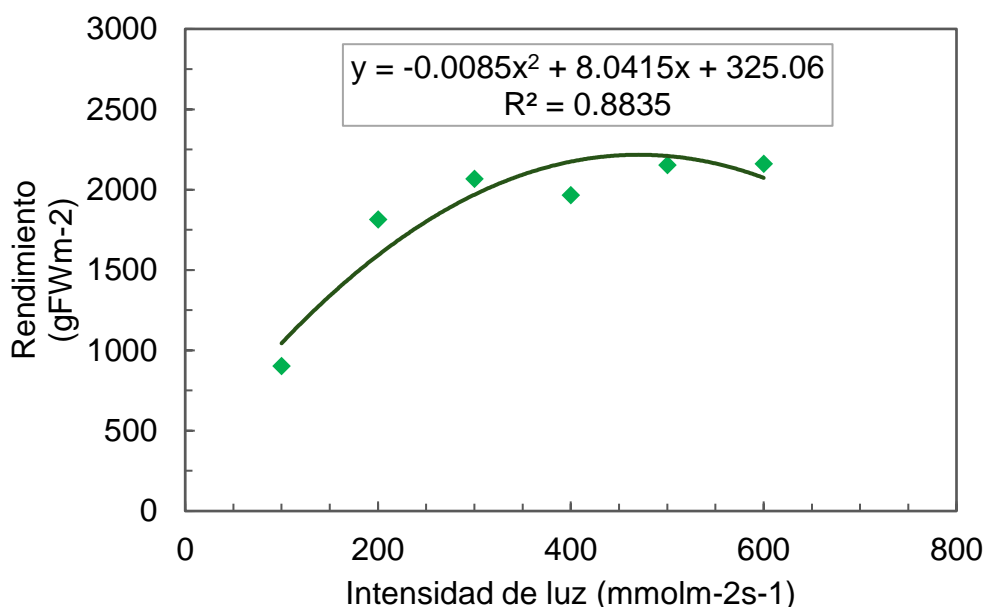


Figura 1. Relación del rendimiento con la intensidad de luz.

Modelo de eficiencia de uso de agua

El mayor consumo de agua obtenido fue de 69.61 L·m⁻² para una intensidad de luz de 500 PPFD, sin embargo, no corresponde a la máxima eficiencia de uso de agua, el máximo valor se obtuvo para 300 PPFD siendo de 43.94 gFW·L⁻¹. El menor consumo de agua fue de 30.40 L·m² para una intensidad de luz de 100 PPFD que correspondió al menor valor de eficiencia de uso de agua con 29.67 gFW·L⁻¹. En la gráfica se puede observar que a mayor intensidad de luz se obtiene un mayor consumo de agua, en cambio el uso de eficiencia de energía va disminuyendo a partir de 300 PPFD. Pennissi et al. (2020) obtuvieron una WUE máxima de 60 gFW·L⁻¹ para una intensidad de 250 PPFD siendo mayor a la obtenida en este estudio, Carotti et al. (2021) reporta eficiencias máximas para 200 PPFD de 69.7 gFW·L⁻¹ obtenidas en un sistema aeropónico y 32.5 gFW·L⁻¹ para un ebb-and-flow. Los datos obtenidos mostraron que un modelo de regresión polinomial de tercer orden fue el que mejor representó la relación entre la eficiencia de uso de agua y la intensidad de luz suministrada por la iluminación LED.

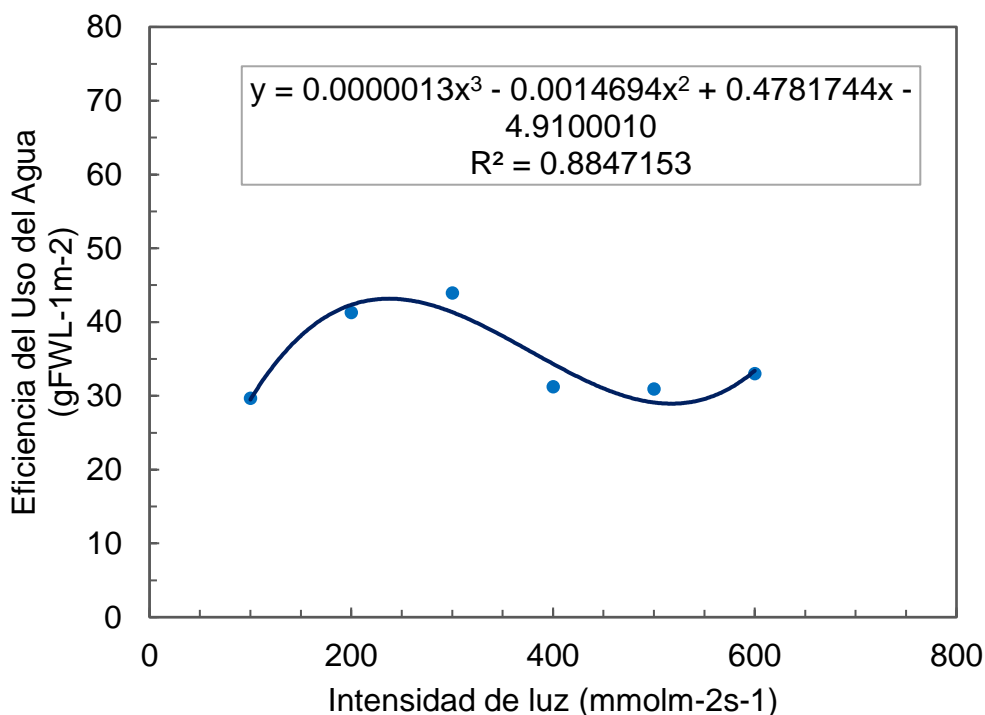


Figura 2. Relación de la eficiencia del uso del agua con la intensidad de luz.

Modelo de eficiencia de uso de energía eléctrica

El mayor consumo de energía fue de 169.59 kWh·m⁻² para una intensidad de luz de 600 PPFD, sin embargo, no corresponde a la máxima eficiencia de uso de energía, el máximo valor se obtuvo para 200 PPFD siendo de 33.89 gFW·kWh·m⁻². El menor consumo de energía fue de 47.91 kWh·m⁻² para una intensidad de luz de 100 PPFD, sin embargo, no corresponde con la mínima eficiencia de uso de energía, el mínimo valor se obtuvo para 600 PPFD siendo de 12.74 gFW·kWh·m⁻². En la gráfica se puede observar que a mayor intensidad de luz se obtiene un mayor consumo de energía eléctrica, en cambio el uso de eficiencia de energía va disminuyendo a partir de 200 PPFD. Saengtharatip et al. (2017) obtuvieron una productividad de 117 g·kWh⁻¹ para leds con 77.5% de luz roja, 20.7% luz azul y 1.2% de rojo lejano, la lechuga se sometió a un periodo de 35 días con una intensidad de 200 μmol·m⁻²·s⁻¹ y 14 horas de luz, se puede observar que la productividad es mayor a la obtenida en este estudio. Pennissi et al. (2020) obtuvieron una EUE máxima de 115 gFW·kWh·m⁻² para una intensidad de 250 PPFD. Los datos obtenidos mostraron que un modelo de regresión polinomial de tercer orden fue el que mejor representó la relación entre la eficiencia de uso de energía y la intensidad de luz suministrada por la iluminación LED.

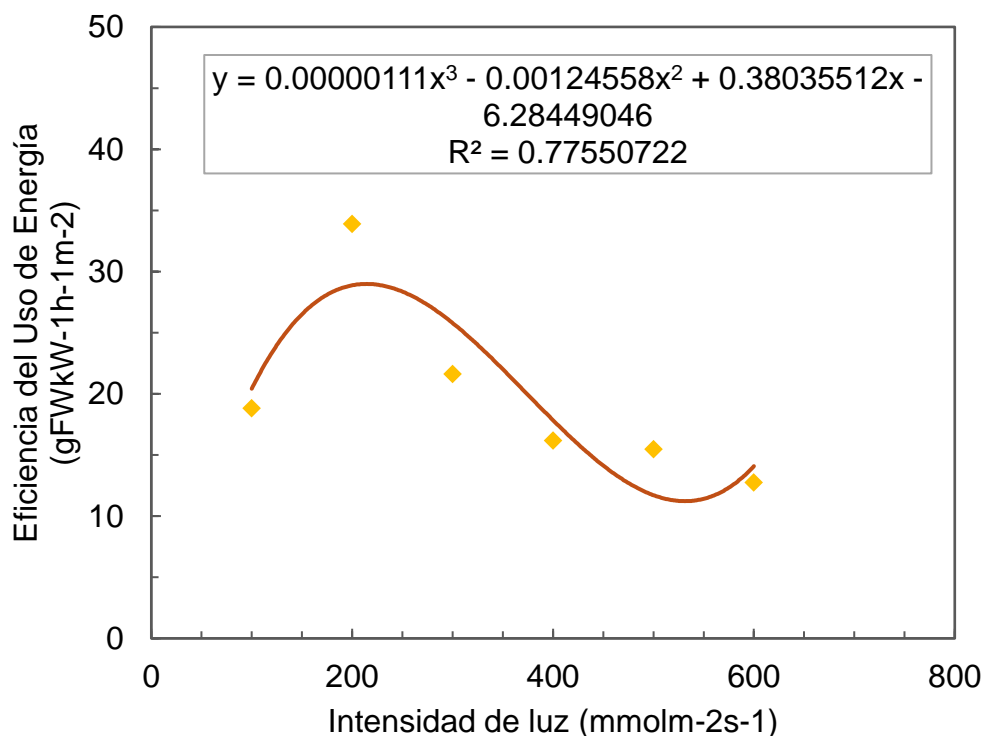


Figura 2. Relación de la eficiencia del uso de energía con la intensidad de luz.

Optimización de la función objetivo

Después de realizar un análisis de mercado se obtuvieron los precios para poder calcular el ingreso y costo total en la producción de lechuga.

Ingresos	
$P_L = 0.20 \text{ mxng}^{-1}$	El costo promedio de una lechuga hidropónica en supermercados cerca del IMTA es de \$30 y en promedio su peso es de 150 g, por lo tanto, el precio que se consideró para el presente estudio es de 0.20 mxng^{-1}
Costos	
$P_W = 0.012 \text{ mxnL}^{-1}$	En Jiutepec el costo del agua es de 12.22 por m3, por lo tanto, el precio que se consideró para el presente estudio es de 0.012 mxnL^{-1} .
$n = 10 \text{ mL}^{-1}$ $P_N = 0.0352 \text{ mxnmL}^{-1}$	Para una solución nutritiva de lechuga se tiene que son necesarios 10 mL^{-1} de solución A y B, el precio que se consideró para el presente estudio de la solución nutritiva es de $0.0352 \text{ mxnmL}^{-1}$.
$P_E = 0.84 \text{ mxnkWh}^{-1}$	De acuerdo con los costos del mercado se tienen los siguientes valores:

De 0 a 75 kWh

$$P_E = 0.84 \text{ mxnkWh}^{-1}$$

De 75 a 140 kWh

$$P_E = 0.976 \text{ mxnkWh}^{-1}$$

Más de 140 kWh

$$P_E = 2.859 \text{ mxnkWh}^{-1}$$

La energía consumida del presente estudio fue de 20.8 kWh, por lo tanto, el precio de la energía eléctrica es de 0.84 mxnkWh⁻¹

Se consideró el costo de inversión del prototipo de granja vertical que se dividió entre el número de ciclos totales en la vida útil de la infraestructura para obtener el costo fijo por metro cuadrado y por ciclo de cultivo.

Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
cl1	Bodega Exterior con Alero 257 x 142 x 184 cm	pza	0.5	\$ 8,999.00	\$ 4,499.50
cl2	Bomba de aire de 10 a 80 litros Aquakril Acuario Peces	pza	6.0	\$ 93.90	\$ 563.40
cl3	Caja transp 38.7L/41QT 88.6X42.2X15	pza	6.0	\$ 214.66	\$ 1,287.96
cl4	Conexión T 2 Salidas Acuario Manguera Conector	pza	6.0	\$ 4.80	\$ 28.80
cl5	Difusor de aire piedra burbujas para acuario	pza	12.0	\$ 4.95	\$ 59.40
cl6	Estante 5n cromado 40.4X90.4X183.6C	pza	1.5	\$ 2,128.45	\$ 3,192.68
cl7	Foamular 250 1X 4 X 8	pza	1.0	\$ 430.17	\$ 430.17
cl8	Manguera Silicon 10m bomba Acuario Peces Agua Oxigeno C02	m	10.0	\$ 10.50	\$ 105.00
cl9	Samsung 240w Lm301h 3500k + 660nm Quantum Borad Meanwell	pza	6.0	\$ 3,900.00	\$ 23,400.00
cl10	Arduino Uno	pza	1.0	\$ 1,200.00	\$ 1,200.00
cl11	Caja 100 Mts Cable Negro Thw Cal 16 Awg Indiana 100%cobre	pza	1.0	\$ 703.00	\$ 703.00
cl12	Caja 100 Mts Cable Rojo Thw Cal 16 Awg Indiana 100%cobre	pza	1.0	\$ 703.00	\$ 703.00
cl13	Caja 100 Mts Cable Verde Thw Cal 16 Awg Indiana 100%cobre	pza	1.0	\$ 703.00	\$ 703.00
cl14	Módulo De Relé De Estado Sólido 8 Canales 12v	pza	1.0	\$ 463.44	\$ 463.44
cl15	Modulo Wifi Serial Esp8266 Arduino	pza	1.0	\$ 69.00	\$ 69.00
cl16	Modulo Sensor Calidad De Aire Mq-135, Arduino, Pic	pza	1.0	\$ 71.50	\$ 71.50

$$EUE = 0.00000111I^3 - 0.00124558I^2 + 0.38035512I - 6.28449046$$

$$\frac{dEUE}{dI} = 0.00000333I^2 - 0.002491160I + 0.38035512 \quad (9)$$

Sustituyendo las derivadas y los precios de los costos e ingresos en la función objetivo se obtuvo la ecuación a resolver.

$$\frac{d\pi}{dI} = 100(0.0000013I^3 - 0.0014694I^2 + 0.4781744I - 4.9100010) \left[0.84 \frac{1}{(0.00000111I^3 - 0.00124558I^2 + 0.38035512I - 6.28449046)^2} (0.00000333I^2 - 0.002491160I^2 + 0.38035512) + (30.04 + 200.93) \frac{1}{(-0.0085I^2 + 8.0415I + 235.06)^2} (-0.017I + 8.0415) \right]$$

$$+ 100 \left[0.20 - 0.84 \frac{1}{0.00000111I^3 - 0.00124558I^2 + 0.38035512I - 6.28449046} - (30.04 + 200.93) \frac{1}{-0.0085I^2 + 8.0415I + 235.06} \right] (0.000039I^2 - 0.002938800I + 0.4781744) \quad (10)$$

El valor máximo obtenido fue de \$171.83 con una intensidad de 307 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

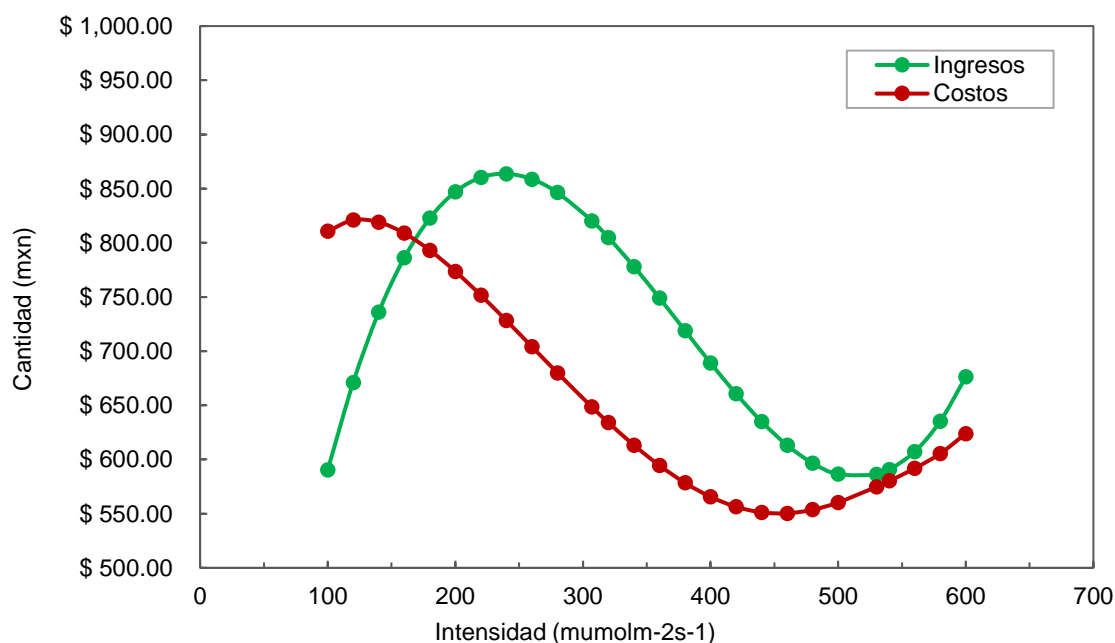


Figura 2. Curva de ingresos y costos del prototipo de granja vertical para una disponibilidad de agua de 100 L.

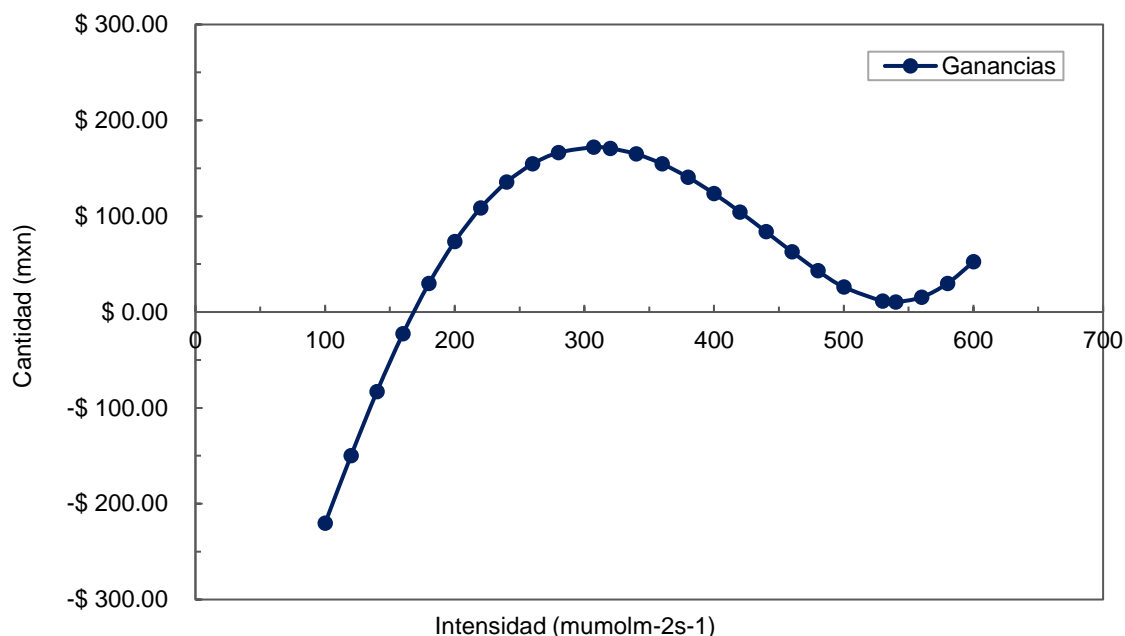


Figura 2. Curva de la rentabilidad del prototipo de granja vertical para una disponibilidad de agua de 100 L.

Conclusiones

El prototipo de granja vertical analizado en este estudio presentó una rentabilidad a través del modelo generado, sin embargo, los modelos de regresión se realizaron a través de una baja cantidad de tratamientos, por lo tanto, es necesario obtener más tratamientos aumentando la intensidad de luz y comprobar si realmente el comportamiento es parabólico o tiende a ser una recta, en este último caso la solución del modelo sería trivial.

En este estudio la producción de lechuga se realizó sin control ambiental, en posteriores estudios es necesario llevar a cabo un control de la temperatura ya que se sabe que es un parámetro que también afecta su crecimiento, además obtener datos experimentales en condiciones controladas permitirá que el modelo obtenido sea aplicable a otras granjas vertical, sin embargo, esto implicaría obtener el consumo de energía eléctrica del HVAC ya sea por medio de un medidor o por simulación numérica.

A pesar de las limitantes del estudio se demostró que las granjas verticales son rentables y hacen un uso eficiente del suelo, agua y energía para la producción de lechuga.

Referencias Bibliográficas

- Benke K. & Tomkins B. 2017. Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture, *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13-26. Doi: <https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>.
- Carotti, L., Graamans, L., Puksic, F., Butturini, M., Meinen, E., Heuvelink, E., & Stanghellini, C. 2021. Plant Factories Are Heating Up: Hunting for the Best Combination of Light

- Intensity, Air Temperature and Root-Zone Temperature in Lettuce Production. *Frontiers in Plant Science*, 11, [592171]. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.592171>.
- Loconsole, D., Cocetta, G., Santoro, P. and Ferrante, A. 2019. Optimization of LED lighting and quality evaluation of romaine lettuce grown in an innovative indoor cultivation system. *Sustainability*, 11(3): 841.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. 2012. Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction. Editorial OECD. Doi: <https://doi.org/10.1787/9789264122246-en>.
- Giuseppina Pennisi, Alessandro Pistillo, Francesco Orsini, Antonio Cellini, Francesco Spinelli, Silvana Nicola, Juan A. Fernandez, Andrea Crepaldi, Giorgio Gianquinto, Leo F.M. Marcellis. 2020. Optimal light intensity for sustainable water and energy use in indoor cultivation of lettuce and basil under red and blue LEDs, *Scientia Horticulturae*, 272. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109508>.
- Pinstrup-Andersen, P, 2018, Is it time to take vertical indoor farming seriously? *Global Food Security*, 17, 233–235.
- Saengtharatip, S., Lu, N., Takagaki, M. & Kikuchi, M. 2018. Productivity and Cost Performance of Lettuce Production in Plant Factory Using Various Light-Emitting Diodes of Different Spectra. *ISSAAS Journal*. 24. 1-9.
- Specht, K., Siebert, R., Hartmann, I., Freisinger, U. B., Sawicka, M., Werner, A., Thomaier, S., Henckel, Walk, H. & Dierich, A. 2014. Urban agriculture of the future: an overview of sustainability aspects of food production in and on buildings. *Agric Hum Values*. 31. 33–51. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10460-013-9448-4>.
- 82 (UN DESA/POP/2022/TR/NO. 4). ISBN: 978-92-1-148373-4. EISBN: 9789210014380.