



**Universitat Autònoma
de Barcelona**

Explorando alternativas para suplir la demanda de alimento en respuesta al aumento de población

Eneko Izaguirre Arrien

MÀSTER EN ENGINYERIA BIOLÒGICA I AMBIENTAL

**Ángela Pedroso Tonon
Xavier Gabarrell Durany**

24/01/2020

Índice

Prólogo	1
Abstract	2
1. Introducción	2
1.1. Retos de la agricultura convencional	2
1.2. Cultivo en centros urbanos y uso de LEDs	2
2. Objetivos	4
3. Materiales y métodos	4
3.1. Condiciones de cultivo	4
3.2. Iluminación	5
3.3. Mediciones de biomasa	7
3.4. Balance de materia	8
4. Resultados	8
4.1. Condiciones	8
4.2. Biomasa	11
4.3. Balance de materia	12
5. Discusión	13
5.1. Condiciones y biomasa	13
5.2. Balance de materia	14
6. Conclusión	15
7. Anexos	15
7.1. Anexo I: Puesta a punto del sistema	15
7.2. Anexo II: Datos de balance de materia	17
7.3. Anexo III: Inventario LCA	17
7.3.1. Inventario exclusivo de cultivo con LED	17
7.3.2. Inventario común con LAU1	18
7.3.3. Inventario operacional	19
8. Agradecimientos	20
9. Referencias	20

Prólogo

Según las previsiones de crecimiento de mercado de Graphical Research (“Asia Pacific Vertical Farming Market analysis based on Product, Technology, Application, Industry Analysis Report, Regional Outlook, End-User Potential, Competitive Market Share & Forecast, 2018 – 2024”), se estima que el mercado de granjas verticales en la zona Asia-Pacífico superará los 5 billones de dólares americanos. El gobierno chino ha destacado la importancia del desarrollo de la agricultura en entorno controlado para su plan de desarrollo de los próximos cinco años y ya tiene una gran cantidad de proyectos de investigación en marcha para ello, además de subsidios como MYRIAD para favorecer estas empresas. La compañía CropOne se dispone a construir la mayor granja vertical del mundo en los Emiratos Árabes como empresa conjunta con una compañía aérea. Otras compañías como AeroFarms presentan variaciones como el cultivo aeropónico en granja vertical y también se disponen a aumentar el tamaño de sus instalaciones. Todo apunta a que las granjas verticales tendrán una mayor presencia en los próximos años, y para su desarrollo serán necesarias personas con competencias diversas. Estos sistemas requieren de conocimientos de ingeniería, para entender los flujos de materiales y agua en los sistemas, así como conocimientos de biología para el correcto cuidado de las plantas y consideraciones ambientales, indispensables para hacer un uso óptimo de los recursos. El presente trabajo ha servido como aprendizaje de la base de operación de estos sistemas, su complejidad y la puesta a punto del sistema de cultivo con LEDs ha servido para desarrollar cualidades de resolución de problemas. Estas competencias trabajadas se relacionan directamente con esta necesidad de mercado creciente, que a su vez contribuirá a mantener la seguridad alimentaria y reducir los impactos del desarrollo de la población en ciertos países.

Abstract

Con el aumento de población y expansión de centros urbanos viene la necesidad de producir los alimentos necesarios para alimentarla. Además de esto, esta producción ha de tener en cuenta el medio ambiente y la eficiencia en el uso de recursos. Debido a los recientes avances en tecnología LED, se ha expandido el potencial de los cultivos con iluminación artificial como alternativa de producción en zonas urbanas. En el presente trabajo se ha realizado la puesta a punto de un cultivo de este tipo, y se ha comparado con un cultivo realizado en paralelo en el invernadero integrado de la azotea (i-RTG) en el Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals (ICTA) de la Universitat Autònoma de Barcelona. El cultivo con LED se realizó a una intensidad de $105.23 \pm 10.8 \mu\text{mol} / (\text{m}^2 \text{s})$ y la luz utilizada tuvo las siguientes proporciones: 10% azul, 5% verde, 85% rojo y 10% infrarrojo; se establecieron tres regímenes de iluminación para evaluar un posible ahorro energético. Se monitorizaron las condiciones y se evaluó la eficiencia de utilización de luz y consumo de energía entre ambos cultivos, así como la producción de biomasa. El régimen con mayor tiempo de iluminación y consumo dio el mejor rendimiento de biomasa y se identificaron varias variables a tener en cuenta para mejorar en cultivos subsiguientes. Se realizó un inventariado como fase previa a la realización de un análisis de ciclo de vida y un balance de masa para evaluar el uso de nutrientes.

1. Introducción

1.1. Retos de la agricultura convencional

Debido al aumento de población a nivel global y los cambios en su estructura, los sistemas de producción de alimento se enfrentan a varios retos. La tasa global de crecimiento de población

disminuye cada año, sin embargo, se espera que diversas zonas como África y Asia vean una expansión de población considerable durante este siglo. Ambas regiones tienen una fuerte dependencia sobre la agricultura y este aumento de población podrían perjudicar severamente el desarrollo de estos países. A esto se le une el crecimiento de ciudades y la migración a estos centros urbanos, que cambian las necesidades de producción, procesamiento y transporte de alimento (Rufi-Salís et al., 2020). El crecimiento de las ciudades trae consigo un aumento en uso de terreno para cultivo, cuya disponibilidad y calidad está en declive. Este aumento en producción se obtiene a menudo talando bosques para utilizar el terreno como campo de cultivo. Algunos países han equilibrado esta necesidad de terreno aumentando su dependencia sobre importaciones, con políticas de conservación y cambios en su economía (Rufi-Salís et al., 2020). Estas políticas pueden contribuir a limitar la deforestación, pero se requerirán nuevas formas de suplir las necesidades alimentarias de la población en aumento. Los posibles efectos de cambio climático agravan este problema al generar presiones migratorias, así como cambiar las localizaciones con las características adecuadas para los cultivos, o forzando un cambio en las especies a cultivar (Rufi-Salís et al., 2020). Esto genera la necesidad de cultivos más eficientes, con un menor uso de terreno natural, que sean independientes del clima y mejor integrados con ciudades y terrenos urbanos. Para ello es necesario un acercamiento multidisciplinar, que debe tener en cuenta puntos de vista de la ingeniería ambiental, biotecnología vegetal y aspectos socioeconómicos.

1.2. Cultivo en centros urbanos y uso de LEDs

Se han propuesto varias opciones como sistemas de producción de alimento zonas urbanas. Estos sistemas controlados, tienen el potencial de producir alimento en las propias ciudades, eliminando la necesidad de importar alimento, reduciendo el coste ambiental y económico del transporte y el uso de terreno natural. Debido al alto valor del espacio urbano, para hacer un cultivo costo-eficiente son necesarias altas productividades (Rufi-Salís et al., 2020).

El uso de granjas verticales con iluminación artificial y una atmosfera controlada permite maximizar la productividad a cambio de un mayor coste energético. Estos cultivos pueden ser más eficientes en cuanto al uso de radiación que realiza la planta. Pero debido a que la luz recibida por invernaderos no tiene coste, a diferencia de los cultivos que utilizan iluminación artificial, el coste energético por planta es mayor para estos últimos (Graamans et al., 2018). Los recientes avances en tecnología LED prometen mejoras en este aspecto, ofreciendo una iluminación más eficiente y permitiendo la modulación de espectros e intensidad de la luz. Optimizando las características de la luz recibida y dando una mayor intensidad de los espectros deseados se puede mejorar el uso de luz de las plantas, mejorando la productividad o seleccionando condiciones que favorezcan cualidades deseadas en ella, como la calidad nutracéutica o la producción de determinados pigmentos (Cocetta et al., 2017). Las

clorofilas *a* y *b*, son los pigmentos principales asociados a la absorción de luz en plantas superiores y absorben la radiación con longitudes de onda entre 400-500 nm y 600-700 nm principalmente. Estas longitudes de onda corresponden a la luz roja y azul respectivamente. Con la utilización de LEDs azules y rojos se evitan las longitudes de onda que no son estrictamente necesarias para el crecimiento de la planta se puede obtener un mayor rendimiento sobre la luz aportada. Esto, junto con su mayor eficiencia a la hora de transformar electricidad en luz, su mayor tiempo de vida útil, ha llevado a que los LED sustituyan las lámparas incandescentes para su uso en cultivos en interior (Gómez & Izzo, 2018). La adición de luz en rangos adicionales como el infrarrojo es importante para el desarrollo de características secundarias como flores y frutos (Ji et al., 2019; Kalaitzoglou et al., 2019) por lo que sería conveniente realizar un ajuste de la iluminación más exhaustivo para vegetales con ciclos de vida más complejos. Se han realizado diversos estudios para determinar los efectos de los distintos espectros utilizados con distintos tipos de cultivo, dando lugar a cambios fisiológicos y morfológicos en las plantas (Kalaitzoglou et al., 2019; Lanoue et al., 2018; Naznin et al., 2019). Al variar los efectos según el cultivo, elaborar regímenes de iluminación óptimos para cada planta puede ser complejo, pero podría suponer una gran mejora en estos sistemas.

A pesar de sus ventajas el uso de LEDs para cultivo tiene sus inconvenientes. Además de un consumo eléctrico, la fabricación de LED requiere de extracción de recursos limitados, principalmente la plata y el oro. La mayoría de LEDs, principalmente los LED rojos de baja intensidad, pueden generar impacto debido a su contenido en metales como el plomo, el cobre, el níquel, el hierro o la plata (Lim et al., 2011).

Una alternativa o complemento a estos sistemas es el cultivo en invernadero en las azoteas de ciudades y centros urbanos, aprovechando la luz solar y recursos como el agua de lluvia para el cultivo. La utilización de zonas poco aprovechadas como las azoteas podría reducir los impactos de importar alimentos a la ciudad y ofrecer múltiples beneficios (Corcelli et al., 2019). Esta última opción podría ofrecer los varios de los beneficios del cultivo en ciudad sin los costes asociados a el cultivo con LEDs. El Instituto Catalán de Tecnología Ambiental (ICTA) es un edificio diseñado para hacer un uso sostenible y eficiente de la energía y recursos, que tiene en su azotea un invernadero integrado con los sistemas del edificio (i-RTG). Estos sistemas no son mutuamente excluyentes y podrían integrarse ambos en el mismo edificio, teniendo en cuenta las distintas necesidades de cada cultivo.

La principal desventaja de este último cultivo podría ser el estar limitado a un área determinada, haciendo más difícil su intensificación. La adquisición de diversas azoteas, así como la instalación del equipo y la logística implicada puede resultar más compleja en favor del uso del volumen completo de un menor número de edificios con fines industriales para la producción intensiva comercial. Pero tiene el potencial de ofrecer beneficios a la ciudad con un coste más reducido.

1.3. LCA

Dada su complejidad, para poder evaluar correctamente los beneficios e impactos de estos sistemas es necesario realizar un análisis de ciclo de vida. Un análisis de ciclo de vida hace uso de un inventario exhaustivo del sistema a estudiar y estudia los impactos que genera la producción de una unidad de interés. En este caso se trataría de evaluar los impactos de un sistema de cultivo en interior frente a un cultivo i-RTG en el contexto de un entorno urbano. De esta forma se puede discernir de forma más correcta que elementos en el sistema provocan el mayor impacto al medio ambiente y las ventajas que ofrecen ambas alternativas para mejorar la producción de alimento.

2. Objetivos

Realizar una puesta a punto y un primer experimento en el cultivo con LEDs, en el que se comparan las condiciones, producción de biomasa, y consumos del sistema con los obtenidos en el i-RTG del ICTA (LAU1). También la realización un balance de masa sobre el sistema de cultivo con el objetivo de ver el aprovechamiento de nutrientes. Esto se realizó con el fin de estudiar factores que podrían ser relevantes a la hora de hacer una producción de este tipo en un entorno urbano. Realización de un inventario preliminar para LCA (**Anexo III**).

3. Materiales y métodos

3.1. Condiciones de cultivo

Se realizaron dos tandas de cultivos con *Lactuca sativa* (Lechuga, variedad maravilla de verano). Un cultivo inicial como puesta a punto del sistema (**Anexo I**) y un segundo cultivo con tres condiciones de iluminación distintas para evaluar un posible ahorro energético. El primer cultivo de puesta a punto tuvo una duración total de 41 días y el segundo una duración total de 34 días. En cada una de las áreas de control (CA) del cultivo con LED se plantaron 8 lechugas, en la LAU1 se plantaron 16 lechugas (**Figura 1**).

Los cultivos se realizaron en sacos de perlita de 2.8 kg, con tres lechugas por saco en el LAU1 y cuatro lechugas por saco en el cultivo con LED. Ambos cultivos se regaron con agua de lluvia recogida en el edificio y almacenada en el LAU1. Se realizaron tres riegos de tres minutos por día los primeros 18 días de cultivo y se redujo el tiempo de riego a partir de entonces a dos minutos, tras comprobar que los tres riegos eran más de lo necesario. Esta agua se encuentra almacenada en un tanque y al momento de utilizarla se mezcla con dos soluciones de nutrientes en una proporción 1:100 con el uso de dos dosatrones. La solución de nutrientes resultante se administra a las lechugas en los sacos de perlita mediante goteros con un caudal total de 0.62 L/min (26 mL / min por gotero). En la LAU1 se recogieron los lixiviados mediante una bandeja inclinada situada bajo los sacos de perlita.

En el cultivo con LED se posicionaron cuatro cubos en los que se recogían, median y guardaban muestras de los lixiviados periódicamente.



Figura 1: A la izquierda, una imagen del cultivo de lechugas en el LAU1. A la derecha, el cultivo realizado con LED.

Se utilizaron sondas para monitorizar la temperatura, humedad tanto para el cultivo con LEDs como para el cultivo en LAU1. Se monitorizó el porcentaje de lixiviados y riego, midiendo el riego con un medidor de caudal a la entrada del sistema y la cantidad de lixiviados de forma manual. Para la temperatura en el LAU1 se utilizaron dos valores una de cada extremo del invernadero, para el cultivo con LED se utilizaron dos sondas de temperatura, una en el área de control 1 y la segunda en el área de control 3.

3.2. Iluminación

Las lámparas utilizadas fueron módulos de producción Green Power de Philips, con los que se establecieron tres regímenes de iluminación distintos. Cada una de las lámparas tiene 8 focos de luz en los que se encuentran los LED de distintos colores (infrarrojo, rojo, azul, y verde). El software utilizado ofrecía la oportunidad de realizar un único fotoperiodo por día al iniciar las pruebas por lo que se escogió un fotoperiodo de 16 h de luz y 8 de oscuridad que ha dado buenos resultados en otros estudios (Kang et al., 2013) y en la puesta a punto. Como primer acercamiento a reducir el consumo se decidió mantener el fotoperiodo 16/8 pero en dos de las tres áreas de control se aumentó la intensidad de la iluminación de forma gradual simulando el aumento de la intensidad solar. Uno de los cultivos se realizó sin aumento gradual de intensidad (CA1) y dos cultivos con 3 (CA2) y 4 (CA3) horas de rampa de iluminación inicial y final, que mantenían su intensidad máxima durante 16, 10 y 8 horas respectivamente (**Figura 2**).

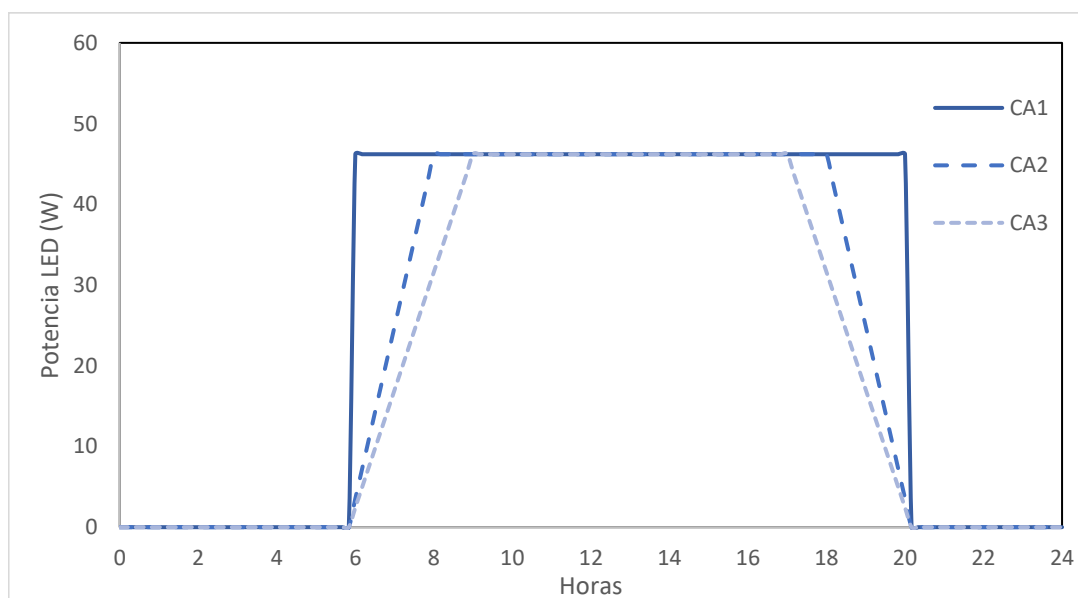


Figura 2: Potencia una lámpara LED en cada una de las tres áreas de control (CA) del cultivo con LEDs a lo largo de un día. La integral bajo cada línea representaría el consumo eléctrico de los LEDs

El consumo total de cada área de control fue de 1478 Wh (CA1), 1201 Wh (CA2) y 1109 Wh (CA3) diarios. Se estableció una intensidad inicial de $105.23 \pm 10.8 \mu\text{mol} / (\text{m}^2 \text{s})$ para los tres cultivos, sin embargo, la intensidad recibida por las lechugas varía a medida que las lechugas crecen en altura y se acercan a las lámparas LED. Por ello, se realizaron mediciones de la intensidad de luz aportada por los LED con un espectrómetro portátil UPRtek PAR200. Midiendo la intensidad en PPFD ($\mu\text{mol} / \text{m}^2 \text{s}$), la densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos. Las mediciones se realizaron a varias alturas en posiciones con y sin bombilla LED a lo largo de la mitad de una de las lámparas para ver posibles variaciones en intensidad. Al tener un sistema no simétrico (**Figura 3**) se optó por poner un plástico negro a modo de aislamiento entre los LEDs de cada área controlada para evitar que cada

la iluminación de una zona interfiriera con la contigua. La receta de luz utilizada tuvo las siguientes proporciones: 10% azul, 5% verde, 85% rojo y 10% infrarrojo, operando al 77% de la potencia máxima.

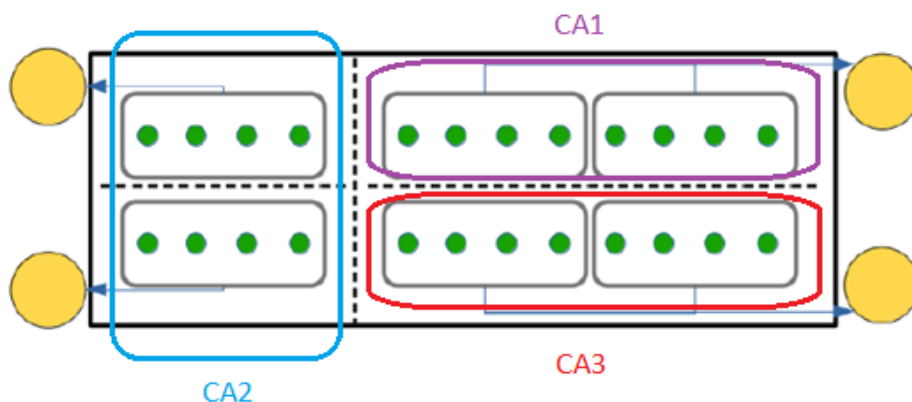


Figura 3: Representación esquemática del cultivo con LEDs. Las líneas continuas representan el plástico puesto a modo aislamiento en el exterior, las líneas discontinuas representan el plástico puesto para dividir las secciones y evitar interferencias. Cada círculo verde representa la ubicación de las lechugas en el saco de perlita, los círculos amarillos representan los cubos que se utilizaron para recoger los lixiviados salientes de los cultivos. A la izquierda se encuentra el CA2, en la esquina superior derecha la CA1 y en la esquina inferior derecha la CA3.

Se midió la luz PAR (radiación fotosintéticamente activa) que llega a las lechugas del LAU1 debido a la radiación solar, así como la temperatura y humedad. Se utilizó el medidor portátil UPRtek PAR200 para observar el espectro de luz que llega al LAU1. Se monitorizaron también la temperatura y humedad presentes en el invernadero.

Con el fin de evaluar la mejora en cuanto al uso de radiación recibida por espectro de luces utilizado se realizó una comparación de eficiencia de la utilización de radiación PAR entre el cultivo con LEDs y el LAU1.

3.3. Mediciones de biomasa

Tras la cosecha se lavaron las lechugas y raíces para quitar restos de perlita y tierra. Se tomó el peso total, el peso de las hojas y el peso de las raíces. Las hojas y raíces se secaron en una estufa a 65 °C hasta que la variación de peso fue inferior al 5% por día. Tras ello se midió el peso seco de las hojas y raíces. Se realizó la prueba de normalidad (Shapiro-Wilk) y de distribución homogénea de varianza (prueba de Levene y Bartlett) para comprobar si se podía realizar una ANOVA de un solo factor. En el caso de haber diferencias se utilizó una prueba de Tukey HSD para ver entre que tratamientos había diferencias significativas.

3.4. Balance de materia

Para realizar un balance de materia sobre los nutrientes aportados al cultivo se tomaron muestras del riego en varios puntos del sistema a lo largo del experimento y se analizaron mediante cromatografía iónica (realizado por Martí Rufi). Se tomaron muestras en seis puntos del cultivo: tras añadir los nutrientes con los dosatrónes, en los goteros de la LAU1, en los goteros del cultivo con LED y en los lixiviados de cada una de las áreas de control (**Figura 4**).

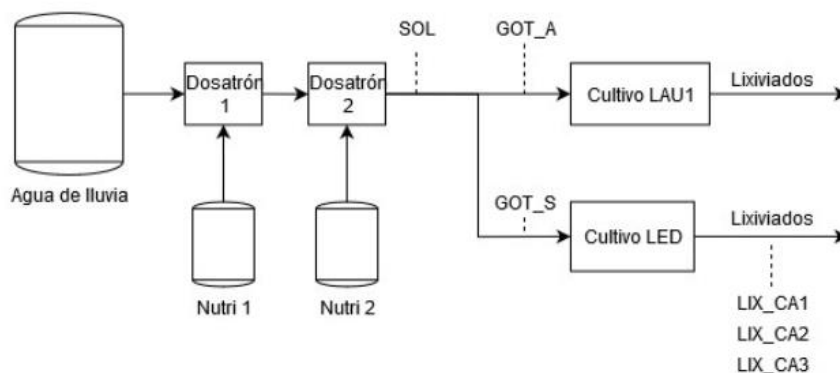


Figura 4: Esquema simplificado del sistema en el que se señalan los puntos de recogida y nombres de muestra (líneas discontinuas).

De esta forma se obtuvo la concentración de nutrientes a la entrada y salida del cultivo con LED y posibles pérdidas de nutrientes en el sistema de riego. Las lechugas cosechadas y secadas se trituraron y posteriormente se digestaron con 5 mL de ácido nítrico 60% (v/v) en un digestor microondas. Las muestras digeridas se enviaron para realizar su análisis por cromatografía al Servei d'Anàlisi Química (SAQ) de la Universitat Autònoma de Barcelona. Por contratiempos con el sistema de digestión, los resultados de las muestras no están disponibles por el momento, por lo que se calcularon los valores de los elementos en la lechuga por balance de masa.

4. Resultados

4.1. Condiciones

Se apreció un aumento de intensidad de luz con la altura tal y como se esperaba. A mayor cercanía a los LEDs mayor intensidad, las zonas centrales entre los LEDs presentan una intensidad menor al par de los focos de luz, pero a medida que nos alejamos de los focos los haces de luz de los LEDs contiguos se cruzan y la intensidad en las zonas entre los LEDs es mayor. En la zona central de la lámpara es donde la intensidad llegaba a ser mayor, y en los laterales la menor (**Figura 5**). Desde la distancia inicial a la que se encontraban los brotes de lechuga (32 cm) a la distancia final a la que se encontraban las copas de la lechuga debido a su crecimiento (22 cm) la intensidad varió entre $105 \pm 17 \mu\text{mol} / (\text{m}^2 \text{ s})$ y $163 \pm 19 \mu\text{mol} / (\text{m}^2 \text{ s})$.

		PPFD ($\mu\text{mol} / \text{m}^2 \text{s}$)															
		LED 1		LED 2		LED 3		LED 4		LED 5		LED 6		LED 7		LED 8	
Distancia desde LED (cm)	4	751	109	1072	125	1158	140	1255	245	1255	140	1158	125	1072	109	751	
	6	494	300	772	326	789	352	780	412	780	352	789	326	772	300	494	
	8	386	360	523	364	543	369	518	396	518	369	543	364	523	360	386	
	10	266	345	401	337	395	330	398	341	398	330	395	337	401	345	266	
	12	221	302	312	295	320	289	321	294	321	289	320	295	312	302	221	
	14	210	274	273	271	276	267	267	267	267	267	276	271	273	274	210	
	16	178	237	231	240	243	244	240	242	240	244	243	240	231	237	178	
	18	151	204	199	209	212	215	210	214	210	215	212	209	199	204	151	
	20	134	176	174	183	193	190	189	192	189	190	193	183	174	176	134	
	22	121	156	160	167	173	178	175	177	175	178	173	167	160	156	121	
	24	116	139	133	155	162	171	164	165	164	171	162	155	133	139	116	
	26	99	127	132	138	145	150	146	152	146	150	145	138	132	127	99	
	28	91	114	111	126	133	138	136	135	136	138	133	126	111	114	91	
	30	84	104	110	117	127	130	128	130	128	130	127	117	110	104	84	
	32	78	96	89	109	114	122	123	123	123	122	114	109	89	96	78	
	34	71	88	82	100	101	113	100	112	100	113	101	100	82	88	71	
	36	67	81	74	86	93	91	97	107	97	91	93	86	74	81	67	
38	59	67	69	85	87	102	95	97	95	102	87	85	69	67	59		
40	56	62	62	78	83	95	82	94	82	95	83	78	62	62	56		

Figura 5: Mediciones de PPFD realizadas a varias alturas a lo ancho de una lámpara con 8 bombillas LED y en los puntos intermedios entre las bombillas.

Se comprobó que el espectro de luz establecido para los LED era el mismo que el establecido mediante el software. La luz solar presenta una intensidad más repartida entre las distintas longitudes de onda que en el caso de la iluminación realizada con LEDs (**Figura 6**).

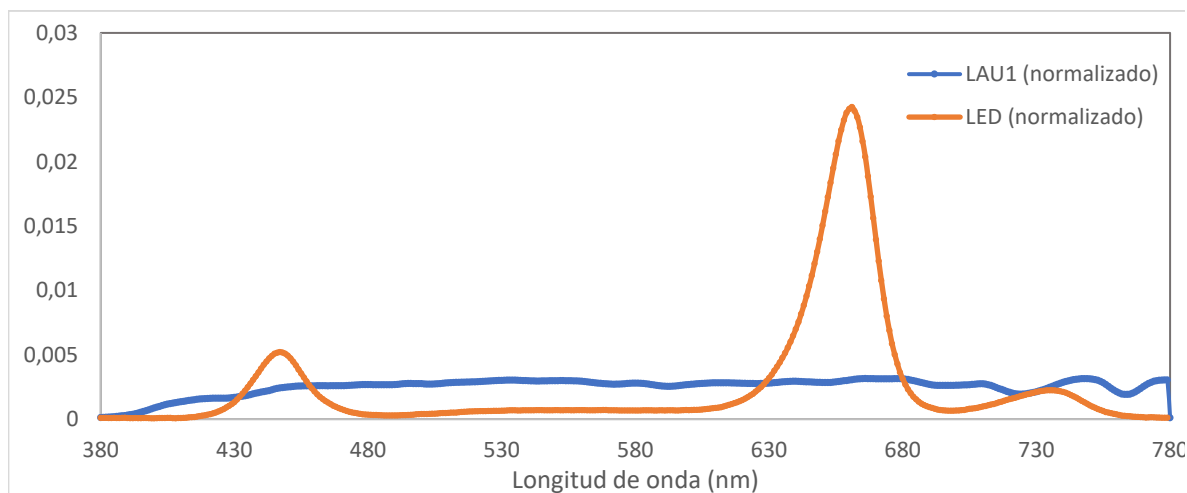


Figura 6: Intensidad de luz (W/m^2) a distintas longitudes de onda normalizado con respecto a la integral de la curva, para facilitar la comparación entre luz solar y la receta de luz aportada con LEDs.

Las temperaturas promedio en el cultivo fueron 19.53 ± 1.16 °C para los LED, algo superior a la medida en LAU1 16.91 ± 4.15 °C. En la **Figura 7** se puede observar la variación de la temperatura durante el cultivo, donde podemos ver que la variación de mínimas y máximas fue mayor para el

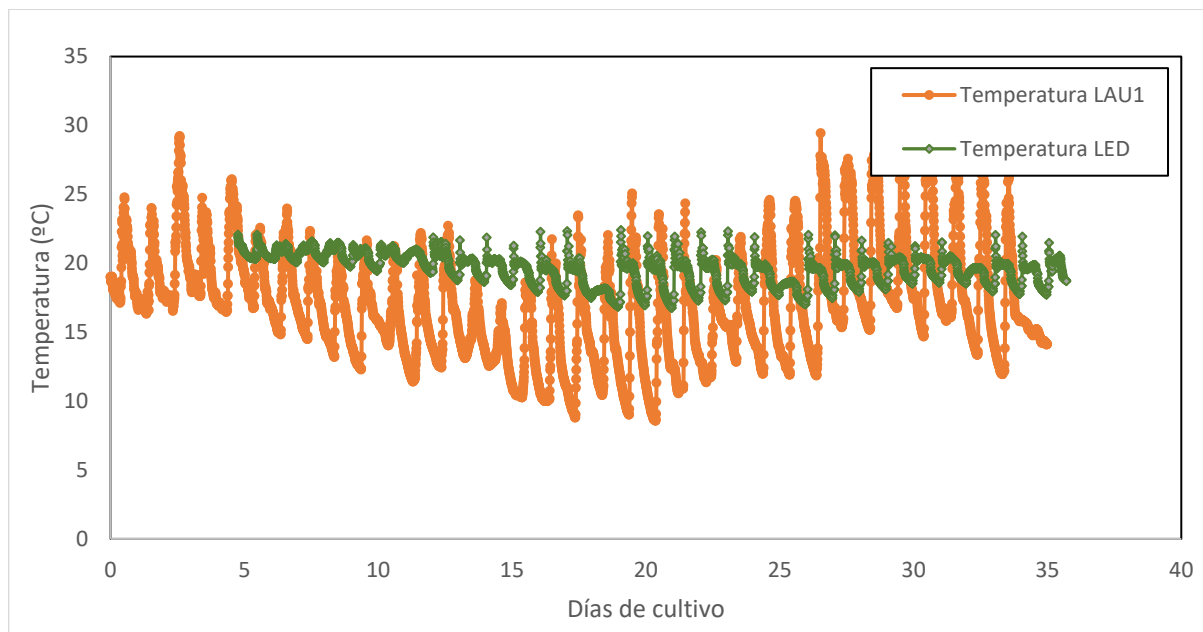


Figura 7: Mediciones de temperatura a lo largo de los 34 días de cultivo. Las sondas del cultivo con LEDs se instalaron y pusieron en funcionamiento a partir del día 4 del cultivo.

4.2. Biomasa

Los principales resultados de la biomasa obtenida se resumen en la **Figura 8**. La biomasa más alta se obtuvo en el CA1 (165.44 g hoja fresca / lechuga), y la más baja en la LAU1 (51.83 g / lechuga). La proporción de hoja-raíz fue más baja en el caso del LAU1. Se encontraron diferencias significativas entre el peso fresco por lechuga promedio del CA1 y CA3 (128.38 y 116.76 g /lechuga respectivamente) y el LAU1 (80.53 g / lechuga). También hubo diferencias significativas en la proporción hoja raíz entre el CA1, CA2 (26.7 y 25.2 respectivamente) frente al LAU1 (16.4) (el conjunto CA3 no se incluyó por no cumplir con el criterio de normalidad). No se encontraron diferencias significativas para el peso seco, ni para el consumo entre las tres CA.

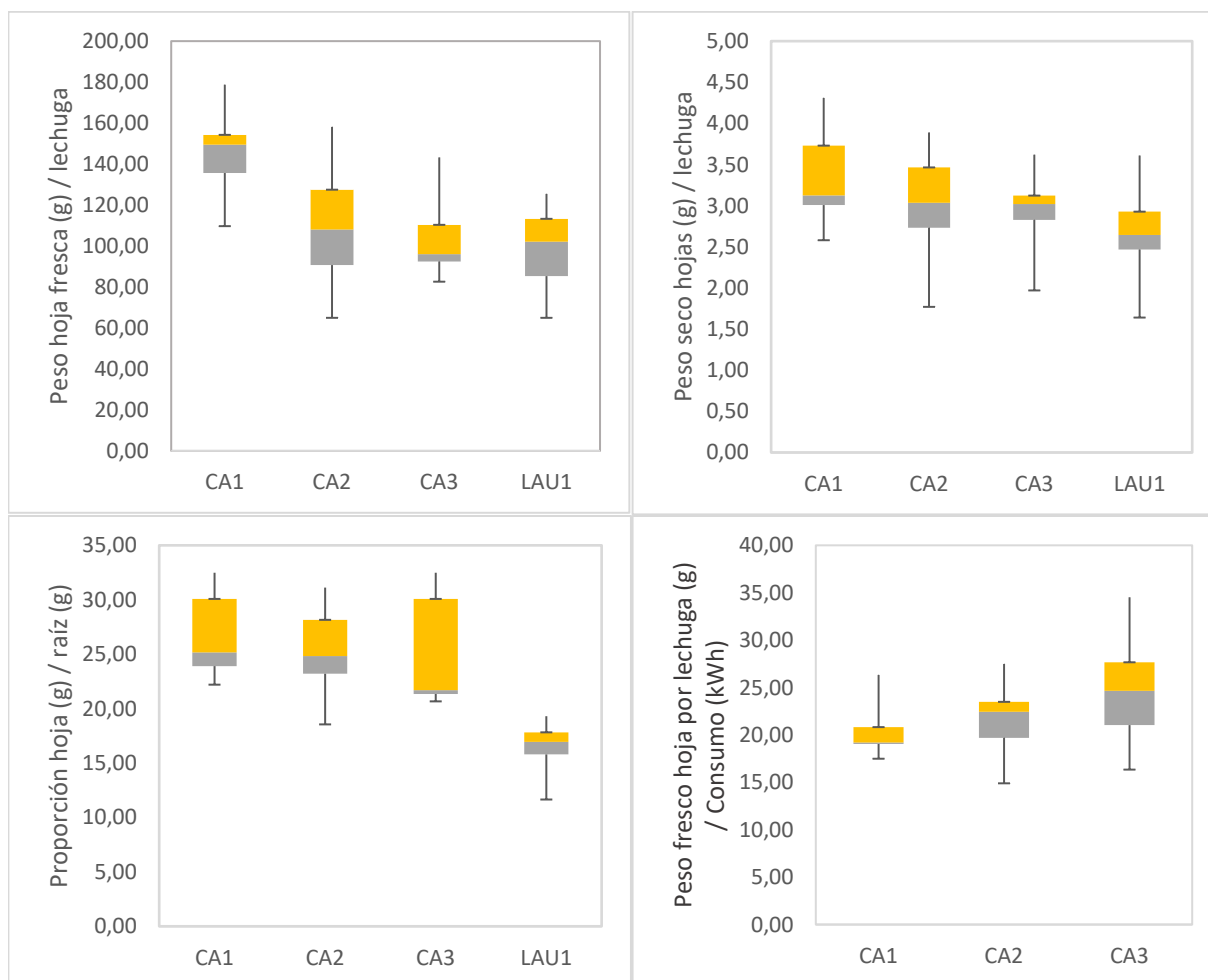


Figura 8: Resultados de biomasa obtenidos: arriba a la izquierda el peso de hoja fresca por lechuga obtenido, en la esquina superior derecha el peso seco de las hojas por lechuga, en la esquina inferior izquierda la proporción hoja/raíz calculada con los pesos frescos de ambas y en la esquina inferior derecha la masa de hoja fresca por el consumo del LED de cada CA calculado en base al consumo nominal donde el consumo del LAU1 correspondería al valor cero.

En cuanto a la energía recibida, los cultivos con LED requieren de menos energía en forma de radiación para obtener un kilogramo en biomasa seca de lechuga en comparación a los cultivos del LAU1 que utilizan luz solar. La eficiencia en este caso es más de 15 veces menor para el LAU1 (1.32×10^9 MJ/kg) que para los CA (7.83×10^7 MJ/kg). Dentro de los cultivos LED la diferencia es menor, siendo la mejor eficiencia la de la CA3 (7.23×10^7 MJ/kg).

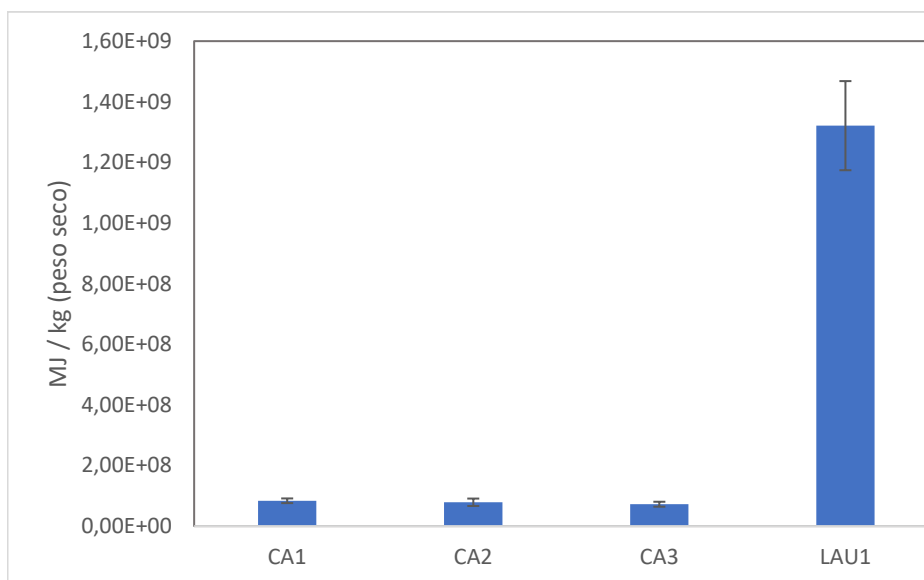


Figura 9: Radiación recibida en términos de energía (MJ) por cada kilogramo de lechuga seca obtenido, indicando la eficiencia de la planta para utilizar la energía que recibe como luz.

4.3. Balance de materia

Para el balance general se utilizó el valor promedio de entrada y salida para el sistema de cultivo completo. En el caso del cloruro, nitrato y nitrito el balance resulto negativo, lo que supondría una aparición de nitrato, nitrito y cloruro en el sistema (**Tabla I**), que en este caso no es congruente. La desviación estándar relativa para las muestras medidas es superior al 100% en muchos de los casos (**Anexo II**).

Tabla 1: Balance de materia sobre sistema de cultivo con LED. *Valores temporales calculados por balance de materia. ** Balance en relación a entrada

	Entrada de nutrientes (g)	Lixiviados (g)	Total en biomasa (g)*	g / g (peso seco)*	Balance ** (%)
N-Nitrato	6,93	10,560	-3,631		152
N-Nitrito	0,16	0,328	-0,164		200
S-Sulfato	11,98	6,982	4,998	6,81E-02	58
S-Tiosulfato	0,01	0,005	0,001	1,53E-05	80
Cloruro	0,01	0,027	-0,018		284
Fosfato	0,02	0,018	0,002	2,87E-05	90

5. Discusión

5.1. Condiciones y biomasa

En condiciones de iluminación natural, las variaciones en la altura de las plantas no implican un cambio en la intensidad solar notable, las variaciones en intensidad se deben a condiciones climáticas, las estaciones u otras obstrucciones físicas como otras plantas. En el caso de las lámparas LED en cambio al crecer las plantas estas se acercan más a los LED y con ellas aumenta la cantidad de radiación recibida. Otros efectos como la posición del LED, la interacción con la luz de otros LEDs u objetos que reflejen la luz cercanos (como paredes blancas) pueden dar lugar a cambios en la intensidad. La obtención de una intensidad adecuada en un menor volumen puede ser un factor de interés a la hora de optimizar el cultivo. Tal y como se ve en la **Figura 5**, las intensidades son menores en los extremos del sistema, curiosamente, las muestras con menor biomasa obtenidas fueron las que se encontraban en estas posiciones. Y lo inverso también se cumplió, la muestras con mayor biomasa se encontraban en la zona central en la que la intensidad era más alta. En otros estudios realizados con *L. sativa* se utilizan intensidades mayores a $200 \mu\text{mol} / \text{m}^2$ (Lin et al., 2013) en incluso se han visto mejoras en biomasa con intensidades de hasta $600 \mu\text{mol} / \text{m}^2$ (Colonna et al., 2016; Fu et al., 2012). Sería conveniente realizar ajustes en altura o aumentar el porcentaje de potencia máximo de los LED para mejorar la producción. Reducir la distancia a las hojas e incluso reducir la potencia utilizada en la medida de lo posible sería lo óptimo para evitar tener un mayor consumo de energía. Esta es una estrategia viable, pero si las plantas llegaran a acercarse demasiado a la fuente de luz podrían generar zonas de sombra que afecten al crecimiento de plantas colindantes o recibir daño por el exceso de luz (Brazaityte et al., 2016). Se requieren más datos para comprobar si la ubicación dentro del sistema es un factor relevante, en un sistema a mayor escala probablemente estas variaciones pasen desapercibidas ya que se utilizarían hileras más largas de LEDs. Pero sería de interés observar si este fenómeno se repite en estudios subsiguientes.

En cuanto al espectro de luz, al estar más repartida la intensidad en todo el espectro (**Figura 6**) la radiación útil que recibe la planta puede ser menor. La radiación PAR se define como la radiación entre 400 y 700 nm, aunque los cloroplastos de la planta sean capaces de absorber cierta energía de todo el rango, hay una caída considerable en el rango 500 – 600 nm (verde y amarillo) (Taiz. L. y Zeiger, 2003). Esto se ve reflejado en la eficiencia del uso de energía por biomasa **Figura 9**. Los cultivos con LED hacen un mejor aprovechamiento de la luz que reciben (Graamans et al., 2018). Dentro de los cultivos LED la diferencia es menor, siendo la mejor eficiencia la de la CA3, esta diferencia podría ser más relevante si hubiera variaciones entre los espectros de luz utilizados en las distintas áreas de control.

La temperatura es uno de los factores más importantes para la velocidad de crecimiento de un cultivo (Hatfield & Prueger, 2015). En el caso de este cultivo las temperaturas son considerablemente

similares, la mayor variación en temperatura (que en si misma pudiera suponer un estrés adicional para la planta) dificulta la comparación.

Con respecto a la biomasa obtenida **Figura 8**, la diferencia en obtención de biomasa solo se dio entre el CA1 y el LAU1, no en el caso de los otros dos cultivos. El CA1 fue el que mayor intensidad total diaria aportaba, por lo que puede que haya una tendencia a obtener una mayor biomasa a mayor tiempo de iluminación a la intensidad total en este caso. Cabe recordar que esto supone un mayor consumo eléctrico.

Al normalizar la biomasa obtenida con el consumo de cada una de las CA, no se ven diferencias notables entre los métodos utilizados. En futuros estudios podrían utilizarse condiciones con diferencias más notables para ver si las diferencias resultan más relevantes. A pesar de ello se ve una tendencia ascendente en productividad por Wh al usar menos tiempo de iluminación (CA3).

La mayor diferencia entre el cultivo con LED y el LAU1 parece ser la proporción de hoja raíz. El cultivo en la LAU1 tiene una mayor proporción de peso en la raíz, un 62% más que el CA1. La luz recibida por las lechugas de la LAU1 podría generar estas diferencias en el crecimiento de la lechuga; recibir un mayor estrés por radiación UV, y radiación en otras longitudes de onda puede promover el crecimiento secundario de la planta dando lugar a un mayor crecimiento de las raíces. Otra posible razón es que la evaporación de la solución de nutrientes sea mayor en los sacos de perlita del LAU1 y esto haga que la planta dedique más recursos a las raíces.

5.2. Balance de materia

Se desconoce la causa exacta del problema en el balance de materia (**Tabla 1**). Es poco probable que la aparición se deba a que el sistema tuviera acumulado nitrato, nitrito o cloruro en la perlita, el sistema de riego, o la tierra adherida al plantel de lechuga; y que esta se disolviera en el riego. Lo más probable es que sea un problema de precisión a la hora de medir las concentraciones de los compuestos. El hecho de que la desviación estándar relativa para las muestras medidas sea superior al 100% (**Anexo II**) dificulta sacar conclusiones de los datos obtenidos. Las causas tras esta variabilidad pueden estar en el muestreo o manipulación de las muestras.

6. Conclusión

Como prueba de concepto se ha visto que el sistema funciona correctamente y es capaz de producir lechugas con un rendimiento comparable al de un invernadero en condiciones similares. La producción de biomasa y las condiciones de temperatura fueron similares para el i-RTG y el cultivo con LEDs, estas condiciones se han dado en la segunda mitad de otoño en Barcelona. A pesar de tener

una eficiencia alta del uso de la luz, el cultivo en interior no deja de suponer un gasto superior en cuanto al coste energético. En otras localizaciones, con un clima más adverso y menos luz solar las granjas verticales pueden resultar más rentables, sobre todo en aquellas en las que ya se utiliza algún tipo de climatización artificial. A la hora de idear un cultivo a mayor escala lo óptimo sería adaptar el edificio para hacer un mejor uso de la luz natural y la climatización del edificio. Podría ser útil evitar tener extremos aislados entre los LEDs y cubrir el sistema de paredes blancas para evitar perder intensidad de luz en los bordes del sistema de iluminación. Independientemente del régimen de iluminación establecido, cuya evaluación correcta requiere de un mayor número de muestras y tiempo, puede ser de interés para las plantas creciendo exclusivamente con LEDs el utilizar el sistema en las horas con menor coste por kWh. Reducir el tiempo de iluminación para ajustarla a estos horarios compensando con un aumento de intensidad de luz podría suponer un ahorro al operar la planta. Además, esto puede permitir aprovechar energía solar captada durante el día con sistemas como paneles solares. Finalmente, durante la puesta a punto se observó la importancia de evitar tiempos de residencia o zonas estancas, que serían relevantes al utilizar elementos no estériles como el agua de lluvia al diseñar un sistema de riego.

7. Anexos

7.1. Anexo I: Puesta a punto del sistema

Durante los primeros dos meses se realizó una puesta a punto del sistema en la que se cultivó el mismo número de lechugas pero en dos áreas de control la primera con 8 lechugas con una intensidad de $143.4 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$ y la segunda a $155.8 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$. El cultivo se inició el 17/09/2019 y finalizó el 18/10/2019 (41 días de duración).

Durante los primeros días hubo problemas con la programación de riego al cruzarse el riego de otros cultivos con el riego establecido para este cultivo dando lugar a un exceso de riego. Tras ajustarse este error se observó que el riego mejoró, pero seguía siendo superior al que debería ser teóricamente. Los goteos continuaban echando agua más tiempo del necesario. El sistema está instalado en el sótano (-2) del edificio, y el sistema de riego se encuentra en el LAU1 (4. piso), la solución con nutrientes llegaba al sistema mediante un tubo con un volumen aproximado de 60 L. Los problemas de riego se atribuyeron a las diferencias de presión que generaba la diferencia de altura en esta tubería, por lo que para evitar el problema se instaló una electroválvula en el sótano que abriera y cerrara el riego a las horas previstas en el propio sótano. Esto corrigió el exceso de riego.

Al día 8/10/2019 (día 21) se detectó una contaminación en el riego (olor a huevo podrido en el sistema y gas en las muestras). Se realizó un lavado de la tubería con agua sin nutrientes para retirar el agua

contaminada y se hizo circular agua limpia de nuevo. El origen de la contaminación fue la tubería que descendía desde el LAU1. En este momento de la prueba el riego era de un minuto, tres veces al día, que en total daba un caudal de 2.16 L/día, con este caudal la tubería tenía un tiempo de residencia aproximado de 28 días. El agua de lluvia utilizado no es estéril y puede contener materia orgánica (heces de aves u otros materiales orgánicos). La contaminación no se da en ninguno de los tanques que almacenan el agua de lluvia o nutrientes si no en la mezcla, y solo en la tubería dirigida al sótano. Lo más probable es que uniendo la materia orgánica con sales como el nitrato el sulfato y el tiempo de residencia necesario en la tubería (en condiciones anóxicas), se diera un crecimiento de bacterias desnitrificantes y reductoras de sulfato. En los riegos de la planta superior tanto la cantidad de riego como el volumen de tubería eran menores por lo que no se daba contaminación alguna. Se realizó una comprobación rápida con tiras colorimétricas para el nitrato y se observó un descenso notable en la concentración del nitrato en el riego del sótano. Se realizaron varias propuestas para resolver el problema: pasar la solución de nutrientes a través del filtro UV que se utiliza para limpiar los lixiviados, realizar la mezcla de nutrientes y agua en el sótano con dos dosatrones nuevos, utilizar un mayor caudal para reducir el tiempo de residencia. Se optó por la última opción al ser la menos compleja y costosa, se continuó regando de forma normal hasta que reapareció la contaminación a los 9 días, con lo que se determinó que el tiempo de residencia debía ser menor a este. Finalmente se aumentó el número de riegos a tres riegos de tres minutos y se retiró solución de nutrientes con una salida adicional desde el sótano para asegurar que no llegara a contaminarse de nuevo. Posteriormente se espera aumentar el número de lechugas plantadas para que el caudal de riego por si solo sea suficiente como para evitar la contaminación.

Además de esto se observó un crecimiento de algas en los canales para los lixiviados **Figura 9**. Estas algas retienen y dificultan la correcta medición de los lixiviados por lo que se tuvieron que retirar al inicio del nuevo cultivo. Con los plásticos puestos a modo de cortina se evitó el crecimiento de algas en los canales para los lixiviados.



Figura 10: Montaje inicial de cultivo con LED (izquierda) y crecimiento de algas en los canales de drenaje de lixiviados.

7.2. Anexo II: Datos de balance de materia

	Promedio (mg / mL)					
	SOL	GA	GS	LIX 1	LIX 3	LIX 4
N-Nitrato	40.48	39.03	46.10	85.49	83.20	95.63
N-Nitrito	0.81	0.87	1.09	2.97	2.38	2.86
S-Sulfato	70.15	58.04	79.72	56.00	51.81	66.96
S-Tiosulfato	0.02	0.01	0.04	0.05	0.04	0.03
Cloruro	0.08	0.10	0.06	0.30	0.18	0.20
Fosfato	0.12	0.15	0.14	0.09	0.27	0.10

	Desviación estandar relativa					
	SOL	GA	GS	LIX 1	LIX 3	LIX 4
N-Nitrato	35%	54%	29%	73%	77%	63%
N-Nitrito	49%	15%	125%	67%	83%	69%
S-Sulfato	15%	53%	22%	101%	100%	78%
S-Tiosulfato	175%	245%	61%	153%	97%	116%
Cloruro	87%	72%	112%	40%	19%	19%
Fosfato	114%	85%	78%	111%	129%	163%

7.3. Anexo III: Inventario LCA

Valores ajustados a 34 días de cultivo y 24 lechugas cultivadas a partir de los datos utilizados por (Rufi-Salís et al., 2020).

7.3.1. Inventario exclusivo de cultivo con LEDs

* El sistema actual esta diseñado para poder ajustar la altura de los LEDs con mayor facilidad con un sistema de poleas. Para el inventariado no se tuvo en cuenta la parte del cultivo para hacerlo móvil. Muchos de los datos sobre el equipo de LEDs y otros materiales de la estructura no estaban disponibles a la hora de cuantificar sus materiales y masas.

Inventario de materiales exclusivos del cultivo con LEDs sin parte móvil*							
		Cantidad	Unidad	Material	kg / unidad de medida	Esperanza de vida (años)	kg totales
Estructura	Barras de aluminio (40 mm)	21,48	m	Aluminio	1,293	50	1389,196
	Escuadra pequeña	8	u	Aluminio	0,117	50	46,760
	Juego tornillos escuadra	8	u	Hierro	0,415	50	166,000
	Tornillos para barras	32	u	Hierro		50	
	Bridas	24	u	Nylon		50	
	Barras de hierro	16,52	m	Hierro		50	
	Soporte de hierro cruzado	1,58	m	Hierro		50	
	Soporte de hierro (forma I=I)	2	u	Hierro		50	
	Pies para soporte de hierro	6	u	Goma		50	
				Hierro		50	
	Llave de paso	2		PVC		10	
Soporte	33180	m^2	EPS	0,000	5	20,076	
Riego	Flow meter	1	u	Cast Iron	2,375	10	23,750
				HDPE	0,125	10	0,000
	Electroválvula	1	u	PVC	0,374	10	3,737
	Válvula de bola (32 mm)	2	u			10	
	Tubo (32 mm)	2,2	m	PVC		10	
	Tubo central de riego	3,99	m	LDPE		10	
	Tapón final	1	u	PVC		10	
	Inserción gotero	24	u	PVC		10	
	Tubos de gotero	24	u	PVC		10	
	Goteros	24	u	PVC		10	
	Plástico de cobertura	205,7	m^2	LDPE		10	
	Cubos de recogida lix 10 L	4	u	Polipropileno	0,360	10	14,400
LEDs	LEDs	6	u			10	
	Cables grueso LED x 6 LED	3,9	m			10	
	Cable delgado LED x 12 LED	8,16	m			10	
	Cable alimentación (verde)	3,96	m			10	
	Cable verde alargador	1,75	m			10	
	Cable a controlador		m			10	
	Uniones de cables 2 a 1	5	u			10	
	Router	1	u			10	
	Lighting controller	1	u			10	
	PoE switch	1	u			10	
	Node	1	u			10	

7.3.2. Inventario común con LAU1

		Elemento	Material	Unidad	kg/unidad	Esperanza de vida (años)	Total kg (50 años)	
Estructura	Sistema de recogida de agua de lluvia	Tanque de agua	GFRP	4051,7	1	50	4051,70	
		Tuberías	HDPE	1,2	50	10	305,00	
		Bomba	Cast iron	13,2	1	10	65,79	
			Steel	1,5		10	7,74	
		Transporte	Transporte, camión (tkm)	GFRP	60,0		50	486,20
			Transporte, furgoneta (tkm)	pipes, pump	60,0		50	45,42
	Instalación	Excavación (m³)				50	100	
	Fin de vida	Rellenado (m³)		100,0	0,128	50	12,80	
		Transporte, camión (tkm)		30		50	265,81	
		Vertedero (kg)				50	305,00	

		Elemento	Material	Unidad	kg/unidad	Esperanza de vida (años)	Total kg (50 años)
Equipo Auxiliar	Materiales / Producción	Bomba + interruptor de presión	Cast iron	1	8,772	10	43,860
			Steel		1,032	10	5,160
			HDPE		0,516	10	2,580
		Programador digital	HDPE	1	0,513	10	2,565
			Electronics		0,027	10	0,135
		DOSATRON	PP	2	0,795	10	7,950
		Tubería 32 mm d.	PVC	1	0,84	10	4,215
		Tubería 25 mm d.	PVC	1	3,02	10	15,120
		Juntas	PVC	16	0,27	10	21,600
		Tanque de nutrientes	PE	2	4,07	10	40,654
		Tanque de agua	PE	2	7,52	10	75,210
		Medidor de caudal	Cast iron	2	2,375	10	23,750
			HDPE		0,125	10	1,250
		Adhesivo PVC		125	mL	10	0,781
	Disolvente PVC		500	mL	10	2,000	
	TRANSPORT	Furgoneta (tkm)		35,0		10	86,390
	END OF LIFE	Van (tkm)		30,0		10	74,049
Vertedero (kg)					10	409,73	

7.3.3. Inventario operacional

		Unidad	Total
Nutrientes	KPO4H2	kg	1,2

	KNO ₃	kg	1,4
	K ₂ SO ₄	kg	3,8
	Ca(NO ₃) ₂	kg	4,5
	CaCl ₂ *2H ₂ O	kg	1,3
	Mg(NO ₃) ₂	kg	0,7
	Hortrilon	kg	0,1
	Sequestrene	kg	0,1
	Emisiones al aire - Ammoniac (NH ₃)	kg	0,032483
	Emisiones al aire - Dinitrogeno monoxido (N ₂ O)	kg	0,013535
	Emisiones al aire- Oxidos de nitrogeno (NO _x)	kg	0,001353
Transporte	Agua de lluvia	kg	8802
	Agua corriente	kg	0
	Agua total	kg	8802
Pesticidas	Spintor (densidad 1,09g/cm ³)	kg	0,00459
	Jabón de potasio	kg	0
	Costar (80% <i>Bacillus thuringiensis</i>)	kg	0
	Sulfuro humedecible	kg	0,12281
	MeemAzal (10g/litre de C35H44O16)	kg	0

		km	tkm
Transporte	Fertilizantes	35	0,06366816
	Pesticidas	35	0,0006258
	Sustrato	850	0,08164955

		Total
Plantas de criadero	Diesel	0,0041
	Electricidad	0,027
	Transporte	1,965

8. Agradecimientos

Agradecimientos a los miembros del grupo SosteniPra por su paciencia y colaboración en el trabajo. En especial a Felipe Parada por instruirnos en el procesamiento de las muestras para las digestiones y aportar consejos en cuanto al sistema, a Ramiro González por su ayuda con el sistema de riego y los problemas que encontramos en este y a Martí Rufi por la realización de los análisis de las muestras de riego y la información cedida para el inventario. Así como a las estudiantes de prácticas de grado Sara Soriano y María Fernanda Barreiro por ofrecer su apoyo durante el trabajo.

9. Referencias

Brazaityte. A. Viršile. A. Samuoliene. G. Jancauskiene. J. Sakalauskiene. S. Sirtautas. R. Novičkovas. A. Dabašinskas. L. Vaštakaite. V. Miliauskiene. J. & Duchovskis. P. (2016). Light

- quality: Growth and nutritional value of microgreens under indoor and greenhouse conditions. *Acta Horticulturae*. 1134. 277–284. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.37>
- Cocetta, G. Casciani, D. Bulgari, R. Musante, F. Kołton, A. Rossi, M. & Ferrante, A. (2017). Light use efficiency for vegetables production in protected and indoor environments. In *European Physical Journal Plus* (Vol. 132, Issue 1). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2017-11298-x>
- Colonna, E. Roupshael, Y. Barbieri, G. & de Pascale, S. (2016). Nutritional quality of ten leafy vegetables harvested at two light intensities. *Food Chemistry*. 199. 702–710. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.068>
- Corcelli, F. Fiorentino, G. Petit-Boix, A. Rieradevall, J. & Gabarrell, X. (2019). Transforming rooftops into productive urban spaces in the Mediterranean. An LCA comparison of agri-urban production and photovoltaic energy generation. *Resources, Conservation and Recycling*. 144. 321–336. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.040>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). *The future of food and agriculture: trends and challenges*.
- Fu, W. Li, P. & Wu, Y. (2012). Effects of different light intensities on chlorophyll fluorescence characteristics and yield in lettuce. *Scientia Horticulturae*. 135. 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.12.004>
- Gómez, C. & Izzo, L. G. (2018). Increasing efficiency of crop production with LEDs. In *AIMS Agriculture and Food* (Vol. 3, Issue 2, pp. 135–153). AIMS Press. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2018.2.135>
- Graamans, L. Baeza, E. van den Dobbelsteen, A. Tsafaras, I. & Stanghellini, C. (2018). Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems*. 160. 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003>
- Hatfield, J. L. & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
- Ji, Y. Ouzounis, T. Courbier, S. Kaiser, E. Nguyen, P. T. Schouten, H. J. Visser, R. G. F. Pierik, R. Marcelis, L. F. M. & Heuvelink, E. (2019). Far-red radiation increases dry mass partitioning to fruits but reduces *Botrytis cinerea* resistance in tomato. *Environmental and Experimental Botany*. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103889>
- Kalaitzoglou, P. van Ieperen, W. Harbinson, J. van der Meer, M. Martinakos, S. Weerheim, K. Nicole, C. C. S. & Marcelis, L. F. M. (2019). Effects of continuous or end-of-day far-red light on tomato plant growth, morphology, light absorption, and fruit production. *Frontiers in Plant Science*. 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00322>
- Kang, J. H. KrishnaKumar, S. Atulba, S. L. S. Jeong, B. R. & Hwang, S. J. (2013). Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system. *Horticulture Environment and Biotechnology*. 54(6). 501–509. <https://doi.org/10.1007/s13580-013-0109-8>
- Lambin, E. F. & Meyfroidt, P. (2011). Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 108(9). 3465–3472. <https://doi.org/10.1073/pnas.1100480108>
- Lanoue, J. Leonardos, E. D. & Grodzinski, B. (2018). Effects of light quality and intensity on diurnal patterns and rates of photo-assimilate translocation and transpiration in tomato leaves. *Frontiers in Plant Science*. 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00756>
- Taiz, L. and Zeiger, (2003). E. Plant physiology, 3rd edn. *Annals of Botany*. 91(6). 750–751. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg079>
- Lim, S. R. Kang, D. Ogunseitan, O. A. & Schoenung, J. M. (2011). Potential environmental impacts of light-emitting diodes (LEDs): Metallic resources, toxicity, and hazardous waste classification. *Environmental Science and Technology*. 45(1). 320–327. <https://doi.org/10.1021/es101052q>
- Lin, K. H. Huang, M. Y. Huang, W. D. Hsu, M. H. Yang, Z. W. & Yang, C. M. (2013). The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of

- hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata). *Scientia Horticulturae*. 150. 86–91. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.10.002>
- Moritz. C. & Agudo. R. (2013). The future of species under climate change: ¿Resilience or decline? In *Science* (Vol. 341. Issue 6145. pp. 504–508). American Association for the Advancement of Science. <https://doi.org/10.1126/science.1237190>
- Naznin. M. T. Lefsrud. M. Gravel. V. & Azad. M. O. K. (2019). Blue light added with red LEDs enhance growth characteristics. pigments content. and antioxidant capacity in lettuce. Spinach. Kale. Basil. and sweet pepper in a controlled environment. *Plants*. 8(4). <https://doi.org/10.3390/plants8040093>
- Orsini. F. Kahane. R. Nono-Womdim. R. & Gianquinto. G. (2013). Urban agriculture in the developing world: A review. In *Agronomy for Sustainable Development* (Vol. 33. Issue 4. pp. 695–720). <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0143-z>
- Rufi-Salís, M., Petit-Boix, A., Villalba, G., Ercilla-Montserrat, M., Sanjuan-Delmás, D., Parada, F., Arcas, V., Muñoz-Liesa, J., & Gabarrell, X. (2020). Identifying eco-efficient year-round crop combinations for rooftop greenhouse agriculture. *International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01724-5>