



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GANADERÍA

EVALUACIÓN PRODUCTIVA DE LA ALFALFA (*Medicago sativa*) BAJO UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN VERTICAL

BENITO BELLO OLIVERA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **Evaluación productiva de la alfalfa (*Medicago sativa*) bajo un sistema de producción vertical**, realizada por el estudiante: **Benito Bello Olivera**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GANADERÍA

CONSEJO PARTICULAR

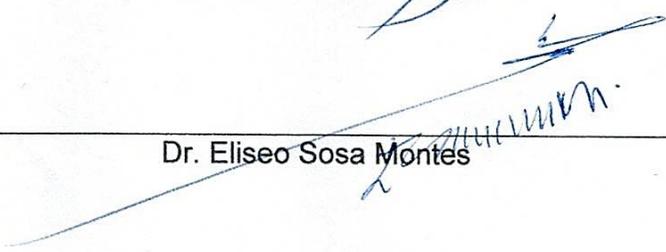
CONSEJERO (A)


Dr. Sergio Iban Mendoza Pedroza

ASESOR (A)


Dr. José Ricardo Bárcena Gama

ASESOR (A)


Dr. Eliseo Sosa Montes

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Septiembre del 2022

EVALUACIÓN PRODUCTIVA DE LA ALFALFA (*Medicago sativa* L.) BAJO UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN VERTICAL

Benito Bello Olivera, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

Las fuentes de luz artificial pueden favorecer el proceso de fotosíntesis, lo que optimiza los recursos naturales y aumenta la producción de biomasa por m^{-2} , por lo tanto, el objetivo del presente trabajo de investigación fue estudiar los efectos de las fuentes de luz artificial sobre el crecimiento de plantas de alfalfa (*Medicago sativa* L.). El experimento se estableció en cuatro estantes de una altura de 2.50 m con tres divisiones cada uno, cada división de 80 x 60 cm de largo y ancho, respectivamente. Se cuantificó el gasto energético por lámpara, la intensidad de fotones y la producción de materia seca. Los datos indicaron que la lámpara LED fue más eficiente energéticamente, sin embargo, la mayor producción de materia seca se encontró con la luz solar, al obtener valores de 391 g m^{-2} y la menor producción con la lámpara incandescente con 17 g m^{-2} .

Posteriormente se realizó un segundo experimento tomando como base los resultados del primer experimento con la mejor fuente de luz artificial. La producción de materia seca con luz solar vs luz LED tuvo diferencia significativa ($P < 0.05$) cuando la luz LED se aplicó sobre un cultivo de alfalfa pura, sin embargo, cuando no se eliminaron las malezas, esta diferencia no fue significativa. El 83 % de la maleza producida correspondió a la especie acederilla (*Oxalis spp*). La actividad fotosintética a $700 \mu\text{mol m}^{-2}$ fue superior en la alfalfa vs la acederilla, no obstante, a medida que la intensidad luminosa disminuyó, los valores se invirtieron. Se obtuvieron valores superiores de nutrientes digestibles totales, energía digestible, energía metabolizable y energía neta con la acederilla producida mediante luz artificial con relación a los obtenidos con alfalfa, por lo que se sugiere estudiar otras especies como acederilla, la cual puede generar mayor eficiencia en el uso de iluminación artificial y obtener un buen potencial nutritivo.

Palabras clave: acederilla, luz LED, tasa fotosintética.

PRODUCTIVE EVALUATION OF ALFALFA (*Medicago sativa* L.) UNDER A VERTICAL PRODUCTION SYSTEM

Benito Bello Olivera, (MC)
Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

Artificial light sources can favor the photosynthesis process, which optimizes natural resources and increases biomass production per m⁻², therefore, the objective of this research work was to study the effects of artificial light sources on the growth of alfalfa plants (*Medicago sativa* L.). The experiment was established on four shelves with a height of 2.50 m with three divisions each, each division 80 x 60 cm long and wide, respectively. The energy expenditure per lamp, the intensity of photons and the production of dry matter were quantified. The data indicated that the LED lamp was more energy efficient, however, the highest production of dry matter was found with sunlight, obtaining values of 391 g m⁻² and the lowest production with the incandescent lamp with 17 g m⁻².

Subsequently, a second experiment was carried out based on the results of the first experiment with the best artificial light source. Regarding dry matter production with sunlight vs. LED light, a significant difference ($P < 0.05$) was observed when the LED light was applied on a pure alfalfa crop, however, when weeds were not eliminated, this difference was not significant. 83 % of the weeds produced corresponded to the sorrel species (*Oxalis* spp). Photosynthetic activity at 700 $\mu\text{mol m}^{-2}$ was higher in alfalfa vs. sorrel, however, as light intensity decreased, the values inverted. Higher values of total digestible nutrients, digestible energy, metabolizable energy and net energy were obtained with sorrel produced by artificial light in relation to those obtained with alfalfa, for which it is suggested to study other species such as sorrel, which can generate greater efficiency in the use of artificial lighting and obtain a good nutritional potential.

Key words: Sherlock, LED light, photosynthetic rate.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la salud y permitirme vivir en esta vida, brindarme las herramientas para poder culminar mis estudios y permitirme poder seguir a delante.

A mis padres Floriberta Olivera Cortes y Benito Bello Radilla, gracias por el gran amor brindado, los valores enseñados y la confianza que siempre tuvieron en mi lo cual me ayudó mucho a superar muchas adversidades.

A mi esposa María Guadalupe Zambrano Velasco Gracias por el amor, el apoyo, y toda la ayuda que me has brindado para poder lograr esta meta.

A mis hijas, Hannia Sofia Bello Zambrano y Alana Amalie Bello Zambrano, gracias por existir y ser el motor de mi vida.

A mi segunda mamá Silvia López Santoyo, gracias por el cariño y el gran apoyo que he recibido de usted para poder tener muchos de los logros que actualmente he tenido.

A mis hermanos Armando, Delfina, Ulises, Rosalba y Beatriz gracias por el apoyo brindado, por los consejos y por ser un ejemplo a seguir, así como a Erick Rosas López y Axel Rosas López gracias por darme el privilegio de permitirme ser un hermano más y gozar de su cariño y compañía.

Al Dr. Sergio Iban Mendoza Pedroza, gracias por la enseñanza, los consejos y sobre todo por brindarme su amistad.

Al Dr. Ricardo Bárcena Gama, gracias por el tiempo y paciencia dedicados a mi desarrollo y en la obtención de este grado.

Al Dr. Eliseo Sosa Montes, gracias por todas las enseñanzas que me ha brindado desde como alumno en el departamento de zootecnia, posteriormente en el laboratorio de nutrición y ahora en la obtención de este grado, no tengo más que admiración y agradecimiento hacia su persona.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme el apoyo económico necesario para poder realizar esta investigación, así como para poder lograr el grado de Maestro en Ciencias.

Al Colegio de Postgraduados, al campus Montecillos y al Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad y en especial a la orientación en ganadería por prestarme sus maravillosas instalaciones para poder realizar esta investigación. A todos los profesores y trabajadores administrativos que sin alguno de ellos no fuera posible este logro.

Al Laboratorio de Nutrición del Departamento de Zootecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, gracias por permitirme ser parte de este equipo por las grandes enseñanzas brindadas de mis compañeros (M.C. Esther Sosa Montes, Q.F.B. Hilda Flores Brito, Dr. Eliseo Sosa Montes, Dr. José Isidro Alejos de la Fuente, M.C. Gustavo Alejandro García Uriza⁺, Eva Irma Ponce Herrera, Emilio David López Calva y Aldo Roque Cebrero Luna).

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
LISTAS DE CUADROS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO I. EFECTO DE LUZ ARTIFICIAL SOBRE LA PRODUCCIÓN DE ALFALFA (<i>Medicago sativa</i> L.)	2
1.1 RESUMEN	2
1.2 ABSTRACT	3
1.3 INTRODUCCIÓN	4
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS	5
1.4.1 Rendimiento de materia seca	6
1.4.2 Tasa fotosintética	7
1.4.3 Análisis estadístico	8
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
1.6 CONCLUSIONES	12
CAPÍTULO II. EFECTO DE LA LUZ LED SOBRE LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE CON Y SIN MALEZA	13
2.1 RESUMEN	13
2.2 ABSTRACT	14
2.3 INTRODUCCIÓN	15
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS	16
2.4.1 Rendimiento de materia seca	17
2.4.2 Análisis químico de la materia seca	17
2.4.3. Intensidad de luz emitida y consumo de energía	18
2.4.4 Actividad fotosintética	18
2.4.5 Análisis estadístico	18
2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
2.5.1 Actividad fotosintética de la alfalfa y acederilla	20

2.6 CONCLUSIONES	22
CONCLUSIONES GENERALES.....	23
LITERATURA CITADA.....	24

LISTAS DE CUADROS

Cuadro 1. Potencia (W o $J s^{-1}$), intensidad del flujo fotónico ($\mu\text{mol fotones m}^{-2} s^{-1}$) y eficiencia de las fuentes de luz artificial ($\mu\text{mol m}^{-2} s^{-1} W^{-1}$), a diferentes distancias del suelo.	9
Cuadro 2. Intensidad de flujo fotónico ($\mu\text{mol fotones m}^{-2} s^{-1}$), rendimiento de materia seca ($g m^{-2}$) y rendimiento por unidad de flujo fotónico ($g s \mu\text{mol}^{-1}$) de alfalfa con distintas fuentes de luz a 10 cm del suelo.....	11
Cuadro 3. Tasa fotosintética de alfalfa ($\mu\text{mol CO}_2 m^{-2} s^{-1}$) con distintas fuentes de luz a 1, 10 y 20 cm del suelo.	12
Cuadro 4. Intensidad de flujo fotónico ($\mu\text{mol fotones m}^{-2} s^{-1}$), rendimiento de materia seca ($g m^{-2}$) y proporciones de alfalfa y maleza en base seca (%), aplicando 18 h de luz.	19
Cuadro 5. Tasa fotosintética ($\mu\text{mol CO}_2 m^{-2} s^{-1}$) de alfalfa y maleza (acederilla) con luz LED y solar a distintas intensidades de flujo fotónico ($\mu\text{mol m}^{-2} s^{-1}$).	20
Cuadro 6. Composición química nutricional de las especies producidas con luz LED y luz solar.	22

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estante con tres divisiones de 80 x 60 cm	5
Figura 2. Plantas de alfalfa en maceta	7
Figura 3. Medición con IRGA en planta de alfalfa.	8

INTRODUCCIÓN GENERAL

El gran aumento de la población humana ha generado un gran reto para la producción de alimentos, aunado al elevado costo de la tierra y la escasez de agua, por lo cual existe una mayor preocupación para lograr el uso eficiente de los recursos, fundamentalmente: agua, suelo y planta.

Los rumiantes son animales herbívoros con baja eficiencia para transformar alimento en proteína animal. Algunos expertos indican que los alimentos que actualmente estos producen pudieran ser disminuidos de la dieta humana, tales como la carne y la leche. Para evitar este problema es necesario aumentar la eficiencia alimenticia de estas especies y/o hacer más eficiente la producción de su alimento, principalmente la fuente de fibra.

En este contexto, la alfalfa es considerada como la reina de los forrajes por el gran aporte de proteína, su alta digestibilidad y su rendimiento. No obstante, también es conocido su alto requerimiento de agua para la producción por lo que se limita su utilización. En países como Japón se han generado tecnologías para producir vegetales en ambientes controlados y distintos estratos con luz artificial por medio de lámparas, lo que aumenta la producción por metro cuadrado y genera una mayor eficiencia del agua respecto a la producción al aire libre, pero esto solo se ha destinado a la producción de hortalizas.

Por lo que la presente investigación tiene como objetivo generar la producción de alfalfa en invernadero con luz artificial, lo cual generé bases para un nuevo futuro en la producción de forraje.

CAPÍTULO I. EFECTO DE LUZ ARTIFICIAL SOBRE LA PRODUCCIÓN DE ALFALFA (*Medicago sativa* L.)

1.1 RESUMEN

Las fuentes de luz artificial pueden favorecer el proceso de fotosíntesis, lo que optimiza los recursos naturales y aumenta la producción de biomasa por m^{-2} , por lo tanto, el objetivo del presente trabajo de investigación fue estudiar los efectos de las fuentes de luz artificial sobre el crecimiento de plantas de alfalfa (*Medicago sativa* L.). El experimento se estableció en cuatro estantes de una altura de 2.50 m con tres divisiones cada uno, cada división de 80 x 60 cm de largo y ancho, respectivamente. En tres de las divisiones superiores se permitió que incidieran los rayos solares, en las nueve divisiones restantes se colocaron tres fuentes diferentes de luz artificial (LED, incandescente y fluorescente) tres divisiones por cada fuente de luz, a una densidad de cuatro lámparas por división. Se cuantificó el gasto energético por lámpara, la intensidad de fotones y la producción de materia seca. Los datos indicaron que la lámpara incandescente tuvo un gasto energético 8 veces mayor al gasto de la lámpara LED y 3.5 veces mayor que la fluorescente, sin embargo, la intensidad de luz emitida es 3 y 2 veces mayor en la lámpara LED vs incandescente y fluorescente respectivamente, la mayor producción de materia seca se encontró con la luz solar, al obtener valores de 391 g m^{-2} y la menor producción con la lámpara incandescente con 17 g m^{-2} . Con los datos obtenidos se concluye que la luz LED puede ser una alternativa viable en un futuro para producir alimento destinado al consumo animal.

Palabras claves: Rendimiento de materia seca, LED, fluorescente, incandescente.

1.2 ABSTRACT

Artificial light sources can favor the photosynthesis process, which optimizes natural resources and increases biomass production per m^{-2} , therefore, the objective of this research work was to study the effects of artificial light sources on the growth of alfalfa plants (*Medicago sativa* L.). The experiment was established on four shelves with a height of 2.50 m with three divisions each, each division 80 x 60 cm long and wide, respectively. In three of the upper divisions the sun's rays were allowed to penetrate, in the remaining nine divisions three different sources of artificial light (LED, incandescent and fluorescent) were placed, three divisions for each light source, at a density of four lamps per division. The energy expenditure per lamp, the intensity of photons and the production of dry matter were quantified. The data indicated that the incandescent lamp had an energy expenditure 8 times higher than the LED lamp and 3.5 times higher than the fluorescent, however, the intensity of light emitted is 3 and 2 times higher in the LED lamp vs incandescent and fluorescent. respectively, the highest production of dry matter was found with sunlight, obtaining values of 391 g m^{-2} and the lowest production with the incandescent lamp with 17 g m^{-2} . With the data obtained, it is concluded that LED light can be a viable alternative in the future to produce food for animal consumption.

Keywords: Dry matter, LED, fluorescent, incandescent.

1.3 INTRODUCCIÓN

La luz juega un papel central en la fisiología y ecología de las plantas. Las plantas utilizan la luz como recurso, a través de la fotosíntesis, y como fuente de información (Bennie *et al.*, 2016), la luz es una de las señales ambientales más importantes que afectan a la planta en desarrollo y regulan su comportamiento (Whitelam y Halliday, 2007). En la práctica comercial, las plantas de invernadero se suministran con luz suplementaria durante un máximo de 16-20 h por día y la intensidad de la luz oscila entre 100 y 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Paradiso *et al.*, 2011), pero se utilizan niveles más bajos para especies adaptadas a la sombra. Por ejemplo, de acuerdo con Ouzounis *et al.*, (2015) en instalaciones comerciales de Escandinavia se suministra entre 300–500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ para tomates (*Lycopersicum esculentum*).

El proceso de fotosíntesis puede generarse por medio de fuentes de luz artificial donde se incluyen lámparas incandescentes (LI), lámparas fluorescentes (LF) y diodos emisores de luz (LED) (Massa *et al.*, 2008). No obstante, los diferentes tipos de fuentes de luz artificial tienen diversas calidades de luz para el crecimiento de las plantas. Por ejemplo, las LI se usan principalmente para extender el tiempo de iluminación durante las estaciones con un período de luz diurno corto; éstas convierten solo el 15% de la energía eléctrica utilizada en luz para la fotosíntesis de las plantas, mientras que el 85% restante se convierte en calor que no es útil y puede ser dañino para las plantas (Massa *et al.*, 2008).

La tecnología LED aún no se ha integrado completamente en el sistema de control de invernaderos y debe optimizarse en términos de salida y distribución de luz, mientras que el costo de las luminarias LED debe reducirse para alcanzar una producción sostenible y económicamente viable (Morrow, 2008)

La luz de las LF se ha aplicado comercialmente en el cultivo de vegetales, usa menos energía eléctrica y proporciona mejor crecimiento de la planta que las LI (Shoji *et al.*, 2013). En Japón, alrededor del 60% de las granjas industriales de plantas utilizan LF como fuente de luz (Shoji *et al.*, 2013). Muchos estudios revelaron que diferentes tipos de LED podrían afectar el crecimiento de las plantas en términos de cantidad y calidad

(Ruangrak y Khummueng, 2019); sin embargo, no se encontró algún estudio que indique el efecto de la luz artificial en la producción de forrajes destinado al consumo animal.

Por lo tanto, esta investigación tuvo como objetivo estudiar los efectos de las fuentes de luz artificial LED, incandescente y fluorescente sobre el crecimiento de las plantas de alfalfa (*Medicago sativa* L.).

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de investigación se realizó en el invernadero experimental 3 ALA-2 SEC-2 del área del Botánica de colegio de postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México, ubicado a 19° 29' latitud norte, 98° 53' longitud oeste y 2240 msnm.

El experimento fue establecido en cuatro estantes de una altura de 2.50 m con tres divisiones, cada división con dimensiones de 80 cm de largo por 60 cm de ancho, en cada una se colocó una base de 20 cm de alto con madera donde se agregó 70% suelo franco arenoso, con pH 8.2 y 4.1% de materia orgánica extraída del área experimental conocida como predio nuevo y 30% de composta de heces de borrego y cabra extraída del campo experimental CCIT del Colegio de Postgraduados. Se utilizaron semillas de alfalfa variedad Júpiter a una densidad de 4 g m⁻² de semilla pura germinable (Figura 1).



Figura 1. Estante con tres divisiones de 80 x 60 cm

En tres de las divisiones superiores se permitió que incidieran los rayos solares, en las nueve divisiones restantes se colocaron tres fuentes diferentes de luz artificial (LED, incandescente y fluorescente) tres divisiones por cada fuente de luz, a una densidad de cuatro lámparas por división, las cuales se distribuyeron a una altura de 10 cm, respecto a la primera hoja de la planta. Se les proporcionaron 18 h de luz artificial al día y los estantes se cubrieron con una tela de color negro la cual impidió el ingreso de los rayos solares.

Después de realizada la siembra se suministró agua potable cada tercer día a capacidad de campo. Los deshierbes fueron manuales y se realizaron cada tercer día para evitar el crecimiento de malezas, hasta el día 150 cuando se realizó el primer muestreo. Transcurrido los 150 días, se realizó un corte a ras del suelo para determinar rendimiento, posteriormente se permitió el rebrote y se realizó el corte a los 28 días durante tres períodos continuos, la media de los cuatro cortes representa los valores reportados como rendimiento de materia seca.

1.4.1 Rendimiento de materia seca

El rendimiento de materia seca (MS) de la parte aérea se obtuvo al realizar el corte de forraje a ras de suelo. La biomasa de cada repetición se depositó en bolsas de plástico tipo ziploc previamente etiquetadas, para posteriormente determinar la humedad parcial en el laboratorio de forrajes del Colegio de Postgraduados campus Montecillo y la humedad residual en el Laboratorio de Nutrición Animal del Departamento de Zootecnia de la Universidad Autónoma Chapingo.

Para cuantificar materia seca parcial (M_{Sp}) se colocó la muestra fresca en una bolsa de papel del # 8 y se ingresó a una estufa de aire forzado durante 72 h a 55 °C, una vez que se cumplió el tiempo se retiraron las bolsas de la estufa y posteriormente se pesaron en una balanza dibatec con 600 g de capacidad, y se calculó la M_{Sp} con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ MSp} = (\text{peso de la materia seca} / \text{peso de la materia fresca}) * 100$$

Para determinar la materia seca total (MSt), las muestras parcialmente secas se colocaron en una estufa a 105 °C durante 12 h (método 7.003, AOAC, 1980), utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de MSt} = (\% \text{ MS a } 55^\circ \text{ C}) * (\% \text{ de MS a } 105^\circ \text{ C}) / 100$$

Intensidad de luz emitida y consumo de energía

Para cuantificar la intensidad de luz emitida se utilizó un ceptómetro lineal, modelo LP-80 (DECAGON DEVICES INC.) fabricado en los Estados Unidos de América, en el cual se utilizó un adaptador para medir μmol de fotones $\text{m}^{-2} \text{S}^{-1}$ a un sitio específico.

Se utilizaron lámparas comerciales y el consumo de energía fue obtenido de las especificaciones de dichas lámparas.

1.4.2 Tasa fotosintética

En bolsas negras de plástico perforadas con medidas de 20 X 20 cm se cultivaron 20 plantas de alfalfa variedad júpiter Figura 2, a las cuales se les midió la tasa de fotosíntesis neta ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) a los 100 días después de la siembra, en el laboratorio de forrajes del Colegio de Postgraduados.



Figura 2. Plantas de alfalfa en maceta.

Se tomaron lecturas con un sistema portátil medidor de fotosíntesis IRGA (Infra Red Gases Analyzer, USA) anteriormente calibrado, colocando 5 hojas por repetición para hacer la medición, lo que permitió deducir la fotosíntesis en las plantas de alfalfa con diferentes fuentes de luz. La tasa de fotosíntesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), se midió al colocar una hoja completamente expandida dentro de la cámara de asimilación del IRGA, donde las mediciones se basan en las diferencias de concentración de CO_2 que entra y sale en una cámara cerrada en la que se encuentra la hoja expuesta (Figura 3).



Figura 3. Medición con IRGA en planta de alfalfa.

1.4.3 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza y se utilizó el procedimiento PROC GLM del programa estadístico SAS 9.0 (Statistical Analysis System versión 2002), con un diseño completamente al azar. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey ajustada ($P=0.05$).

1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se presentan los gastos de watts h⁻¹ de las distintas fuentes de luz artificial, el gasto de energía fue 8 veces mayor con la LI respecto al gasto de la LED y 3.5 veces más que la LF. La intensidad de luz emitida es 3 y 2 veces mayor en la LED vs la LI y la LF respectivamente. Según Ouzounis *et al.*, (2015) el uso de luminarias LED tiene el potencial de generar importantes ahorros de energía a los productores de invernadero que utilizan fuentes de luz artificial por el poco gasto energético. Nelson y Bugbee, (2014) afirman que existen beneficios económicos cuando se utilizan LED principalmente producidas en los Estados Unidos comparadas contra otras fuentes iluminarias.

Además, existe una relación negativa entre la distancia de la fuente de luz artificial y la intensidad, esta tendencia coincide con lo reportado por Bennie *et al.*, (2016), quienes mencionan que, a mayor distancia de la fuente, menor será la intensidad de luz sobre una superficie ya que esta se dispersa en mayor área.

Con estos resultados se puede inferir que para generar una tasa alta de fotosíntesis con una fuente de luz artificial es necesario tener una distancia menor respecto a la planta, de lo contrario la intensidad de luz no será suficiente para permitir el proceso de fotosíntesis (Bennie *et al.*, 2016).

Cuadro 1. Potencia (W o J s⁻¹), intensidad del flujo fotónico (μmol fotones m⁻² s⁻¹) y eficiencia de las fuentes de luz artificial (μmol m⁻² s⁻¹ W⁻¹), a diferentes distancias del suelo.

Fuente de luz	Potencia	Intensidad de flujo fotónico a			Eficiencia
		1 cm	10 cm	20 cm	
Incandescente	60	417 ^c	97 ^c	27 ^b	6.95
Fluorescente	23	612 ^b	149 ^b	22 ^b	26.61
LED	10	1200 ^a	420 ^a	127 ^a	120.00

Distintas literales en la misma columna representan diferencia significativa ($P < 0.05$). La eficiencia se estimó a 1 cm del suelo.

Se puede observar en el Cuadro 1, la eficiencia de las lámparas, en la cual la luz artificial LED emite mayor cantidad de μmol m⁻² s watt⁻¹ consumidos, con valores de 120 vs 26.61

y 6.95 de la LF y la LI respectivamente. Los resultados de la presente investigación de eficiencia no coinciden con lo publicado por Ouzounis *et al.*, (2015) quienes reportaron valores cercanos a $2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s watt}^{-1}$, esta diferencia respecto a los $120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s watt}^{-1}$ encontrados en este estudio se puede deber a la distancia de las lámparas respecto a las hojas, ya que en el estudio de Ouzounis *et al.*, (2015) las lámparas se colocaron a una mayor distancia. De igual manera Van Leperen y Trouwborst, (2008) mencionan eficiencias de $1.9 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot \text{watt}^{-1}$ en lámparas de sodio de alta presión.

Así mismo la baja eficiencia de la LI para producir $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}$ se relaciona con la producción de calor que esta genera. Según Massa *et al.*, (2008) y Etae *et al.*, (2020) la LI proporciona solo 15% de iluminación y 85% de la energía restante es transformada en calor, lo que justifica la alta temperatura que presentaron las LI cuando se encuentran iluminando, siendo este un efecto negativo de esta fuente debido a que alcanzaron temperaturas superiores a $60 \text{ }^\circ\text{C}$, cuando la temperatura ambiental osciló en los $21 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que puede ocasionar efectos negativos en el cultivo si las LI se encuentran cerca, contrario a lo que sucedió con la LED y LF, las cuales aumentaron $1 \text{ }^\circ\text{C}$ respecto a la temperatura ambiental.

El Cuadro 2 muestra la producción de MS de alfalfa con distinta fuente de fotones, la mayor producción se observó con la luz solar con valores de 391 g m^{-2} , mientras que la menor producción resultó con la LI con 17 g m^{-2} ($P < 0.05$). Estos resultados comparados con los reportados por Rivas *et al.*, (2020) quienes observaron rendimientos en una producción de ambientes abiertos con luz solar de 489 g m^{-2} de MS para la estación de invierno y una producción de 976 g m^{-2} para la estación de verano, los datos son superiores a los encontrados en esta investigación. Con lo anterior se puede concluir que falta mucha investigación por realizar en la producción de alfalfa en sistemas cerrados con fuentes de luz artificial.

Por otro lado, el resultado de la división entre la producción de materia seca y la intensidad de luz emitida puede predecir la eficiencia de cada fuente de luz para producir MS. De acuerdo con los resultados, la luz proveniente de la LED es la más eficiente con un valor de 0.5 y la menos eficiente es la de la LI, no obstante, es importante recalcar que el valor de intensidad de luz solar solo fue el más alto a lo largo del día y la intensidad

de luz solar no es constante, por lo tanto, el valor de la eficiencia de la luz solar es sobreestimado.

Cuadro 2. Intensidad de flujo fotónico ($\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$), rendimiento de materia seca (g m^{-2}) y rendimiento por unidad de flujo fotónico ($\text{g s } \mu\text{mol}^{-1}$) de alfalfa con distintas fuentes de luz a 10 cm del suelo.

Fuente de luz	Intensidad de flujo fotónico	Rendimiento	Rendimiento por unidad de flujo fotónico
Incandescente	97 ^c	17 ^d	0.18
Fluorescente	149 ^c	63 ^c	0.42
LED	420 ^b	211 ^b	0.50
Solar	1680 ^a	391 ^a	0.23

Cada rendimiento de materia seca es un promedio de cuatro períodos de corte, el primero a 150 días después de la siembra y los demás a los 28 días del rebrote. Distintas literales en la misma columna representan diferencia significativa ($P < 0.05$).

La tasa fotosintética se determinó al utilizar las plantas de alfalfa en macetas. El valor más alto se observó con la luz solar, presentando $28 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, mientras que, con la LI, este valor fue el menor a una distancia de 1 cm (Cuadro 3), sin embargo, se puede observar que mientras la planta se encuentre más alejada de la fuente de luz la tasa de fotosíntesis también será menor. Los datos de la tasa fotosintética de las plantas que recibieron la iluminación LED a 10 cm $21 (\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ son menores estadísticamente que los encontrados con la iluminación solar a las 13:00 horas del día, cuando hubo mayor intensidad luminosa, no obstante, la intensidad del sol no es constante y por lo tanto este valor no es permanente a lo largo de las horas de luz solar. Así, los valores presentados con la iluminación LED generan cierta expectativa en el uso de las lámparas a futuro. Luna *et al.*, (2020) reportaron valores de tasa fotosintética de la alfalfa inferiores a $20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, valor similar a lo encontrado en esta investigación con el uso de la iluminación LED.

Cuadro 3. Tasa fotosintética de alfalfa ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) con distintas fuentes de luz a 1, 10 y 20 cm del suelo.

Fuente de luz	Distancia al suelo (cm)		
	1	10	20
Incandescente	13 ^d	4 ^c	2 ^b
Fluorescente	17 ^c	5 ^c	2 ^b
LED	24 ^b	21 ^b	4 ^b
Solar	28 ^a	28 ^a	28 ^a

Distintas literales en la misma columna representan diferencia significativa ($P < 0.05$).

La tasa de fotosíntesis disminuyó cuando la distancia entre la fuente de luz y la planta aumentó, lo cual puede atribuirse a que mientras la fuente de luz es más lejana, la intensidad de fotones por superficie es menor (Cuadro 1).

1.6 CONCLUSIONES

La luz LED puede ser una alternativa viable a futuro para producir alimento destinado al consumo animal, pese a tener una producción menor de biomasa respecto a la luz solar es más eficiente respecto a otras fuentes artificiales.

Es necesario continuar realizando trabajos de investigación en producción de forrajes con luz artificial, para obtener mayores rendimientos, lo cual permita prepararse para un futuro incierto.

CAPÍTULO II. EFECTO DE LA LUZ LED SOBRE LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE CON Y SIN MALEZA

2.1 RESUMEN

Las fuentes de luz artificial pueden favorecer el proceso de fotosíntesis, lo que optimiza los recursos naturales y aumenta la producción de biomasa por m², por lo tanto, el objetivo del presente trabajo de investigación fue estudiar los efectos de la luz LED sobre en el crecimiento del forraje. El experimento se estableció en cuatro estantes de una altura de 2.50 m con tres divisiones cada uno, cada división de 80 x 60 cm. Se sembraron semillas de alfalfa a una densidad de 4 g m⁻², en las cuatro divisiones superiores se permitió que incidieran los rayos solares, en las ocho divisiones restantes se colocaron lámparas LED a una densidad de seis lámparas por división. Se les proporcionó 18 h de luz artificial al día, a cuatro de las divisiones con luz artificial se les realizó un control de malezas.

Con respecto a la producción de materia seca con luz solar vs luz LED, se observó diferencia significativa ($P < 0.05$) cuando la luz LED se aplicó sobre un cultivo de alfalfa pura, sin embargo, cuando no se eliminaron las malezas, esta diferencia no fue significativa. El 83 % de la maleza producida correspondió a la especie acederilla (*Oxalis spp*). La actividad fotosintética a 700 $\mu\text{mol m}^{-2}$ fue superior la alfalfa vs la acederilla, no obstante, a medida que la intensidad luminosa disminuyó, los valores se invirtieron. Se obtuvieron valores superiores de nutrientes digestibles totales, energía digestible, energía metabolizable y energía neta con la acederilla producida mediante luz artificial con relación a los obtenidos con alfalfa, por lo que se sugiere estudiar otras especies como acederilla, la cual puede generar mayor eficiencia en el uso de iluminación artificial y se puede obtener un buen valor nutritivo.

Palabras claves: Acederilla, actividad fotosintética, valor nutritivo.

2.2 ABSTRACT

Artificial light sources can favor the photosynthesis process, which optimizes natural resources and increases biomass production per m², therefore, the objective of this research work was to study the effects of LED light on growth. of forage. The experiment was established on four shelves with a height of 2.50 m with three divisions each, each division 80 x 60 cm. Alfalfa seeds were sown at a density of 4 g m⁻², in the upper four divisions the solar rays were allowed to penetrate, in the remaining eight divisions LED lamps were placed at a density of six lamps per division. They were given 18 h of artificial light per day, four of the divisions with artificial light were given weed control.

Regarding dry matter production with sunlight vs. LED light, a significant difference ($P < 0.05$) was observed when the LED light was applied on a pure alfalfa crop, however, when weeds were not eliminated, this difference was not observed. it was significant. 83 % of the weeds produced corresponded to the acederilla species (*Oxalis* spp). Photosynthetic activity at 700 μmol m⁻² was higher in alfalfa vs. sorrel, however, as light intensity decreased, the values inverted. Higher values of total digestible nutrients, digestible energy, metabolizable energy and net energy were obtained with sorrel produced by artificial light in relation to those obtained with alfalfa, for which it is suggested to study other species such as acederilla, which can generate greater efficiency in the use of artificial lighting and good nutritional potential can be obtained.

Keywords: Acederilla, photosynthetic activity, nutritional value.

2.3 INTRODUCCIÓN

La luz, además de ser una fuente indispensable de energía para la fotosíntesis de las plantas, es también un factor significativo para el crecimiento y desarrollo (Bennie *et al.*, 2016). Las plantas son capaces de responder a distinta intensidad y al color de la luz (Zhang y Folta, 2012) por medio de sus fotorreceptores, los cuales se activan bajo longitudes de onda específicas (Liu, 2012). Debido a ello, los sistemas de iluminación para la producción en ambiente controlado son de suma importancia (Kozai, 2007).

El proceso de fotosíntesis puede generarse por medio de fuentes de luz artificial donde se incluyen lámparas incandescentes (LI), lámparas fluorescentes (LF) y diodos emisores de luz (LED) (Massa *et al.*, 2008). No obstante, los diferentes tipos de fuentes de luz artificial tienen diversas cualidades para el crecimiento de las plantas. Por ejemplo, las LI se usan principalmente para extender el tiempo de iluminación durante las estaciones con un período de luz diurno corto. Éstas convierten solo el 15 % de la energía eléctrica utilizada en luz para la fotosíntesis de las plantas, mientras que el 85 % restante se convierte en calor (Massa *et al.*, 2008).

Las LF se han utilizado comercialmente en el cultivo de vegetales, usan menos energía eléctrica y proporcionan mejor crecimiento de la planta que las LI. En Japón, alrededor del 60 % de las granjas industriales de plantas utilizan LF como fuente de luz (Shoji *et al.*, 2013). Muchos estudios revelaron que diferentes tipos de LED favorecen el crecimiento de las plantas en términos de cantidad y calidad (Ruangrak y Khummueng, 2019). La luz LED se ha convertido en una alternativa para el cultivo de plantas (Massa *et al.*, 2008) por las ventajas que este sistema de iluminación ofrece, como son el control de la composición espectral, su tamaño pequeño, producción de altos niveles de luz con un índice de radiación calorífica bajo y una larga vida útil que les permite mantenerse trabajando por años sin necesidad de reemplazo (Bourget, 2008 y Xu *et al.*, 2012).

Los costos de producción representan una de las mayores limitantes en la propagación comercial de plántulas provenientes de micropropagación. La electricidad puede constituir entre el 20 al 60% de los costos totales, dependiendo del país. Bajo el uso de

LED se puede reducir significativamente hasta ahorrar entre 50 y 75 % de electricidad (Miller *et al.*, 2019).

Por lo tanto, esta investigación tuvo como objetivo estudiar los efectos de la luz LED sobre el crecimiento del forraje.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de investigación se realizó en el invernadero experimental 3 ALA-2 SEC-2 del área del Botánica de Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México, ubicado a 19° 29' latitud norte, 98° 53' longitud oeste y 2240 msnm.

El experimento fue establecido en cuatro estantes de una altura de 2.50 m con tres divisiones, cada división con dimensiones de 80 cm de largo por 60 cm de ancho, en cada una se colocó una base de 20 cm de alto con madera donde se agregó 70 % de suelo franco arenoso, con pH 8.2 y 4.1 % de materia orgánica extraída del área experimental conocida como predio nuevo y 30 % de composta de heces de borrego y cabra extraída del campo experimental CCIT del Colegio de Postgraduados. Se sembraron semillas de alfalfa variedad júpiter con una densidad de 4 g m⁻² de semilla pura germinable.

En las cuatro divisiones superiores se permitió que incidieran los rayos solares directos, en las ocho divisiones restantes se colocaron lámparas LED a una densidad de seis lámparas por división, las cuales se distribuyeron a una altura de 10 cm, respecto a la primera hoja de la planta. Se les proporcionó 18 h de luz artificial al día y los estantes fueron cubiertos con una tela oscura para impedir el ingreso de los rayos solares.

Una vez realizada la siembra se suministró agua potable cada tercer día, a cuatro de las divisiones con luz artificial se les controló la maleza cada siete días. De las restantes cuatro no se les realizó ningún control de malezas. Transcurridos 150 días después de la siembra, se hizo un corte a ras del suelo para determinar rendimiento, posteriormente rebrotaron y se realizó el corte a los 28 días durante tres períodos consecutivos, la media de los cuatro muestreos representa los valores reportados como rendimiento de materia seca.

2.4.1 Rendimiento de materia seca

El rendimiento de materia seca (MS) de la parte aérea se obtuvo al realizar el corte de forraje a ras de suelo. La biomasa de cada repetición se colocó en bolsas de plástico tipo ziploc previamente etiquetadas, para posteriormente determinar la humedad parcial en el laboratorio de forrajes del Colegio de Postgraduados campus Montecillo y la humedad residual en el Laboratorio de Nutrición Animal del Departamento de Zootecnia de la Universidad Autónoma Chapingo.

Para cuantificar materia seca parcial (MSp) se colocó muestra fresca en una bolsa de papel del # 8 y se ingresó a una estufa de aire forzado durante 48 h a 55 °C, se retiraron las bolsas de la estufa y posteriormente se pesaron en una balanza dibatec con 600 g de capacidad, y se calculó la MSp con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ MSp} = (\text{peso de la materia seca} / \text{peso de la materia fresca}) * 100$$

Para determinar la materia seca total (MSt), las muestras parcialmente secas se colocaron en una estufa a 105 °C durante 12 h (AOAC, 2000), utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de MSt} = (\% \text{ MS a } 55^\circ \text{ C}) * (\% \text{ de MS a } 105^\circ \text{ C}) / 100$$

2.4.2 Análisis químico de la materia seca

Para el análisis químico se separó la muestra en alfalfa y acederilla (*Oxalis spp*), de cada uno de los tratamientos para posteriormente realizar los análisis de acuerdo con las metodologías AOAC, (2000) y Van Soest *et al.*, (1991), los análisis se realizaron en el Laboratorio de Nutrición Animal del Departamento de Zootecnia de la Universidad Autónoma Chapingo. Se utilizaron las medias de cada una de las fracciones y utilizando las ecuaciones del capítulo 2 (Energía) del NRC, (2001) de vacas lecheras se predijeron los valores de nutrientes digestibles totales (NDT), energía digestible (ED) y energías netas (EN). Con un becerro Holstein fistulado del Colegio de Postgraduados campus Montecillo, se obtuvo líquido ruminal para realizar la digestibilidad *in vitro* a 48 horas.

2.4.3. Intensidad de luz emitida y consumo de energía

Para cuantificar la intensidad de luz emitida se utilizó un ceptómetro lineal, modelo LP-80 (DECAGON DEVICES INC.) fabricado en los Estados Unidos de América, en el cual se utilizó un adaptador para medir μmol de fotones $\text{m}^{-2} \text{S}^{-1}$ a un sitio específico.

2.4.4 Actividad fotosintética

En bolsas negras de plástico perforadas con medidas de 20 X 20 cm se cultivaron 10 plantas de alfalfa variedad júpiter y 10 plantas de acederilla (*Oxalis spp*), a las cuales se les midió la tasa de fotosíntesis neta ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), en el laboratorio de forrajes del Colegio de Postgraduados.

Se utilizó un sistema portátil medidor de fotosíntesis IRGA (Infra Red Gases Analyzer, USA) anteriormente calibrado, se colocaron cinco lecturas por planta para hacer la medición, lo que permitió inferir la fotosíntesis en las plantas de alfalfa con diferentes fuentes de luz. La tasa de fotosíntesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) se midió al poner una hoja completamente expandida dentro de la cámara de asimilación del IRGA, donde las mediciones se basan en las diferencias de concentración de CO_2 que entra y sale de la cámara en la que se encuentra la hoja expuesta. Se tomaron lecturas con distinta intensidad de luz, (700, 500 y 300 $\mu\text{mol m}^{-2}$), para lograr las intensidades se aumentó o disminuyó el número de lámparas LED.

2.4.5 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza y se utilizó el procedimiento PROC GLM del programa estadístico SAS 9.0 (Statiscal Analysis System versión 2002), con un diseño completamente al azar. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey ajustada ($P=0.05$).

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observó diferencia significativa ($P < 0.05$) cuando la luz LED se aplicó sobre un cultivo de alfalfa pura, por el contrario, cuando no se seleccionaron y eliminaron las malezas esta diferencia no fue significativa (Cuadro 4). Estos resultados difieren con los reportados por Rivas *et al.*, (2020) quienes observaron rendimientos en la producción de alfalfa en ambientes abiertos con luz solar de 489 g m⁻² de MS para la estación de invierno y una producción de 976 g m⁻² para la estación de verano, los datos son superiores a los encontrados en esta investigación y esto se podría atribuir al poco sustrato donde se encontraban las plantas de alfalfa del experimento (20 cm de altura).

Cuadro 4. Intensidad de flujo fotónico ($\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), rendimiento de materia seca (g m⁻²) y proporciones de alfalfa y maleza en base seca (%), aplicando 18 h de luz.

Fuente de luz		Intensidad de flujo fotónico	Rendimiento	Proporción de alfalfa	Proporción de maleza
Solar		1680 ^A	401 ^A	93	7
LED	sin	556 ^B	203 ^B	99	1
	maleza				
LED	con	532 ^B	387 ^A	43	57
	maleza				

Distintas literales en la misma columna representan diferencia significativa con $P < 0.05$. Solar: alfalfa con luz solar sin control de malezas. LED sin maleza: Suministro de luz LED blanca durante 18 h al día eliminando las plantas distintas a la alfalfa cada siete días, LED con maleza: Suministro de luz LED blanca durante 18 h al día sin control de malezas.

Liu *et al.*, (2008), indican que las malezas limitan el rendimiento de la cosecha por competencia directa de la luz, el agua y los nutrientes, estas pueden emerger con el cultivo o posteriormente; sin embargo, para esta situación la presencia de la maleza aumenta la producción de materia seca.

El 83 % de la maleza que se produjo corresponde a la especie acederilla (*Oxalis spp*), por el cual en el Cuadro 5 se muestra la actividad fotosintética de la alfalfa y de la acederilla a distinta intensidad luminosa. A 700 $\mu\text{mol m}^{-2}$ la tasa fotosintética de la alfalfa es superior a la de la acederilla, pero conforme disminuye la intensidad luminosa los

valores se invierten siendo más eficiente acederilla cuando la intensidad es de 300 $\mu\text{mol m}^{-2}$.

Cuando se generan cambios en la calidad o en la intensidad de la radiación incidente, se producen modificaciones en la planta que afectan el crecimiento y desarrollo, fuertemente influenciados por la calidad de la luz en términos del color o la longitud de onda que llega a la superficie de las hojas (Johkan *et al.*, 2010), por tanto, se puede inferir que la luz LED afecta menos a la acederilla que a la alfalfa.

De acuerdo con Castellanos *et al.*, (2010) y Takahashi *et al.*, (2012), quienes indicaron que la eficiencia con la que cada fotorreceptor es capaz de captar determinado color de luz indirectamente puede medirse, mediante diversas metodologías y el crecimiento vegetal es uno de estos, por lo tanto, se puede inferir una mayor eficiencia en los fotorreceptores de la acederilla vs los fotorreceptores de la alfalfa cuando la intensidad de luz es menor. Sun *et al.*, (2012) encontraron que la calidad de la luz afecta la tasa fotosintética, la eficiencia cuántica para la asimilación del CO_2 y la máxima actividad del fosfoenolpiruvato carboxilasa.

2.5.1 Actividad fotosintética de la alfalfa y acederilla

Cuadro 5. Tasa fotosintética ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de alfalfa y maleza (acederilla) con luz LED y solar a distintas intensidades de flujo fotónico ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Especie	700	500	300
<i>Alfalfa (Medicago)</i>	22.2 ^A	20.4 ^B	13.1 ^C
<i>Acederilla (Oxallis)</i>	19.4 ^A	18.8 ^A	18.6 ^A

Distintas literales en la misma columna representan diferencia significativa ($P < 0.05$).

Ballaré *et al.*, (1991) mencionan que las plantas son organismos estáticos, se ha supuesto que la plasticidad posee un valor adaptativo en la naturaleza, permitiendo el desarrollo de fenotipos adecuados para situaciones competitivas, en particular cuando la luz es limitante, para este caso la acederilla es una especie con mayor potencial que la

alfalfa, por este motivo se procedió a realizar el análisis químico nutricional de la alfalfa y la acederilla (Cuadro 6).

El contenido de cenizas en la alfalfa producida con luz solar fue de 14.19 %. Este valor es similar al mencionado por Capacho *et al.*, (2018), quienes reportaron un promedio de 14.92 % de cenizas en cuatro variedades evaluadas de alfalfa. Respecto a los valores de cenizas no se observaron diferencias significativas ($P > 0.05$) con la producción bajo luz solar vs artificial, así como entre la alfalfa y la acederilla.

Con relación a la fracción de proteína cruda, en los valores de la alfalfa producida con luz solar y artificial no se observaron diferencias significativas ($P > 0.05$) y son similares al 23.89 %, reportado por García *et al.*, (2010), sin embargo, Capacho *et al.*, (2018) encontraron entre 18.8 y 21, con una media de 20.02 % de proteína para la alfalfa, este porcentaje es similar al de la acederilla con luz solar y artificial. La proteína cruda de la acederilla producida bajo condiciones de luz artificial es superior al 20 %, y según el NRC, (2001) puede considerarse como un ingrediente proteico.

Se observaron mayores porcentajes de fibra detergente neutro (FDN) con la alfalfa respecto a la acederilla, y estos coinciden con Capacho *et al.*, (2018), quienes encontraron entre 45 y 54 % de FDN en la alfalfa. No obstante, Basigalup, (2007) reportó 32.7 % de FDN para la alfalfa, el cual es inferior al contenido de la acederilla en esta investigación. Esta tendencia se repite en el contenido de fibra detergente ácido y lignina cruda.

El porcentaje de digestibilidad *in vitro* en la presente investigación varió entre 64.15 y 77.01 %. Se observó mayor digestibilidad con la alfalfa producida con luz solar pero no hubo diferencia significativa ($P > 0.05$) con respecto a la acederilla producida con lámpara, no obstante, todos los valores son superiores a los reportados por Capacho *et al.*, (2018), quienes informaron valores de digestibilidad de cuatro variedades de alfalfa, que oscilan entre 48.60 y el 52.76 %, así como Meza *et al.*, (2012) al observar una digestibilidad de 60.67 %. La digestibilidad *in vitro* de la alfalfa en sol y de la acederilla en lámpara son superiores a 71.1 % observado en el estudio de Arreaza y Sánchez (2005).

Cuadro 6. Composición química nutricional de las especies producidas con luz LED y luz solar.

Fracción de análisis	Alfalfa con sol	Alfalfa con lámpara	Acederilla con sol	Acederilla con lámpara
Cenizas (Cen), %	14.19 ^A	12.35 ^A	13.65 ^A	15.20 ^A
Proteína Cruda (PC), %	23.45 ^A	22.24 ^A	18.67 ^B	21.81 ^B
Extracto Etéreo (EE), %	2.52 ^C	2.06 ^C	4.25 ^B	9.33 ^A
Fibra Detergente Neutro (FDN), %	46.23 ^A	45.90 ^A	42.83 ^B	40.79 ^B
Lignina cruda (LC), %	6.21 ^B	7.62 ^B	8.26 ^A	8.88 ^A
Fibra Detergente Ácido (FDA), %	28.17 ^C	34.81 ^A	34.03 ^A	31.06 ^B
Carbohidratos no fibrosos (NDC), %	19.72 ^C	21.97 ^B	24.60 ^A	17.59 ^C
Nutrientes Digestibles Totales (NDT), %	60.54	59.21	59.88	63.48
Energía Digestible (ED), Mcal/Kg de alimento.	2.83	2.76	2.74	2.93
Energía Metabolizable (EM), Mcal/Kg de alimento.	2.40	2.34	2.33	2.54
Energía Neta Lactancia (ENI), Mcal/Kg de alimento.	1.50	1.45	1.45	1.60
Energía Neta de Mantenimiento (ENm), Mcal/Kg de alimento.	1.52	1.46	1.45	1.64
Digestibilidad <i>In vitro</i> de la materia seca	77.01 ^A	64.83 ^B	64.15 ^B	76.94 ^A

Distintas literales en la misma columna representan diferencia significativa con $P < 0.05$.

Los valores de nutrientes digestibles totales (NDT), energía digestible, energía metabolizable y energía neta en la acederilla producida con luz artificial fueron superiores a los de la alfalfa producida en sol y además son superiores a los observados en el NRC, (2001) para la alfalfa con 56.4 % de NDT, 2.6 Mcal/kg de MS de ED y 1.96 Mcal/kg de MS de EM.

2.6 CONCLUSIONES

La luz LED tiene potencial para producir forraje en ambientes cerrados, si bien la alfalfa (*Medicago sativa* L.) es un cultivo con mayores exigencias en la intensidad luminosa, se deben estudiar otras especies como acederilla (*Oxalis spp*) que pueden generar mayor eficiencia en el uso de la iluminación artificial y tener un buen potencial nutritivo para los animales.

CONCLUSIONES GENERALES

La luz LED es una alternativa viable para producir forraje destinado al consumo animal, comparada con fuentes de luz artificial como incandescente y fluorescente.

El forraje en un sistema vertical con uso de luz artificial es una alternativa que debe seguir estudiándose para poder lograr una mejor producción, es necesario agregar a las futuras investigaciones el uso de nuevas especies forrajeras, que pueden presentar mejor adaptación al sistema.

LITERATURA CITADA

- A.O.A.C. (Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists). 2000.17a Ed. Gaithersburg, MD, USA. 2200 pp.
- Alcala G., Currie H., Puppo F. 2003. Avances en la evaluación del riesgo hídrico en el sector de la ganadería chaqueña en el área del Chaco húmedo. Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones científicas y tecnológicas, Resumen A-010:4. <http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/cyt/2003/comunicaciones/05-Agrarias/A-010.pdf>
- Arreaza L., Sánchez D., Abadía B. 2005. Degradabilidad ruminal de fracciones de carbohidratos en forrajes tropicales determinada por métodos in vitro e in situ. Revista Corpoica. 6(1): 51-58. DOI: http://doi.org/10.21930/rcta.vol6_num1_art:37
- Ballaré C., Scopel A., Sánchez R. 1991. Photocontrol of stem elongation in plant neighbourhoods: effects of photon fluence rate under natural conditions of radiation. Plant, Cell & Environment.14(1):57-65.
- Basigalup H. 2007.El cultivo de la alfalfa en la Argentina. EEA Manfre di-INTA
- Bennie J., Davies T., Cruse D., Gaston K. 2016. Ecological effects of artificial light at night on wild plants. Journal of Ecology 104, 611–620
- Bourget, C.M., 2008. An Introduction to Light-emitting Diodes. Hortscience, 43(7): 1944-1946.
- Capacho M., Flórez D., Hoyos P. 2018. Biomasa y calidad nutricional de cuatro variedades de alfalfa para introducir en Pamplona, Colombia. Rev. Cien. Agri. 15(1): 61-67.
- Castellanos M., Abril M., López C. 2010. Análisis de crecimiento y relación fuente-demanda de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia). Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín. 63(1):5253-66.
- Etae N., Wamae Y., Khummueng W., Utaipan T., Ruangrak E. 2020. Effects of artificial light sources on growth and phytochemicals content in green oak lettuce. Horticultura Brasileira 38: 204-210.
- García C., Vázquez B., Lorenzo L., García A., Petisco' C., Vicente S., García Y. 2010. Evaluación de 26 cultivares de alfalfa en el Oeste Español. Pastos. 40(2): 189-210.
- Johkan M, Shoji K, Goto F, Hashida S, Yoshihara T. 2010. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. HortScience.;45(12):1809-14.

- Kozai, T., 2007. "Propagation, grafting and transplant production in closed systems with artificial lighting for commercialisation in Japan". *Propagation of Ornamental Plants*, 7: 145-149.
- Liu, W., 2012. "Light Environmental Management for Artificial Protected. *Horticulture*". *Agrotechnology*, 1: 1-4.
- Liu J., Mahoney K., Sikkema P., Swanton C. 2008. The importance of light quality in crop-weed competition. *Weed Research*. 49(2):217-24.
- Luna M., López C., Quero A., Herrera J., Ortega M., Martínez P. 2020. Relaciones hídricas e intercambio gaseoso en alfalfa bajo condiciones de sequía. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, publicación especial número 24.
- Massa, G., Kim H., Wheeler R., Mitchell C. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience* 43:1951–1956.
- Meza G., Sánchez A., Meza M., Meza C., Franco N., Avellaneda J., Estupiñán K., Barrera A., Cabrera R., Vera D., Liuba G. 2012. Digestibilidad *in vivo* de forrajeras arbustivas tropicales para la alimentación de cuyes (*Cavia porcellus* Linnaeus), en el litoral ecuatoriano. *Veterinaria y Zootecnia*. 6(2)
- Miller N, Kulus D, Wozny A, Rymarz D, Hajzer M, Wierzbowski K, Nelke R, Szeffs L. 2019. Application of wide-spectrum light-emitting diodes in micropropagation of popular ornamental plant species: a study on plant quality and cost reduction. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*. 55(1):99-108. doi: 10.1007/s11627-018-9939-5
- Morrow R. 2008 Iluminación LED en horticultura. *HortScience*. Vol. 43, No. 7, pp. 1947-1950
- Nelson J. and Bugbee B. 2014. Economic analysis of greenhouse lighting: Light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures. *PLoS One* 9(6)
- NRC (National Research Council) 2001 *Nutrient Requirements of Dairy Cattle (7^a Ed.)*. National Academy Press, Washington, D.C
- Ouzounis T., Rosenqvist E., Ottosen C. (2015). Spectral Effects of Artificial Light on Plant Physiology and Secondary Metabolism: A Review. *HORTSCIENCE* 50(8):1128–1135.
- Paradiso R., Meinen J., Snel P., de Visser W., van Ieperen S., Hogewoning, and Marcelis M. 2011. Spectral dependence of photosynthesis and light absorbance in single leaves and canopy in rose. *Sci. Hort.* 127:548–554
- Rivas M., Herrera J., Hernández A., Vaquera H., Alejos J., Cadena S. 2020. Rendimiento de cinco variedades de alfalfa durante cuatro años de evaluación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* publicación especial número 24.

- Ruangrak E., Khummueng W. 2019. Effects of artificial light sources on accumulation of phytochemical contents in hydroponic lettuce. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 94: 378-388.
- SAS. 2002. Users guide: Statics, version 6.4th edition. SAS Int., Inc., Cary, NC.
- Shoji K., Moriya H., Goto F. 2013. Surveillance study of the support method to the plant factory by electric power industry: development trend of plant factory technology in Japan. *Environment Science Research Laboratory Report No. 13002*, Central Research Institute of Electric Power Industry, Tokyo: 1-16.
- Sun W., Ubierna N., MA J., 2012. Cousins AB. The influence of light quality on C4 photosynthesis under steady-state conditions in *Zea mays* and *Miscanthusx giganteus*: changes in rates of photosynthesis but not the efficiency of the CO2 concentrating mechanism. *Plant, Cell & Environment*;35(5):982-93.
- Takahashi H., Yamada H., Yoshida C., Imamura T. 2012. Modification of light quality improves the growth and medicinal quality of clonal plantlets derived from the herbal plant *Gentiana*. *Plant Biotechnology*.;29:315-8.
- Van Ieperen W. and Trouwborst G. 2008. The application of LEDs as assimilation light source in greenhouse horticulture: A simulation study. *Acta Hort.* 801:1407–1414.
- Whitelam G. and Halliday K. 2007. *Light and plant development*. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Van Soest P., Robertson J., Lewis B. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* 74: 3583-3597.
- Xu, H., Xu F., Feng F., y Fang W. 2012. “Applications of xerophytophysiology in plant production-LED blue light as a stimulus improved the tomato crop”. *Scientia Horticulturae*, 148: 190-196.
- Zhang T., y Folta K. 2012. “Green light signaling and adaptive response”. *Plant Signaling & Behavior*, 7(1): 1-4.