

Saúl
López
Juárez

Características de la postura de la mosca soldado negro
(*Hermetia illucens*) bajo diferentes intensidades de luz LED

2024



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Características de la postura de la mosca soldado negro
(*Hermetia illucens*) bajo diferentes intensidades de luz
LED

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería en Biosistemas

Presenta

Saúl López Juárez

Dirigido por:

Dr. Humberto Aguirre Becerra

Querétaro, 2024



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Características de la postura de la mosca soldado
negro (*Hermetia illucens*) bajo diferentes intensidades
de luz LED

por

Saúl López Juárez

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGMAC-267473



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería en Biosistemas

**Características de la postura de la mosca soldado negro (*Hermetia illucens*)
bajo diferentes intensidades de luz LED**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería en Biosistemas

Presenta:
Saúl López Juárez

Dirigido por:
Dr. Humberto Aguirre Becerra

Dr. Humberto Aguirre Becerra
Presidente

Dr. Juan Fernando García Trejo
Secretario

Dra. Ana Angelica Feregrino Pérez
Vocal

Dr. José Guadalupe Gómez Soto
Suplente

M. en C. Benito Parra Pacheco
Suplente

Centro Universitario,
Querétaro, Qro.
Marzo del 2024

DEDICATORIAS

A mi familia por su apoyo y dedicación para ayudarme a ser la persona quien hoy soy. Gracias, mamá y papá.

A Quilaztli por ser siempre estar cuando la necesito.

AGRADECIMIENTOS

A mis amigos, familia, asesores y demás personas que fueron parte de manera directa e indirecta para la realización de este proyecto

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIAS	3
AGRADECIMIENTOS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	11
RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
INTRODUCCIÓN	14
ANTECEDENTES.....	16
Mosca soldado negro.....	16
Producción de mosca soldado negro	17
Variables ambientales.....	18
Temperatura.....	18
Humedad.....	19
Luz	19
Características de la luz	20
Luz solar.....	20
Luz artificial	21
Sensibilidad de los insectos a la luz.....	21
Ciclo circadiano.....	25
Dormancia.....	26
Postura.....	27

Revisión de patentes.....	30
Monitoreo tecnológico	32
Problema.....	34
Justificación.....	35
HIPÓTESIS.....	37
OBJETIVOS.....	38
METODOLOGÍA	39
Etapa 1.....	40
Elaboración de lámparas LEDs	40
Fuente de suministro de voltaje.....	42
Controlador de voltaje	42
Temporizador	43
Pruebas de funcionamiento de la lampara	43
Etapa 2.....	45
Elaboración de jaula	45
Control de variables ambientales	46
Producción de MSN.....	46
Pie de cría	46
Alimentación.....	46
Cosecha de prepupas	47
Emergencia y selección sexual	48
Etapa 3.....	50
Tamaño de muestra	50

Diseño experimental.....	50
Primera etapa - Selección del grupo control.....	50
Segunda etapa - Efecto de la intensidad luminosa.....	51
Acondicionamiento de jaula de vuelo	52
Manipulación de jaula de vuelo.....	53
Valoración del efecto de la edad de MSN en la postura	53
Oviposición	53
Fecundidad	54
Fertilidad y tasa de eclosión	54
Mortalidad	54
Valoración del efecto de la intensidad de luz en la postura de MSN.....	55
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
Pruebas de funcionamiento de la lámpara.....	56
Tamaño de muestra	60
Alimento	61
Etapa 1 - Efecto de la edad de MSN en la postura	62
Oviposición.....	62
Mortalidad.....	64
Esperanza de vida.....	66
Etapa 2 - Efecto de la intensidad de luz en la postura de MSN	68
Oviposición.....	68
Fecundidad, fertilidad y tasa de eclosión.....	69
Mortalidad.....	72

Esperanza de vida.....	74
Resumen de datos	75
CONCLUSIÓN	77
REFERENCIAS	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de trabajo en la investigación.	39
Figura 2. Diagrama de flujo con los componentes básicos de la lampara LED ..	40
Figura 3. Diseño de la lámpara (a), lámparas blancas (b) y lámparas experimentales (c) en funcionamiento.	42
Figura 4. Convertidor de voltaje modelo XL4016.....	42
Figura 5. Temporizador modelo TEMP-20E	43
Figura 6. Micro estación WatchDog® 1000 Series y Sensor de luz LIGHTSCOUT®.....	43
Figura 7. Luxómetro modelo HER-408	44
Figura 8. Jaula de vuelo	45
Figura 9. Estante con jaulas de vuelo.....	45
Figura 10. Higrostató IHC-200 y Termostato ITC-308.....	46
Figura 11. Harina de maíz (a), alfalfa(b) y salvado de trigo(b).....	47
Figura 12. Genitales femeninos (izquierda) y masculinos (derecha) de la MSN	48
Figura 13. Proceso de sexado.....	49
Figura 14. Distribución de los tratamientos etapa 1 en el diseño completamente al azar.....	51
Figura 15. Distribución de los tratamientos de etapa 2 en el diseño de bloques al azar.....	52
Figura 16. a) Diseño de jaula de vuelo, b) Esquema visual del procesamiento del huevecillo y c) Diseño del sistema de oviposición.	52
Figura 17. Inspección de la jaula de vuelo con luz roja.	53
Figura 18. Regresión potencial de los puntos de la Intensidad luminosa de las lámparas blancas (2.71V) con la distancia vertical de la lampara, R ² : Coeficiente de determinación, y= modelo matemático de la regresión potencial.	56
Figura 19. Regresión potencial de los puntos de la Intensidad luminosa de las lámparas con dos LEDs verde, dos LEDs azul(2.6V) y un LED UV (6V) con la distancia vertical de la lampara, R ² : Coeficiente de determinación, y= modelo matemático de la regresión potencial.	57

Figura 20. Regresión potencial de los puntos de la Intensidad luminosa de las lámparas con dos LEDs verde, dos LEDs azul(2.81V) y un LED UV (3.2V) con la distancia vertical de la lampara, R ² : Coeficiente de determinación, y= modelo matemático de la regresión potencial.	58
Figura 21. Regresión potencial de los puntos de la Intensidad luminosa de las lámparas con cuatro LEDs verdes, 4 LEDs azul (2.79V) y 2 LEDs UV (3.2V) con la distancia vertical de la lampara, R ² : Coeficiente de determinación, y= modelo matemático de la regresión potencial.	59
Figura 22. Regresión logarítmica de los puntos de la Intensidad luminosa de las lámparas con la distancia vertical de la lampara, R ² : Coeficiente de determinación, y= modelo matemático de la regresión potencial.	60
Figura 23. Postura acumulada, con error estándar. Tratamientos diferente edad por sexo. Prueba de Kruskal-Wallis realizado con software PAST 4.0.....	63
Figura 24. Mortalidad acumulada en tratamiento con diferentes edades, gráficos realizados con el software JMP.	65
Figura 25. Esperanza de vida en tratamiento con diferentes edades, gráficos realizados con el software JMP.	66
Figura 26. Comportamiento de competencia entre machos.	67
Figura 27. Postura acumulada, con error estándar. Tratamientos diferente intensidad de luz. Prueba de Kruskal-Wallis realizado con software PAST 4.0..	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los LEDs utilizados para la elaboración de lámparas	41
Tabla 2. Análisis Químico Proximal de la Dieta tipo Gainesville	63
Tabla 3. Aproximación nutrimental al 70% de humedad	64
Tabla 4. Parámetros de la postura de MSN en lámpara blanca.	64
Tabla 5. Parámetros de la postura de MSN en lámparas de color, parte 1.	70
Tabla 6. Parámetros de la postura de MSN en lámparas de color, parte 2.	71

RESUMEN

El aumento en la producción de larvas de la mosca soldado negro ha generado interés debido a su papel en la gestión de residuos orgánicos y la generación de harina de larva para la alimentación animal y biodiesel. Sin embargo, en el proceso de producción de mosca adulto aún se desconocen las condiciones de iluminación en términos de intensidad que permitan tener mejores rendimientos.

El propósito de este trabajo es establecer las bases para el manejo de la intensidad de la luz, mediante el uso de lámparas con espectros específicos (verde, azul y UV). Buscando mejorar la producción en términos de oviposición, fertilidad y fecundidad de las moscas soldado negro, con el objetivo de contribuir a la optimización de la producción a nivel industrial y su futura aplicación en gestión de residuos orgánicos.

El estudio consistió en el uso de lámparas con luz verde, azul y UV, las cuales han sido reportadas como el espectro electromagnético que pueden captar los fotorreceptores de la mosca soldado adulto. Se utilizaron jaulas de 30 cm x 30 cm x 30 cm, con un total de 100 moscas adultos, 60 hembras y 40 machos, donde los machos tenían una edad mayor de 48 horas. Se utilizaron condiciones controladas de $30^{\circ}\text{C} \pm 2$, 70 ± 10 RH y fotoperiodo de 8 horas luz 16 oscuridad. Se colectó el huevo opositado todos los días, se midió la mortalidad, fertilidad y fecundidad.

Los resultados indican que tanto la intensidad y el espectro de luz de lámparas de color verde azul y UV pueden incrementar la producción de huevo hasta en un 180% en comparación a lámparas con luz blanca con temperatura de color de 3000K con la misma intensidad de luz, además, el uso de lámparas de color puede adelantar al menos un día el inicio de la postura la postura. De esta manera queda en evidencia que el cambio en las condiciones de luz, principalmente intensidad y espectro electromagnético puede aumentar la producción de huevo en jaulas adultas, modificando patrones biológicos de mortalidad, esperanza de vida, fertilidad y fecundidad principalmente.

Palabras claves:

Mosca soldado negro, oviposición, luz, LED, espectro electromagnético.

ABSTRACT

The increase in the production of black soldier fly larvae has generated interest due to its role in organic waste management and the generation of larval meal for animal feed and biodiesel. However, in the adult fly production process, the illumination conditions in terms of intensity that allow better yields are still unknown.

The purpose of this work is to establish the basis for the management of light intensity, through the use of lamps with specific spectra (green, blue and UV). The aim is to improve production in terms of oviposition, fertility and fecundity of black soldier flies, with the objective of contributing to the optimization of production at industrial level and its future application in organic waste management.

The study consisted of the use of lamps with green, blue and UV light, which have been reported as the electromagnetic spectrum that can capture the photoreceptors of the adult soldier fly. Cages of 30 cm x 30 cm x 30 cm were used, with a total of 100 adult flies, 60 females and 40 males, where the males were older than 48 hours. Controlled conditions of $30^{\circ}\text{C} \pm 2$, 70 ± 10 RH and photoperiod of 8 hours light 16 dark were used. Opposite eggs were collected every day, and mortality, fertility and fecundity were measured.

The results indicate that both the intensity and light spectrum of blue-green and UV lamps can increase egg production by up to 180% compared to white light lamps with a color temperature of 3000K at the same light intensity, and that the use of colored lamps can advance the onset of egg laying by at least one day. Thus, it is evident that the change in light conditions, mainly intensity and electromagnetic spectrum can increase egg production in adult cages, modifying biological patterns of mortality, life expectancy, fertility and fecundity mainly.

Keywords:

Black soldier fly, oviposition, light, LED, electromagnetic spectrum.

INTRODUCCIÓN

La carne es uno de los recursos alimenticios más consumidos, tan solo en 2019, a nivel mundial se consumieron 261.9 millones de toneladas de carne, 68.9 kg per capita⁻¹ y se espera que esta cifra siga en aumento en los próximos años (Nesic & Zagon, 2019). Sin embargo, la producción de carne presenta varios conflictos, uno de ellos es la contribución negativa que tiene sobre la seguridad alimentaria, ya que el 14% del alimento destinado al ganado está conformado por materiales que servirían para alimentación humana, consumiendo un tercio de la producción global de cereales, cuyo cultivo utiliza el 40% del área total cultivable (Mottet *et al.*, 2017).

Entre las principales carnes consumidas en México se encuentra la carne de pollo, de cerdo y de res. Su producción demanda dietas con un alto contenido de proteína, que es principalmente cubierto por harina de pescado y soya. Ambas fuentes están relacionadas con problemas ambientales. La disponibilidad de harina de pescado se ve limitada por el deterioro de los ecosistemas marinos, lo que causa que su precio aumente; a su vez, la soya está ligada con la deforestación de grandes áreas, un alto consumo de agua, y la utilización de pesticidas y fertilizantes (Sánchez-Muros *et al.*, 2016).

A raíz de esto, se han buscado alternativas de fuentes proteicas para alimentación de ganado que permitan cumplir la demanda de estos productos a través de una producción más sostenible, surgiendo como alternativa los insectos. Diversas especies han sido probadas en la alimentación de aves de corral, cerdo, y acuicultura, obteniéndose resultados favorables (Hawkey *et al.*, 2021). Los insectos tienen un menor impacto ambiental en su producción en comparación a las fuentes de proteína como la res o el pollo, y resultan una alternativa a la harina de pescado y soya en la alimentación animal. Estos tienen un requerimiento menor de espacio, y una mayor eficiencia de conversión que el ganado y los peces. Entre los insectos más relevantes como fuentes alternativas de harina alta en proteína se encuentra la mosca doméstica, el tenebrio, el grillo doméstico, y la mosca soldado negro (MSN) (Nesic & Zagon, 2019).

La MSN ha tomado gran importancia en los últimos años se ha vuelto una opción debido a tiene la capacidad de consumir una gran variedad de residuos orgánicos y convertirlos en harina de larva con porcentajes de hasta 40% de proteína y 35%, siendo útil para la producción de alimentos y biodiesel, quitina y frass (Barragán-Fonseca et al., 2017). En la actualidad la mosca soldado negro es producida para la generación de harina para la alimentación animal. La tecnología utilizada para su producción en a nivel industrial no suele ser publicada, y la información existente solo ha sido realizada a escala laboratorio (Zurbrügg et al. 2018). Para su producción es importante considerar distintas variables, tales como temperatura, humedad, espacio, densidad, alimentación, iluminación, entre otros (Rehman et al. 2017). En la iluminación existen variables que se deben tomar en cuenta para maximizar la producción, tales como el espectro, el fotoperiodo y la intensidad. El manejo adecuado de las condiciones de luz podría mejorar la producción y generar ahorro energético (Oonincx, et al., 2016).

La presente investigación tiene como objetivo las condiciones de luz, en términos de intensidad luminosa, que permitan maximizar la fertilidad, la fecundidad y oviposición en un sistema de producción de MSN.

ANTECEDENTES

Mosca soldado negro

La MSN es un díptero de la familia Stratiomyidae nativo de América que se ha expandido a zonas tropicales y templadas de todo el mundo (Lessard *et al.*, 2019). Es un insecto con metamorfosis completa, presenta fase embrionaria, larvaria, pupa y adulto. La etapa larvaria es la de mayor duración debido a que es la única etapa donde se alimenta con la finalidad de generar reservas para la etapa reproductiva (Dortmans *et al.*, 2017). Durante su alimentación, presentan un comportamiento tipo detritívoro, tiene la capacidad de alimentarse de una gran variedad de residuos en descomposición (Surendra *et al.*, 2020). Las larvas son capaces de consumir hasta el doble de su peso por día, por lo que resultan muy eficientes reduciendo materia orgánica (Jucker *et al.*, 2017). Las larvas pueden presentar una composición de proteína de hasta 45% y de grasa de hasta 35% (El-Hack *et al.*, 2020).

Derivado de su capacidad para transformar residuos orgánicos en harina de larva alta en nutrientes, las larvas de MSN se han convertido en fuente alternativa de insumo para alimento de animales. Han sido utilizadas para el aprovechamiento de residuos, como el excremento, residuos de cocina, lixiviados, vegetales, residuos animales, residuos agroindustriales, entre otros. Obteniéndose una biomasa rica en proteína, lípidos, y quitina, con valor en la industria de los alimentos y la industria médica, así como frass, el cual funciona como abono natural (Matthäus *et al.*, 2019). Estas además destacan por no concentran pesticidas y micotoxinas (Wang *et al.*, 2017), y por reducir la carga microbiológica del sustrato que consumen (Surendra *et al.*, 2020).

La Unión Europea ha aprobado el uso de insectos en la alimentación de aves de corral y cerdos mediante normas que regulan el contenido de patógenos, eso ha permitido que insectos como la MSN, se consideren como alternativas en la alimentación animal (EC, 2021).

Producción de mosca soldado negro

Derivado de la experiencia en la producción artesanal de insectos, se ha generado tecnología que es utilizada a nivel industrial en la producción de larva de mosca. Por ejemplo, se encuentra el uso de desvitalizadores y técnicas de sacrificio, tecnologías para el proceso de deshidratado y desgrasado, clarificación lipídica, extracción y transformación de quitina, recuperación de remanentes proteicos, automatización, entre otros (Sindermann *et al.*, 2020).

A nivel mundial existen empresas que trabajan con el aprovechamiento de residuos mediante la producción de larva de mosca soldado. Mantener la ventaja competitiva hace que estas no publiquen los procesos operativos y ganancias (Zurbrügg *et al.* 2018). La mayor parte de los estudios publicados relacionados con la producción de larva de mosca soldado están enfocados a procesos biológicos, siendo pocos los que abordan el impacto económico que puede generar el desarrollo tecnológico. Los estudios que abordan la viabilidad económica suelen basarse en extrapolaciones de sistemas experimentales o piloto, basándose en suposiciones simplificadas (Cicková *et al.* 2015).

Existen oportunidades para mejorar el beneficio económico en la producción de larva, las cuales deben basarse en mejorar el rendimiento y la calidad del frass, lo cual podría posicionar el frass de MSN como un competidor del humus de lombriz. Por otra parte, se encuentra el uso de la quitina en productos con fines médicos (Enterra 2017).

El rendimiento en la producción de larva y sus derivados es uno de los puntos más importantes en la evaluación del impacto económico, ya que depende de la experiencia del productor, de la eficiencia del proceso, de la estandarización del proceso y el tipo de residuo utilizado. Los valores del rendimiento de harina pueden variar en desde 40 a 118 kg de larva por tonelada de residuo, y de 210 a 810 kg de frass por tonelada de residuo base seca (Rehman *et al.* 2017). De forma general, se han reportado promedios de contenido de proteína cruda de 39.6% de proteína cruda, 35.2% de lípidos, 10.9% de fibra cruda, 12.3% de cenizas, 38.6 de materia

seca de larva fresca, 6.5% de quitina y energía bruta de 22.1 (MJ kg⁻¹) (Liu *et al.* 2017). Sin embargo, un manejo que considere variables como el tipo de residuo, variables ambientales y la biología del organismo, es la clave para obtener mayores rendimientos (Rehman *et al.* 2017).

Variables ambientales

La tecnología generada para la producción de insectos está adaptada a las características biológicas de cada especie. Siendo las más relevantes las variables ambientales, debido al impacto que estas ejercen sobre las variables productivas (Joly & Nikiema, 2019).

Temperatura

La temperatura es una de las variables más importantes en la producción de larva. El estrés térmico y el hacinamiento son comunes en la producción en masa y pueden impactar en el tamaño y longevidad de los organismos. Siendo los valores máximos tolerables de 45 a 51 °C y mínimos de 8-13 °C. Se han encontrado diferencias significativas en el rendimiento de producción de larva al variar tan solo un grado la temperatura (Li *et al.*, 2022).

En la producción de larva, se han reportado valores donde el crecimiento poblacional se ve favorecido a 30 °C. La eclosión de huevo también se ve afectada por la temperatura, siendo más rápida a temperatura cercanas a 40 °C, con un promedio de eclosión menor a dos días, y una eclosión de hasta 14 días cuando la temperatura se encuentra cercana a 15 °C, la temperatura que promueve una mayor supervivencia de huevo (mayor al 80%) es a 30 °C. En la etapa de larva, la temperatura que promueve una mayor supervivencia (mayor al 90%) se encuentra de 30 – 35 °C. En etapa de prepupa la temperatura con mayor supervivencia (mayor a 75%) es de 30-35 °C. En la etapa de pupa, la temperatura de 30 °C es la que promueve una mayor supervivencia (>74%) (Chia *et al.*, 2018). Además, la temperatura también es dependiente del tipo de sustrato, debido a que este puede calentarse si se trata de residuos ricos en carbohidratos simples, o a enfriarse si se

trata de residuos con gran contenido de agua (Cammack *et al.*, 2017).

Humedad

En la etapa larvaria se ha visto que la humedad impacta en el desarrollo y en el manejo de su producción. Humedades mayores a 80% en el sustrato dificultan la separación de la larva de los residuos, sin embargo, se ha encontrado que a ese porcentaje humedad se da el crecimiento más rápido (Cheng *et al.*, 2017). Se ha visto que un porcentaje de humedad de 52-70% facilitan la separación de la larva y aumentan el rendimiento total de biomasa. (Barragan-Fonseca *et al.*, 2017).

Por otro lado, el porcentaje de humedad relativa tiene un efecto significativo en la eclosión de huevo y en la emergencia de adultos. Porcentajes muy bajos de humedad causan desecación y mayor mortalidad, en humedades entre 60 y 70%, los huevos eclosionan más rápido y emergen mayor cantidad de adultos (Holmes *et al.*, 2012). En la etapa adulta se recomienda una humedad de 70-90% para mejorar el apareamiento y oviposición (Park, 2016).

Luz

La luz es una de las variables más complejas de estandarizar, debido a que sus efectos sobre los organismos cambian en cada etapa biológica. Está compuesta de distintas variables, tales como la intensidad, espectro, fotoperiodo, irradiancia entre otros (Ortiz *et al.*, 2016). La aparición de luz artificial ha hecho posible su utilización como sustituto de la luz natural, la cual tiene la desventaja de fluctuar según las estaciones o el clima, por lo que la luz artificial hace posible mantener producciones artificiales en condiciones de poca iluminación (Kyba *et al.*, 2017). En la producción de MSN, la luz artificial se ha vuelto indispensable para mantener constante la producción de larva. Diversos estudios han probado que la luz tiene un efecto en la postura y eclosión de huevo, los cuales son derivados del efecto de la luz en el ciclo biológico de la mosca. Este efecto debe ser mejor estudiado y entendido para la maximización de los sistemas de producción (Nakamura *et al.*, 2016; Klüber *et al.*, 2020).

Características de la luz

La luz es la parte del espectro electromagnético que es visible para el ser humano, y se encuentre entre 400 y 700nm (Owens y Lewis, 2018). El espectro electromagnético son ondas generadas por un campo electromagnético a la velocidad de la luz y se manifiesta en forma de ondas o energía. La partícula responsable de su manifestación es el fotón. Esta partícula tiene la característica de expresarse como onda en fenómenos de refracción, o como materia en la transferencia de energía (Ordoñez, 2012).

El espectro electro tiene propiedades que cambian según la longitud de onda que puede ir desde los 10^{-11} m, en el caso de la radiación gamma 0.1 nm en el caso de los rayos x, 350 a 750 nm para el espectro de luz visible, 1 a 10 mm en el caso de la luz infrarroja y 1 a 30 cm en el caso de las microondas. La longitud de onda es inversamente proporcional a la cantidad de energía y la frecuencia. Por lo que espectros con menor longitud de onda, presentan mayor energía (Owens y Lewis, 2018).

En fotometría, la luz es medida mediante intensidad luminosa, flujo luminoso, luminancia, irradiancia entre otros. Estos están basados en la longitud del espectro, la energía y la frecuencia que caen sobre cierta área o que desprende un cuerpo (Teikari, 2007).

Luz solar

El sol tiene la capacidad de irradiar el espectro electromagnético total, incluyendo la luz o espectro visible. En el espectro visible, el sol es capaz de proporcionar más de 100,000 candelas o lux, cuya luminosidad dependerá de las condiciones climáticas, por ejemplo, en presencia de nubes, se pueden obtener hasta 10,000 lux o menos (Krah, 2021). La luz que logra penetrar la atmosfera suele incluir como la radiación con menor longitud de onda a la luz ultravioleta, seguida de la luz visible y luz infrarroja, Algunos organismos son capaces de percibir luz UV-A (Wakakuwa, *et al.*, 2007) o luz infrarroja (Schmitz *et al.*, 2008).

La periodicidad de la luz solar es vital para todos los organismos, ya que es la

responsable de la aparición de fenómenos como el ciclo circadiano o la dormancia, los cuales regulan la actividad física y metabólica de las especies. En forma general el periodo de aparición de la luz del sol tiene una duración de 24 horas, sin embargo, su exposición puede variar entre las diferentes zonas de la tierra (Holtkamp, 2009).

Luz artificial

La luz artificial es aquella generada por el hombre a partir de la inducción de la conversión de energía eléctrica en lumínica. Su desarrollo tecnológico ha llevado de la utilización de fuentes incandescentes hasta la tecnología diodos emisores de luz o LEDs (Owens y Lewis, 2018). La tecnología LED permite un mayor ahorro de energía, menor riesgo eléctrico, mejor continuidad de operación, mayor duración y mejor manejo del color en comparación a fuentes de luz artificial como la fluorescente o la incandescente. Estas características han convertido a la luz LED en la tecnología más utilizada para la fabricación de sistemas de iluminación. (Rugeles *et al.*, 2010).

Actualmente la luz LED es utilizada para complementar la luz en sistemas de producción hortícolas. La selección y la naturaleza de los LED permite generar luz con las características deseadas en los sistemas de producción vegetal (Lazzarini *et al.*, 2017) La aparición de cultivos en interiores de insectos ha provocado la demanda de lámparas especializadas en la producción de insectos, por lo que una gran variedad de tecnología ha sido patentada y fabricada para satisfacer las demandas de este nuevo nicho (Klüber *et al.*, 2020).

Sensibilidad de los insectos a la luz

La respuesta de los insectos a la luz es variable en cada especie. De forma general, los insectos son capaces de responder a estímulos con el espectro de luz visible, sin embargo, existen especies que tienen la capacidad de responder en presencia luz UV-A o infrarroja (Wakakuwa, *et al.*, 2007; Schmitz *et al.*, 2008).

Los fotorreceptores de los insectos son sensibles debido a una proteína llamada opsina que es capaz de generar una respuesta eléctrica en presencia de ciertos

espectros en los conos y los bastones, células neuronales responsables de transducir la señal de luz hacia el sistema nervioso (Kim *et al.*, 2019). Los MSN presenta 3 tipos de opsinas, la UV, SW Y LW. La opsina UV es la encargada de captar las ondas pertenecientes al espectro ultravioleta, específicamente al espectro UV-A. La Opsina SW permite captar el espectro perteneciente a la luz azul, mientras que la opsina LW permite captar la luz verde (Sharkey *et al.*, 2017).

Algunos insectos llegan a presentar fototaxia negativa, es decir, se sienten repelidos por la presencia de luz, en otros casos, sucede lo contrario, una atracción por cierta fuente de luz. Ciertos espectros de luz promueven que la oviposición se realice en lugares distintos en especies acuáticas de insectos (Horváth *et al.*, 2009), en otros casos se provoca un aumento en la depredación (Bennie *et al.*, 2018). Baja iluminación puede provocar una menor probabilidad de apareamiento (Stewart *et al.*, 2020) o represión genética en larvas (Chen *et al.*, 2021). Se han observado otros efectos como aumento de peso en larvas de estadio temprano (Owens y Lewis, 2021b), desorientación (Foster *et al.*, 2021), menor actividad nocturna (Eccard *et al.*, 2018), alteración del comportamiento reproductivo (Wang *et al.*, 2014b), desorientación (El Jundi *et al.*, 2015), alteración de bioluminiscencia (Elgert *et al.*, 2021a), entre otros.

La intensidad y el tiempo de incidencia de la luz tienen efecto en el ritmo circadiano a través del fotoperiodo. Algunos coleópteros del género *Harmonia* son más activos a medida que aumenta el tiempo de luz, más actividad en periodos de 24 horas luz con decremento hacia periodos 0 horas luz (Wang *et al.*, 2014a). Sin embargo, fotoperiodos con incidencias de luz cercanas a 24 horas aumentan la mortalidad (Valenzuela-Zuccar, 2020). A nivel poblacional, se han visto efectos generados por el cambio de la intensidad luminosa, como el aumento en la mortalidad (Kehinde *et al.*, 2018), menor densidad poblacional (Vaz *et al.*, 2021), variaciones en el desarrollo, fertilidad y fecundidad (Wang *et al.*, 2014a) entre otros.

Esto demuestra que se debe tener cuidado especial con la iluminación, llevando consigo una atenuación que se adecue a las necesidades del insecto. Se ha sugerido disminuir la iluminación entre 12:00 pm y 4:00 am. También se sugiere la

ausencia de luz artificial en etapas reproductivas de ciertos insectos. (Van den Broeck et al., 2021a).

La MSN tiene la capacidad de detectar el espectro desde <300 nm hasta >700 nm, con mayor sensibilidad en el espectro a 504, 437 y 367-440 nm. Debido a esto, se han sugerido la utilización de tecnología LED que considere luz UV, azul y verde, en una proporción 1:1:3 respectivamente, con el fin de simular las condiciones de iluminación necesarias para su producción intensiva, optimizando la relación de pigmentos y potenciando la sensibilidad de los fotorreceptores. Se ha sugerido estudiar las intensidades de luz donde se maximiza la inducción al apareamiento, así como la distribución del espectro de luz optima (Oonincx, *et al.*, 2016).

Se ha visto que el apareamiento en adultos no ocurre en intensidades de luz menores a $63 \mu\text{mol m}^2\cdot\text{s}^{-1}$. Cantidades de luz mayores a $200 \mu\text{mol m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, promueven un apareamiento cercano al 75 % en la población (Tomberlin and Sheppard, 2002). Otros autores sugieren que la actividad de apareamiento disminuye sobre los $110 \mu\text{mol m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ (Zhang et al., 2010)

Se ha demostrado que la irradiancia de $0.92 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ genera una probabilidad del 23% de apareamiento de moscas adultas, mientras que la irradiancia de $431 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ genera una probabilidad del 70%. De la misma manera, el tiempo de oviposición decrece de 6.4 horas a 3.4 horas con los mismos cambios de irradiancia. Los apareamientos posteriores a 7 horas iniciada la fotofase han sido asociados con probabilidad de apareamiento reducida. Se sugiere utilizar las longitudes de luz cercanas a 440 y 540 nm con una intensidad cercana a la luz solar (Schneider, 2020) Estudios han demostrado una mayor oviposición en presencia de luz solar, en comparación al uso de luz artificial, con un 39% de postura con luz de sol y un 11.2% con lámpara LED, además, la longevidad y el tiempo de oviposición se ven afectadas entre los distintos tipos de luz (Nakamura et al., 2016).

La comparación entre distintas fuentes de luz como la luz LED verde, lámpara de halógeno ámbar y lámpara fluorescente azul durante 15 días mostraron una mayor relación huevos/ hembra en la luz LED, de casi 25 huevos por hembra, en

comparación a las otras dos que tenían menos de 20. Por otra parte, el tiempo de oviposición tuvo una duración de 13 días para luz LED, 11 días para la lámpara fluorescente y 10 días para la lámpara de halógeno ámbar (Heussler *et al.*, 2018). La comparación de luz LED con distintas temperaturas de color, 3000K, 4000K y 6500K, mostró que la temperatura de color de 3000K presenta picos más cortos de postura, siendo de 1 día para 3000K, 2.5 días para 4000K y 3.5 días para 6500K, concluyendo que el uso de iluminarias con temperaturas de color de 3000K podrían potencialmente incrementar la producción de huevo y los rendimientos de larva (Klüber *et al.*, 2020).

La duración del fotoperiodo es un parámetro imprescindible en la producción. Fotoperiodos 2:22 (horas luz :horas oscuridad) han demostrado alargar el pico de oviposición en comparación a periodos 18:6. La puesta de huevo aumenta a medida que aumenta el fotoperiodo, siendo de hasta 25.1mg por hembra cuando se utilizan fotoperiodos 18:6, en comparación a los 13 mg por hembra en fotoperiodo 2:22 y 21.5 mg/hembra en fotoperiodo 6:18. De forma general, la tasa de eclosión no se ha visto menor a un 90% en ningún fotoperiodo entre 2:22 y 18:6, por lo que la duración de la luz parece no influir en la eclosión de los huevos. Además, los periodos de pre-oviposición se han observado de 4 días en todos los casos. El pico de oviposición es más corto en fotoperiodos con más luz (Hoc *et al.*, 2019).

Un estudio realizado en Indonesia con luz solar, con un promedio de luz de 6069 lux, con picos máximos de 14,000 lux y tiempo de luz de 12 horas (6:00-18:00), mostro que la mayor cantidad de apareamiento se realizaba entre las 9:00 y 12:00, coincidiendo con los picos máximos de luz, y más del 40% de apareamiento ocurrió durante el 1er día, más del 15% el segundo día, cesando el día 8. Por otra parte, la puesta de huevo se realizó en mayor medida desde las 12:00 hasta las 16:00, y la mayor postura se realizó el día 4, mismo día que se inició la oviposición, y termino el día 10. El tiempo de desarrollo/vida de los huevos fue menor a 4 días, de la larva fue de 14 días aproximadamente, de prepupa fue de 8 días, de pupa de menos de 8 días, y 13 días como imago. Se sugiere que intensidades de $200 \mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

(10,800 lux) de luz artificial pueden ser determinantes en el apareamiento (Julita *et al.*, 2020).

Ciclo circadiano

El ciclo circadiano hace referencia a los cambios físicos, conductuales y mentales en los organismos que presentan un ritmo de 24 horas. Estos responden principalmente a los cambios entre luz y oscuridad. El ciclo circadiano está caracterizado por cumplir con los siguientes criterios: es persistente en un periodo de 24 horas en ausencia de señales externas, se reinicia por señales ambientales como luz y temperatura, y tiene una duración de periodo estable en una gama de temperatura fisiológicamente viable (Steel and Vafopoulou, 2006).

Cuando se comenzó a estudiar el efecto de la luz en el ciclo circadiano, se descubrió que moscas del género *Drosophila* presentan una emergencia de pupas cíclica que responde a un ciclo de 24 horas, que se pierde de forma gradual en ausencia de luz (Pittendrigh, 1954). En 1971, Konopka y Benzer aislaron por primera vez mutantes del gen *period* (*per*), el cual tiene efecto en la emergencia cíclica de pupas de *Drosophila* y en la actividad locomotora diaria. Proponiendo a este gen como un mecanismo molecular involucrado en la regulación del ciclo circadiano ((Konopka and Benzer, 1971). El gen *per*, tiene una autorregulación, donde la presencia de proteína *per* inhibe su propia transcripción. Estas oscilaciones son cíclicas, y permiten modular genes involucrados en procesos fisiológicos que responden a la acción de quinasas, fosfatasa, glicosil transferasas, entre otras (Tataroglu and Emery, 2015). Otros genes también presentan efectos de regulación en el ciclo circadiano, la proteína Cryptochrome o *Cry*, responde con alteraciones moleculares en presencia de luz (Emery *et al.*, 1998), lo cual permite que se una a la proteína TIM (Dissel *et al.*, 2004). Su unión es regulada por la proteína JET, degradándolas (Koh *et al.*, 2006). *Cry* tiene un efecto clave en el ciclo circadiano al responder a estímulos de luz. Por otra parte, la opsina también contribuye a las respuestas dependientes de luz (Kistenpfennig *et al.*, 2017).

Distintas células neuronales responden a estímulos de luz, mediante la expresión

de proteínas *per* y *tim*, permitiendo a los organismos adaptarse a distintas condiciones de luz (Yoshii et al., 2012). Se ha visto que la proteína Bantam-3p está asociada en la mediación de proteínas del ritmo circadiano en *D. melanogaster*. Su sobreexpresión provoca alargamientos del ciclo circadiano (Kadener, 2009). Su expresión en MSN es mayor en larva, decreciendo en pupa y etapa adulto. Se ha propuesto su regulación como un factor para una crianza masiva, debido a que se ha visto relación directa entre la exposición a la luz y la producción de huevo (DeRaedt et al., 2022). La disrupción de distintos marcadores de ciclo circadiano ocasiona la aparición de problemas fisiológicos en humanos como cáncer, diabetes, y animo en humanos en humanos, esto sugiere que la modulación del ciclo circadiano a nivel metabólico tiene un efecto sobre las condiciones fisiológicas de los individuos (James et al., 2017).

Dormancia

La dormancia es un periodo estacional en la vida de los organismos en donde se ralentiza su desarrollo y reproducción. El resultado es la disminución de la tasa de crecimiento, quiescencia o diapausa. La diapausa es un estado de dormancia estacional, adaptado a periodos de condiciones ambientales adversas, ocasionado por factores bióticos y abióticos (Saunders, 2012). La diapausa está determinada genéticamente con el sistema neurohormonal como mediador. Es caracterizada por la inactividad, detención de morfogénesis, funciones reproductivas y desaceleración del crecimiento. Ocurre en etapa de ontogénesis específica de cada organismo. Su expresión es regulada por señales que responden a estímulos ambientales, los cuales predicen de manera acertada la llegada de condiciones desfavorables. El principal estímulo de la diapausa invernal es la disminución de la duración del día. Cuando la diapausa es inducida no puede detenerse de manera inmediata, sino que se verá reflejada en el resto del desarrollo del individuo (Tougeron, 2019).

La diapausa es menos frecuente en insectos de zonas tropicales que los de zonas templadas. Sin embargo, se han visto efectos de diapausa en MSN. Por ejemplo, en prepupas, se han reportado tiempos de vida de hasta 114 días a 28 °C en estado

de diapausa (Hahn and Denlinger, 2007). Se ha visto que la duración del día tiene un efecto de acelerar el cambio de estadio de prepupa a pupa. En oscuridad total, con intensidades menores a 3 lux por hora, las prepupas demoran menos tiempo en convertirse en pupas, con una tasa de emergencia exitosa (Ferdousi, and Sultana, 2021).

En diapausa inducida por disminución de temperatura, las prepupas han mostrado tiempos de desarrollo de hasta 61 días, mientras que en condiciones idóneas se han reportado 11 días. En adultos, las hembras post diapausa, han mostrado mayores tasas de fertilidad y posturas más grandes en comparación a hembras que no tuvieron diapausa inducida. Esto sugiere que la fecundidad es afectada por la duración de la diapausa (Samayoa and Hwang, 2018). En especies como *Nasonia vitripennis*, avispa parasitoides de moscas, se ha visto que las hembras expuestas a periodos cortos de luz en comparación a hembras expuestas a periodos largos presentan patrones epigenéticos de metilación y acetilación distintos. Esto sugiere el estudio de cambios epigenéticos durante la diapausa (Pegoraro *et al.*, 2016).

En la dormancia, las variables climáticas generan un efecto compensatorio que permite generar una latencia que permitirá mantener al individuo vivo mientras las condiciones naturales mejoran, entre los factores incluidos se encuentra la modificación del tamaño, tiempo de desarrollo, tasa de crecimiento, número de estadios, fecundidad, tiempo de oviposición, esperanza de vida, cuidado paterno, y las reservas energéticas (Danks, 2002). Las reservas energéticas, principalmente de grasa, tienen un papel en la producción de huevo en insectos, esta puede ser asignada en la producción de huevo o para sobrevivir, dependiendo las condiciones climáticas y de alimento. La plasticidad de adaptación de los organismos varía entre cada especie (Ellers and van Alphen, 1997).

Postura

La postura u oviposición en insectos hace referencia al proceso de poner o arrojar huevos desarrollados fuera del individuo. En insectos ocurre mediante un órgano ovipositor que expulsa los huevos (NIH, 2022). El huevo es generado dentro del

insecto hembra posterior a que es fecundado por espermatozoides depositados por un macho. Una vez ovipositado los nutrientes del vitelo se agotan y la capa externa del huevo se debilita mediante la apoptosis de las células que lo conforman. Al igual que en otras especies, los huevos de insectos también poseen un corion, encargado del intercambio de gases (Resh & Cardé, 2009).

El huevo debe tener características de resistencia que le permitan cruzar el aparato ovipositor de la madre sin sufrir rupturas. Además, este debe ser capaz de soportar el ambiente hostil, el cual contiene predadores y patógenos, esto se logra mediante protección química, mecánica o parental. La MSN coloca sus huevos de forma estratégica, considerando espacios pequeños de difícil acceso, humedad, temperatura, material y microbioma (Resh & Cardé, 2009). Diversos insectos liberan compuestos volátiles que pueden atraer a otros organismos de la misma especie como feromonas atrayentes o inhibitorias, indicando las condiciones del lugar. Incluso las plantas pueden liberar hormonas que atraigan insectos que depreden los huevos de otras especies (Hilker & Meiners, 2011) En la oviposición se depositan huevos que generalmente están fecundados. Los insectos varían el lugar donde estos se colocan. En la MSN se ha visto que las hembras colocan los huevos en zonas con cierto olor relacionado con su especie. En diversas especies se ha visto que se secreta feromonas por las glándulas accesorias en el tracto reproductivo, esto es acompañado con microbios presentes. Sin embargo, esta respuesta no se encuentra bien estudiada (Rosenheim, et al., 2000). Durante el apareamiento, el macho puede brindar secreciones que puedan ser de utilidad para la formación del huevo, que permitan su oviposición, incluso que eviten el apareamiento de la hembra con más machos. En la oviposición se sabe que las hembras pasan el microbioma a las nuevas generaciones. Las bacterias que la madre heredan ingresan a los nuevos individuos cuando rompen la cascara del huevo (Jordan & Tomberlin, 2021). Entre las estrategias para la protección del huevo tras su oviposición se encuentra enterrar los huevos, camuflaje del nido, construcción de paredes, o su deposición en fluidos pegajosos repelentes con bactericidas (Hilker & Meiners, 2008).

La luz tiene efectos sobre la postura de huevo. En hembras de MSN, el aumento del fotoperiodo esta relacionado con la disminuci3n del tiempo de vida en adultos, esto tiene relaci3n con la postura de huevo, ya que la presencia de oviposici3n solo se realiza en presencia de luz, al disminuir sus reservas energ3ticas por la latencia generada por la oscuridad, tambi3n se ve reducido el n3mero de huevos puestos (Kl3ber et al., 2020).

Revisión de patentes

Se diseñó un sistema de luz artificial para la cría de MSN adulto, la cual produce luz azul, verde y ultravioleta. La luz azul utiliza el espectro de 420 a 470 nm. La luz verde utiliza espectro de 500 a 535 nm. La cobertura de la luz ultravioleta utiliza espectro de 355 a 380 nm. Es capaz de producir temperatura de color de 3000K a 7000K. Esta es utilizada como luz suplementaria o luz única. Está basada en los dos ojos compuestos y tres ojos simples de la MSN, sus características visuales y su sensibilidad a la luz reducen el consumo de energía para la producción (Yang *et al.*, 2018).

Se diseñó un aparato de suministro de luz para la cría de MSN, este fabricado a partir de una lámpara LED, con una longitud de 380 a 780 nm de 2500K a 3500K. La perla de la lámpara LED incluye la siguiente composición: perla de luz UV 8-12%, perla de luz azul 18-22%, perla de luz verde 17-23%, cordón de lámpara *feux rouge* 18-22%, cordón de lámpara de luz amarilla 18-22% y cordón de lámpara de luz púrpura, cordón de lámpara de luz naranja y cordón de lámpara de luz verde 8%~12%. El aparato de suministro puede sustituir la inducción de la iluminación natural cuando las moscas ovipositan, obteniendo un efecto idéntico a la iluminación en términos de cría de mosca soldado, este otorga una potencia de 150w. Además, presenta un método para la cría de mosca donde la cantidad de huevo acumulado es mayor. En el método de irradiación de luz se utiliza un ángulo de irradiación de 30°- 45°, este se instala de 0.5 a 2 m de distancia de los espacios de superficie de cría de mosca, la intensidad de cría se establece de 2000 a 3500 lux. Se basa en un mecanismo de reparado de luz que llena los espacios inferiores a 2000 lux, y los hace llenarse, desde las 8:00 hasta las 18:00 (Wang *et al.*, 2019). Este diseño proporciona un método para inducir a las moscas soldados a emerger, aparearse y poner huevos. El método consiste en poner al menos una mosca y un macho en un espacio cerrado con luz artificial que incluya una longitud de onda del espectro visible y una longitud de onda del espectro UV. La luz del espectro visible es generada utilizando lámparas de cuarzo-yodo a 300-500 W, esta posee una

intensidad de al menos $400 \mu\text{mol m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ y al menos una onda de luz ultravioleta utilizando una lámpara de halógeno a 50 W con una intensidad de menos de $100 \mu\text{W cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ (Aldana *et al.*, 2013).

Un diseño de lámparas de llenado de luz que utilizan capas de luz azul, roja y amarilla que simulan el sol promueve la postura de huevo y son de bajo consumo, menor a 40 W (Yu, 2019). Se diseñó una metodología para la producción de larva de mosca que incluye sistemas de iluminación para guiar las pupas que emergen en adultos hacia la zona de vuelo, con una luz que incluye 50% o más de luz verde en espectro de 490nm a 530nm, 25% o más de luz azul a 430 a 480 nm, siendo la restante luz blanca, este sistema permite reducir la tasa de pérdida de insecto (Ki, 2018).

Por lo anterior descrito, este trabajo tiene el objetivo de establecer las condiciones de intensidad de luz que permitan obtener los mejores rendimientos de tiempo de oviposición, fertilidad, y fecundidad en la producción de mosca soldado negro.

Monitoreo tecnológico

La producción de mosca soldado negro ha experimentado notables mejoras y cambios tecnológicos a lo largo de la historia de su producción. La tecnología actual permite que cualquier persona pueda producir esta especie con relativa facilidad, así como la producción en gran escala tomando en cuenta una gran cantidad de aspectos biológicos relevantes para su producción (Dortmans *et al.*, 2021). En lo que respecta a los sistemas de iluminación utilizados en su cría, estos han logrado generar condiciones propicias para su producción de manera artificial cuando las condiciones naturales no lo permiten (Zhang *et al.*, 2010).

La cría tradicional de mosca soldado negro es realizada con luz solar natural, ya que este ha mostrado tener los mejores resultados, y en menor gasto energético. Sin embargo, a medida que la demanda aumentó y se exploraron nuevas aplicaciones para este insecto, se hizo evidente la necesidad de controlar mejor las condiciones de cría. Esto condujo al desarrollo de sistemas de iluminación artificial en las instalaciones de cría que permitan mantener la producción de huevo de forma estable a lo largo del año (Nakumara *et al.*, 2016).

Las lámparas incandescentes (lámpara halógena, lámpara de yodo tungsteno) fueron los primeros sistemas de iluminación artificiales utilizados en la producción de mosca soldado negro (Zhang *et al.*, 2010). Estas lámparas proporcionaban luz y calor necesarios para el crecimiento de las larvas, pero presentaban desafíos como el consumo de energía elevado y la generación de calor excesivo en las instalaciones (Singh *et al.*, 2023).

Posteriormente se introdujeron sistemas de iluminación más eficientes y especializados. Las lámparas fluorescentes y, más tarde, las luces LED se convirtieron en opciones populares en la producción de mosca soldado negro. Estos sistemas ofrecían una mayor eficiencia energética, una vida útil más larga y la capacidad de ajustar el espectro de luz según las necesidades específicas de las larvas (Liu *et al.*, 2020).

En la actualidad, las instalaciones de cría de mosca soldado negro cuentan con sistemas de iluminación LED personalizados que permiten modular la intensidad lumínica y el espectro de luz de manera precisa. Los avances en la investigación han demostrado que ciertos espectros de luz pueden influir en el crecimiento, la reproducción y la salud de las moscas soldado negro, lo que ha llevado a una producción más eficiente y sostenible (Oonicx *et al.*, 2016; Park, 2016).

En un futuro, el entendimiento de la intensidad, el espectro electromagnético y el fotoperiodo permitirá que se generen sistemas de iluminaciones mas eficientes que se adapten a las condiciones luminosas diarias, siendo así los sistemas híbridos de luz natural y complementación con luz artificial aquellos más eficientes en términos de producción y gasto energético (Alvares, 2012; Wang and Shelimo, 2017; Liu *et al.*, 2020).

Problema

Actualmente el procesamiento de MSN es realizado bajo condiciones ambientales controladas de temperatura, humedad y luz. Sin embargo, no se ha considerado la estandarización de la intensidad de luz en los diferentes espectro y fotoperiodos utilizados. Esto provoca que los rendimientos de posturas sean muy variables entre los distintos métodos de procesamiento, obteniendo valores de oviposición de entre 20 hasta 350 huevos por hembra y tasas de eclosión de 70% hasta 90%, así como picos de oviposición entre 1 y 5 días.

La producción intensiva de larva MSN debe considerar la implementación de iluminación que incluya la estandarización de la intensidad de luz, espectro y fotoperiodo. Así como su efecto en variables productivas como la fertilidad, fecundidad y oviposición en la etapa adulto. Lo cual tendría como resultado una maximización en el rendimiento de la producción de larva debido a un aumento en la producción de huevo y un mejor control de la población debido a la homogenización de las posturas (Oonincx, et al., 2016).

La incógnita está en determinar si es posible obtener un rendimiento mayor en la postura de MSN mediante la modificación de la intensidad de luz utilizando tecnología LED, en comparación a un cultivo convencional. Esto, mediante la utilización de lámparas LED con luz verde, azul y UV con intensidades mayores a $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Lo cual podría disminuir el efecto de la dormancia en la MSN, aprovechando los nutrientes obtenidos en la etapa larvaria en la producción de huevo y no en la supervivencia, así como el incremento en la oviposición derivado del aumento en la actividad metabólica como resultado del efecto de la luz en la regulación del ciclo circadiano.

Justificación

La producción de MSN ha estado en aumento en los últimos años. En el año 2018 se estimó que más de 300 millones de dólares fueron invertidos en la expansión de la industria dedicada a la producción de alimentos basados en insectos (Joosten et al., 2020). Se espera que el mercado dedicado a la producción y comercialización de MSN crezca hasta un 30,5% para el año 2033. En términos de volumen, se espera que se produzcan más de 8 mil toneladas para el año 2033 (MR, 2022). Su producción basada en alimentación con residuos orgánicos ayuda a minimizar el impacto ambiental negativo derivado de la disposición de estos en vertederos, donde se descomponen y liberan gran cantidad de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático. Lo anterior es de gran interés debido a que diariamente se producen 2.6 millones de toneladas de residuos orgánicos en el mundo (Ricci-Jürgensen et al., 2020). La MSN es uno de los organismos más mencionadas para el aprovechamiento de residuos orgánicos debido a que tienen un ciclo de vida corto y una tasa reproductiva más alta que otros insectos, aunado a su capacidad de consumir gran variedad de residuos orgánicos, es una excelente herramienta para procesarlos y obtener productos de interés como harina alta en proteína y aceite (Wang et al., 2017). En términos de rendimiento, a partir de 10 toneladas de residuos se producen 300 kg de harina de larva de MSN (Salomone et al., 2017).

Para lograr una producción eficiente de harina de larva de MSN, es necesario el uso de tecnología que permita controlar variables ambientales, principalmente en lugares donde el clima no es naturalmente adecuado para el organismo de interés (Specht et al., 2019). En el caso de la MSN, el control de la temperatura, humedad y luz son esenciales en una buena producción. La luz tiene un papel crucial en la producción de todo ser vivo, ya que forma parte de los ciclos circadianos y su presencia es indispensable para su desarrollo. El suministro artificial de luz permite mantener un suministro continuo y estable de luz, evitando las irregularidades en la luz natural que ocurren por condiciones naturales como el clima y las estaciones

(Melgar-Lalanne et al., 2019).

Un manejo que considere la suplementación con luz artificial o la sustitución total de la luz solar podría acelerar e incrementar la producción MSN, principalmente por la estandarización en la producción de huevo, aumentando la rentabilidad y el ahorro energético (Julita et al., 2020).

Sin embargo, las investigaciones relacionadas con el efecto de la luz artificial en la reproducción de MSN se han enfocado principalmente al estudio del espectro y la irradiancia sobre algunas variables productivas (Schneider, 2020), sin considerar la estandarización de la intensidad de luz y su efecto en el rendimiento de la producción de MSN. Por lo que, es necesario establecer las condiciones de luz, principalmente de intensidad luminosa, que permitan maximizar la fertilidad, la fecundidad y oviposición en un sistema de producción de MSN.

HIPÓTESIS

La modificación de la intensidad de luz de una fuente de iluminación LED que incluya longitudes de onda del espectro verde, azul y UV, afecta las características de la postura de MSN, de tal forma que permite incrementar la fertilidad, fecundidad y oviposición en comparación con un cultivo convencional.

Lo anterior debido a los efectos que produce la intensidad de luz sobre la regulación del ciclo circadiano y la actividad metabólica, así como en la disminución del efecto de dormancia producido por la luz natural, permitiendo aprovechar los nutrientes obtenidos en la etapa larvaria en la producción de huevo y no en la supervivencia.

OBJETIVOS

Objetivo General

Establecer la intensidad lumínica de una fuente de luz LED, con una combinación fija de luz verde, azul y UV-A, que permita incrementar la postura de MSN en términos de fecundidad, fertilidad y oviposición.

Objetivos particulares

Construir un sistema de iluminación LED con luz verde, azul y UV-A en proporción 3:1:1, que permita controlar la intensidad y el fotoperiodo, mediante la utilización de un microcontrolador, LEDs y una fuente de suministro de energía para experimentación en jaulas de vuelo de MSN.

Establecer un cultivo de MSN mediante la utilización de un sistema de control de variables ambientales y dieta estandarizada para la obtención de pupa.

Determinar la respuesta de la exposición de la MSN adulto a diferentes intensidades de luz mediante la medición de variables biológicas como oviposición, fecundidad y fertilidad, con el fin de comparar su efecto en la postura.

METODOLOGÍA

El presente proyecto fue realizado en la Facultad de Ingeniería- Campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro en el municipio de El Marques, estado de Querétaro, México. Con una latitud de 20°42'21.93"N y longitud de 100°15'35.06"O, así como una altitud de 1921 msnm. El sitio de producción fue realizado utilizando condiciones climáticas controladas las cuales serán descritas en los siguientes apartados (Figura 1).

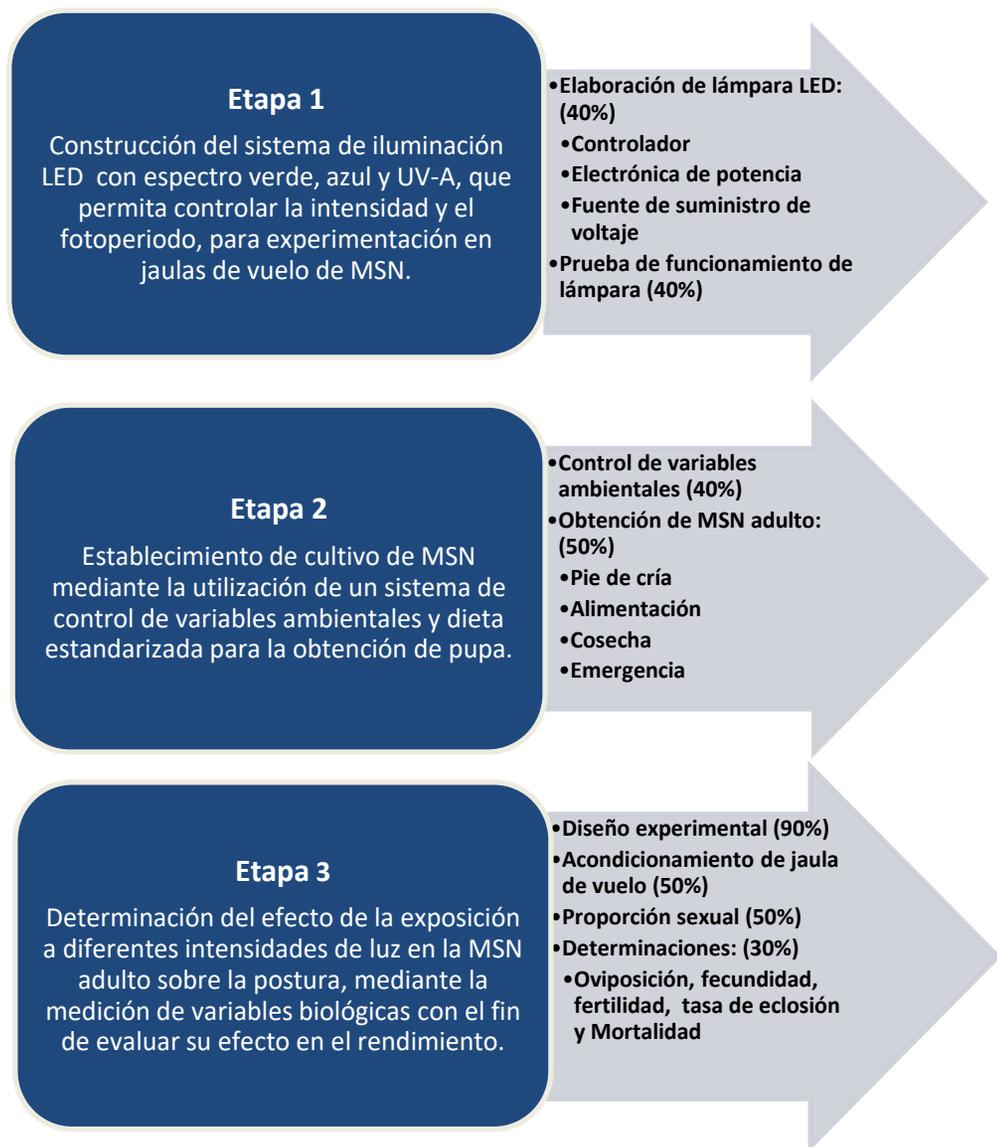


Figura 1. Etapas de trabajo en la investigación.

Etapa 1.

Elaboración de lámparas LEDs

La lámpara tiene una fuente de energía de corriente directa que esta unido a un convertidor de voltaje para los LEDs azul y verde, y un segundo controlador para los LEDs UV. A su vez se uso un temporizador para controlar el tiempo de funcionamiento de las lámparas, el cual se encuentra previo a la fuente de energía (Fig. 2).

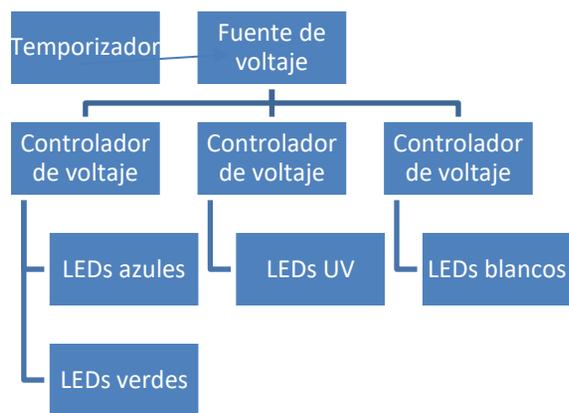


Figura 2. Diagrama de flujo con los componentes básicos de la lampara LED LEDs

Se utilizaron LEDs de color verde, azul y UV-A para las pruebas de intensidad luminosa. Así como LEDs blancos con temperatura de color de 3000 K. A continuación, se presentan la información técnica de cada LED (Tabla 1).

Tabla 1. Características de los LEDs utilizados para la elaboración de lámparas

	LED verde	LED azul	LED UV-A	LED blanco 3000K
Longitud de onda máxima (nm)	525	460 - 470	395	-
Flujo luminoso (lm)	78	25	-	100 - 110
Potencia radiante (mW)	-	-	1015	-
Corriente eléctrica (mA)	350	350	500	350
Ángulo de incidencia (°)	140	155	130	-
Tensión directa (V)	2.8 – 3.5	3.2 – 3.6	3.4	3.2

La cantidad de LEDs por lámpara se realizó en una proporción 3:1:1 VERDE:AZUL:UV, como ya se ha propuesto anteriormente debido a la capacidad visual de la MSN (Referencia). Por lo que, las lámparas de baja intensidad consistieron en 3 LEDs verdes, 1 LED azul y 1 LED UV, mientras que las lámparas de alta intensidad utilizaron el doble de LEDs. Los LEDs fueron dispuestos sobre una lámina de acetato perforada.

Las lámparas blancas consistieron en 5 LED blancos, cuya intensidad luminosa en μmol fue igualada a las lámparas de baja intensidad de 3 LEDs, con el uso de un sensor de intensidad luminosa y un controlador de voltaje (Fig 3).

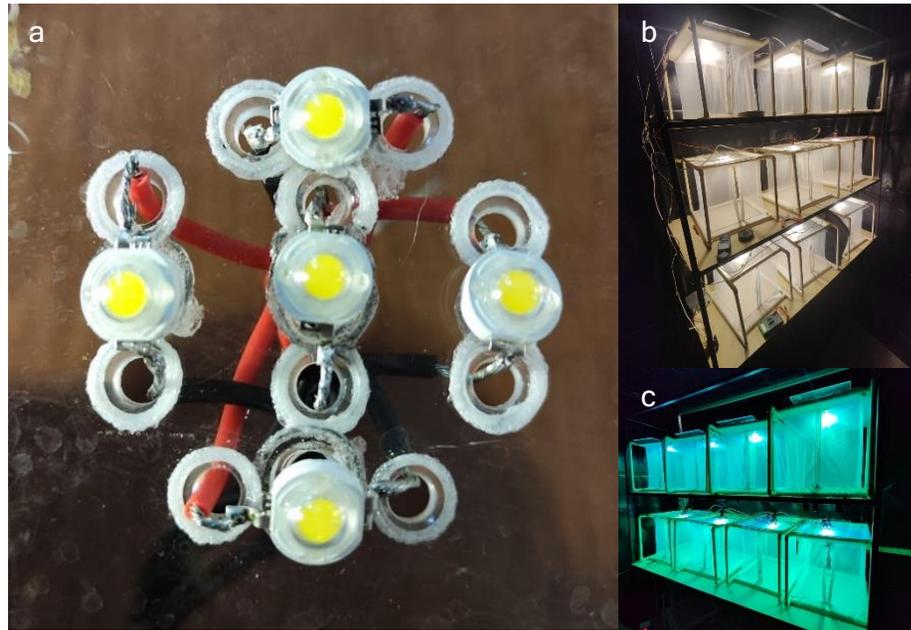


Figura 3. Diseño de la lámpara (a), lámparas blancas (b) y lámparas experimentales (c) en funcionamiento.

Fuente de suministro de voltaje

Se utilizó una fuente de alimentación con salida de corriente continua 12V – 20A y entrada de corriente alterna 110-240V marca Yasoca ®.

Controlador de voltaje

El controlador de voltaje utilizado fue un *Convertidor de voltaje DC-DC STEP-DOWN- 8A 300W XL4016* (Figura 4). El cual fue conectado a la fuente de suministro de voltaje y regulado con el uso de un multímetro para el control de la intensidad luminosa. Se utilizaron distintos controladores paraca cada tipo de LED.

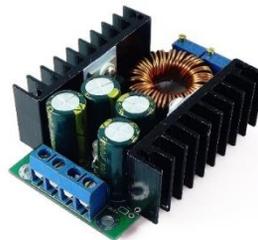


Figura 4. Convertidor de voltaje modelo XL4016.
Imagen tomada de: <https://naylampmechatronics.com/conversores-dc-dc/127-convertidor-voltaje-dc-dc-step-down-8a-300w-xl4016.html>

Temporizador

El temporizador utilizado fue un TEMP-20E de la marca STEREN®, con potencia de salida de 1800 W, a 120 V y 5 A máx (Figura 5).



Figura 5. Temporizador modelo TEMP-20E

Imagen tomada de: <https://www.steren.com.mx/temporizador-timer-digital-de-20-eventos.html>

Pruebas de funcionamiento de la lampara

La prueba de funcionamiento se realizó mediante el uso de un Sensor de Luz Quantum modelo SP03668I con capacidad de captura de radiación PAR entre 400 y 700 nm, así como un Sensor UV modelo SP03676I con una captura crítica entre 200 y 400 nm, ambos de la marca LIGHTSCOUT®. Los sensores se acoplaron a una estación micro estación WatchDog® 1000 Series para la toma de datos (Figura 6)



Figura 6. Micro estación WatchDog® 1000 Series y Sensor de luz LIGHTSCOUT®
Imagen obtenida de: <https://www.specmeters.com/>

En la prueba de funcionamiento se realizó la calibración de la intensidad de luz esperada por cada lámpara a una distancia de 6.5 cm de la lámpara, donde se igualaron las intensidades obtenidas por la medición de la radiación PAR para las lámparas de luz blanca y las lámparas de baja intensidad mediante la modificación del voltaje de salida con el uso del controlador de voltaje.

Posteriormente, el comportamiento de la intensidad de luz a lo largo de las jaulas fue descrito mediante el uso de múltiples mediciones a diferentes distancias y la generación de una ecuación potencial. En este paso se utilizaron los sensores PAR y UV descritos anteriormente, así como un piranómetro de silicio modelo 3670I de la marca LIGHTSCOUT® (Figura 6), con capacidad de medir irradiancia entre 300 y 1100 nm y un luxómetro modelo HER-408 de la marca STEREN® con capacidad de medir entre 0 y 200,000 lux (Figura 7).



Figura 7. Luxómetro modelo HER-408
Imagen obtenida de: <https://www.steren.com.mx/medidor-digital-de-luminosidad-luxometro-her-408.html>

Etapa 2.

Elaboración de jaula

Las jaulas fueron elaboradas mediante el uso de tela Nylon blanco, el tamaño interior de la jaula fue de 30 cm x 30 cm x 30 cm. Así como una estructura de CPVC a manera de armazón (Figura 8).



Figura 8. Jaula de vuelo

Posteriormente, las jaulas fueron colocadas en un mueble de acero de ½ pulgada, con altura de 50 cm por nivel con entrepaños de madera MDF de 5 mm en la base, así como plástico polietileno negro alrededor con la finalidad de evitar la entrada de luz externa (Fig. 9).



Figura 9. Estante con jaulas de vuelo

Control de variables ambientales

Para el control de la humedad se instaló un higróstico IHC-200 acoplado a un humidificador ultrasónico LVHD4001 LIVATRO®, el cual fue monitoreado y rellenado con agua cada 24 horas. Para el control de la temperatura se utilizó un termostato ITC-308 (Fig. 10) acoplado a un calefactor con ventilador RC-A01 de 1500W.



Figura 10. Higróstico IHC-200 y Termostato ITC-308.
Imagen obtenida de: <https://inkbird.com/products/>

La captura de datos de las variables ambientales se realizó mediante el uso de un controlador Arduino UNO® acoplado a un sensor de temperatura y humedad DHT11.

Producción de MSN

Pie de cría

Se obtuvo huevo de MSN de la Planta Piloto de Producción de Mosca Soldado Negro de la Universidad Autónoma de Querétaro Campus Amazcala. Este fue puesto en un cuarto a temperatura entre 27-30°C, 60% HR e iluminación LED de amplio espectro durante 12 horas por día hasta el momento de su eclosión (Gobbi et al. 2013).

Alimentación

Desde la etapa de huevo hasta inicios de la etapa de prepupa (día 26 de vida), se

proporcionó una dieta estándar tipo Gainesville, que consistió en 50% de salvado de trigo, 30% de harina de alfalfa y 20% de harina de maíz (fig. 11), al 70% de humedad en una cantidad de 125 mg/día/larva (Cammack et al., 2017). Todo el alimento fue preparado en seco y homogenizado mediante el uso de una licuadora de aspas tradicional. Posteriormente se realizó un análisis químico proximal al preparado en seco en el Laboratorio de Nutrición Animal de la Universidad Autónoma de Querétaro.



Figura 11. Harina de maíz (a), alfalfa(b) y salvado de trigo(b).

Cosecha de prepupas

Cuando el 60% de la población se transformó en prepupa, se cosecharon mediante el uso de tamiz con un tamaño de 5mm, y se colocaron en recipientes vacíos para su transformación en pupa (Cheng et al., 2017).

Emergencia y selección sexual

Posterior a que las prepupas se convirtieron en pupas, estas fueron colocadas en recipientes de plásticos hasta que emergieron en moscas, en este paso, cada 24 horas fueron sexadas y separadas en recipientes con 50 machos o hembras, con la finalidad de ser utilizadas en el experimento (ver Diseño experimental). El sexado se determinó mediante una inspección visual, basándose en la morfología del aparato reproductor, ubicado en la parte posterior del abdomen (Hoc *et al.*, 2019) (Fig. 12, 13 y 14)

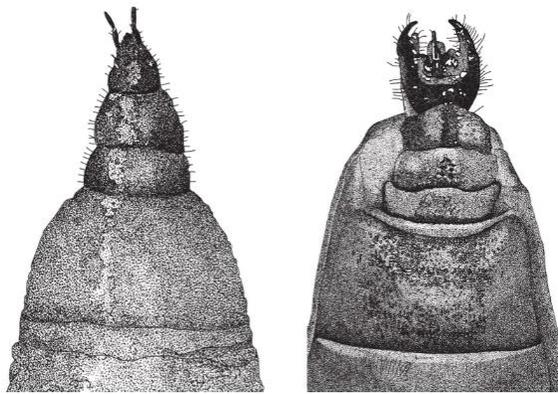


Figura 12. Genitales femeninos (izquierda) y masculinos (derecha) de la MSN, por Devic & Fahmi, 2013 (https://www.researchgate.net/figure/3-BSF-Female-genitalia-left-and-BSF-male-genitalia-right_fig1_315681950)



Figura 13. Moscas adulto macho (a y c) y hembra (b y d).



Figura 14. Proceso de sexado.

Etapa 3

Tamaño de muestra

El tamaño de muestra estadísticamente representativo se realizará mediante el uso de la siguiente formula: (Ott and Longnecker, 2008):

$$n = \frac{(Z_{\alpha/2})^2 \sigma^2}{E^2}$$

Donde n es el tamaño de muestra requerido, $Z_{\alpha/2}$ es el valor z correspondiente al nivel de confianza $100(1-\alpha)$, σ^2 es la varianza poblacional del peso vivo de las larvas en mg, y E es el margen de error. La obtención de la varianza poblacional será realizada con una población de 110 larvas alimentadas con una dieta control Gainesville.

Diseño experimental

El experimento consistió en dos etapas, la primer etapa se realizó para determinar si la diferencia de edad tenía un efecto en la oviposición (Figura 15), mientras que la segunda etapa (Figura 16), utilizó los datos de la primer etapa para la elección de la edad de las moscas en los distintos tratamientos con diferentes intensidades de luz.

Primera etapa - Selección del grupo control

- Diseño completamente al azar: **dos** tratamientos y **un** control con 3 repeticiones.
- 100 unidades experimentales por repetición, 60 hembras y 40 machos.
- T_1 (Control): individuos de la misma edad
- T_2 : machos 48-24 horas mayores
- T_3 : hembras 48-24 horas mayores

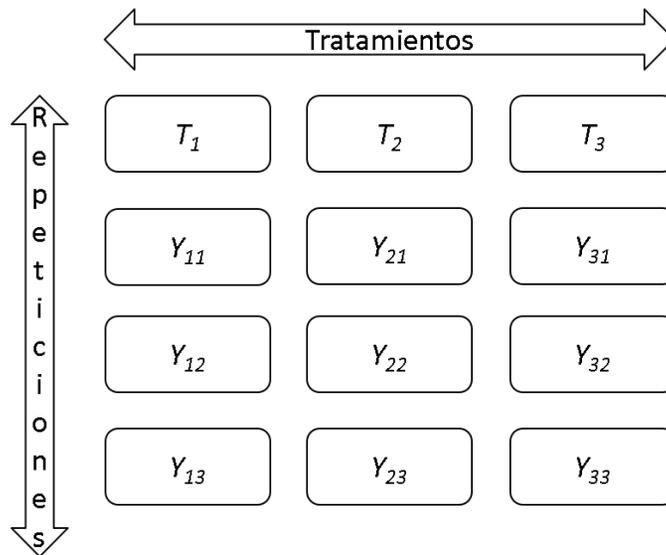


Figura 15. Distribución de los tratamientos etapa 1 en el diseño completamente al azar

Segunda etapa - Efecto de la intensidad luminosa

- Diseño completamente al azar: **tres** tratamientos y **dos** grupos control con 4 repeticiones.
- 100 unidades experimentales: 60 hembras y 40 machos.
- T_1 : Control positivo: luz blanca 3000K: Intensidad media
- T_2 : Intensidad alta
- T_3 : Intensidad media
- T_4 : Intensidad baja
- T_5 : Control negativo: oscuridad

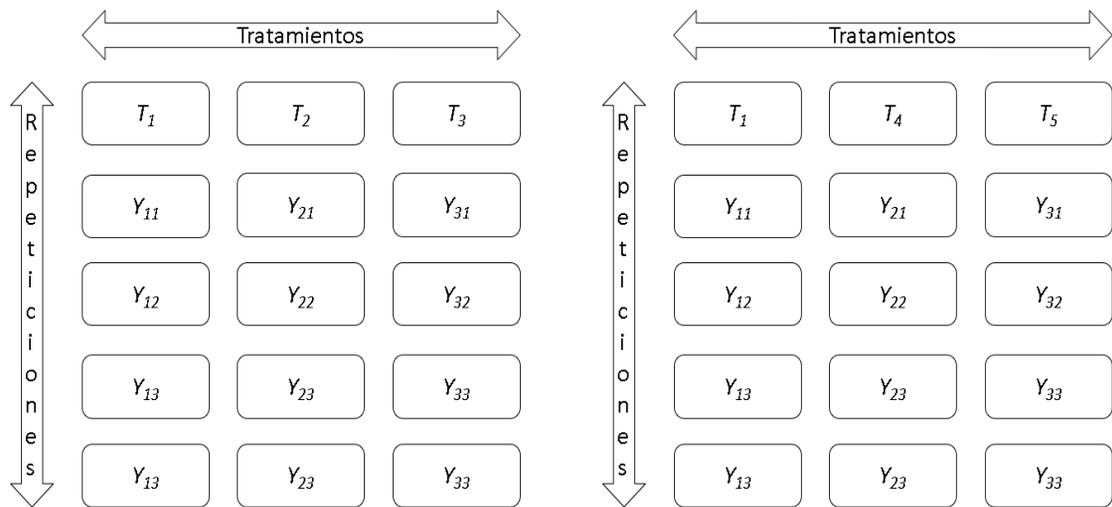


Figura 16. Distribución de los tratamientos de etapa 2 en el diseño de bloques al azar

Acondicionamiento de jaula de vuelo

Se utilizaron tablas de pino de 2 cm x 2.5 cm x 10 cm, con 1 mm de separación entre ellas, siendo retenidas con ligas. Las tablas fueron colocadas sobre un recipiente con tapa perforada y cubierta con nylon que contuvo un atrayente elaborado con dieta tipo Gainesville con 5 días en descomposición (Fig. 17).

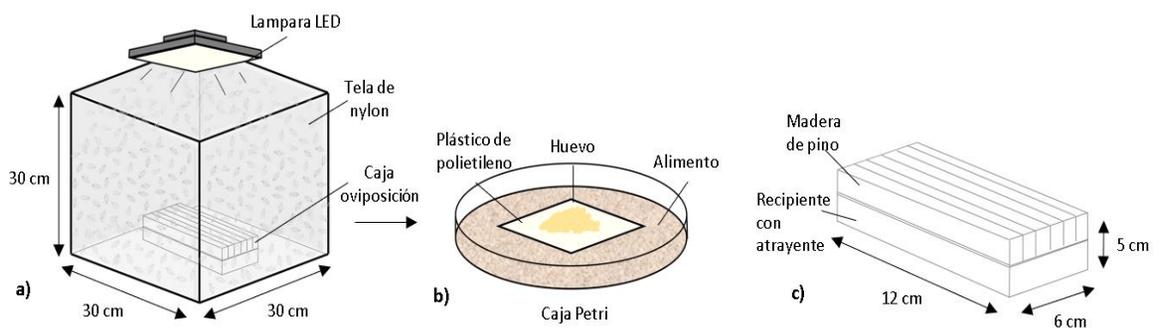


Figura 17. a) Diseño de jaula de vuelo, b) Esquema visual del procesamiento del huevecillo y c) Diseño del sistema de oviposición.

Manipulación de jaula de vuelo

Previo a la manipulación de la jaula de vuelo para la valoración del efecto de la luz en la MSN adulto, las jaulas fueron inspeccionadas todos los días a las 18:00 horas, posterior a que las lámparas habían cesado su funcionamiento por la acción del temporizador. En ese momento se realizó una inspección con luz roja (Fig. 18) en toda la jaula para localizar huevecillo colocado fuera del sistema de oviposición, así como la separación de los adultos muertos.



Figura 18. Inspección de la jaula de vuelo con luz roja.

Valoración del efecto de la edad de MSN en la postura

Para las valoraciones del efecto de la edad de la MSN en la postura se revisaron las variables de oviposición, fecundidad, fertilidad, tasa de eclosión y mortalidad.

Oviposición

Se realizó una colecta diaria de huevecillos por jaula. Se pesó la postura total y se calculó el peso promedio por huevecillo en una balanza analítica con una n=20. Se realizó una curva de postura por día promedio por hembra (Nakamura *et al.* 2016).

$$Tasa\ de\ oviposición = \frac{Huevos\ ovipositados}{Periodo\ de\ oviposición}$$

Se calculó el periodo de pre-oviposición, como el tiempo comprendido entre la emergencia y la primera oviposición. El periodo de oviposición fue considerado como los días entre la primer y última oviposición. El pico de oviposición fue considerado como el periodo que albergue el 50% de la producción de huevo (Hoc et al., 2019).

Fecundidad

La fecundidad fue considerada como los huevos puestos por hembra en toda su vida. Esta fue calculada dividiendo los huevos ovipositados entre el total de hembras (Chia et al., 2018).

$$Fecundidad = \frac{Número\ de\ huevos}{Número\ de\ hembras}$$

Fertilidad y tasa de eclosión

Se cuantificaron 50 huevos diariamente por cada jaula y se colocaron en un plástico de polietileno con un tamaño de 3 x 3 cm sobre una caja de Petri con 10 gramos de dieta Gainesville. Posteriormente fueron incubados a una temperatura de 30 °C a una humedad relativa de 60%. 5 días después del comienzo de la incubación se contaron los huevos sin eclosionar y se calculó el porcentaje de eclosión (Fig. 4) (Hoc et al., 2019).

$$Tasa\ de\ eclosión = \frac{Huevos\ eclosionados}{Huevos\ incubados}$$

La fertilidad fue considerada como los huevos viables por hembra, esto fue calculado mediante la tasa de eclosión, y la fecundidad (Liu et al., 2020).

$$Fertilidad = Fecundidad \times Tasa\ de\ eclosión$$

Mortalidad

La mortalidad fue determinada diariamente mediante la cuantificación de los MSN adulto muerta a lo largo del experimento por día (Macavei et al., 2020).

$$Mortalidad = \frac{Individuos\ muertos}{Individuos\ totales}$$

Valoración del efecto de la intensidad de luz en la postura de MSN

Para la valoración del efecto de la intensidad de luz en la postura de MSN se midió la oviposición, fecundidad, fertilidad, tasa de eclosión y mortalidad del mismo modo que se hizo en la Valoración del efecto de la edad de MSN en la postura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pruebas de funcionamiento de la lámpara

Intensidad luminosa de lámpara blanca 3000K

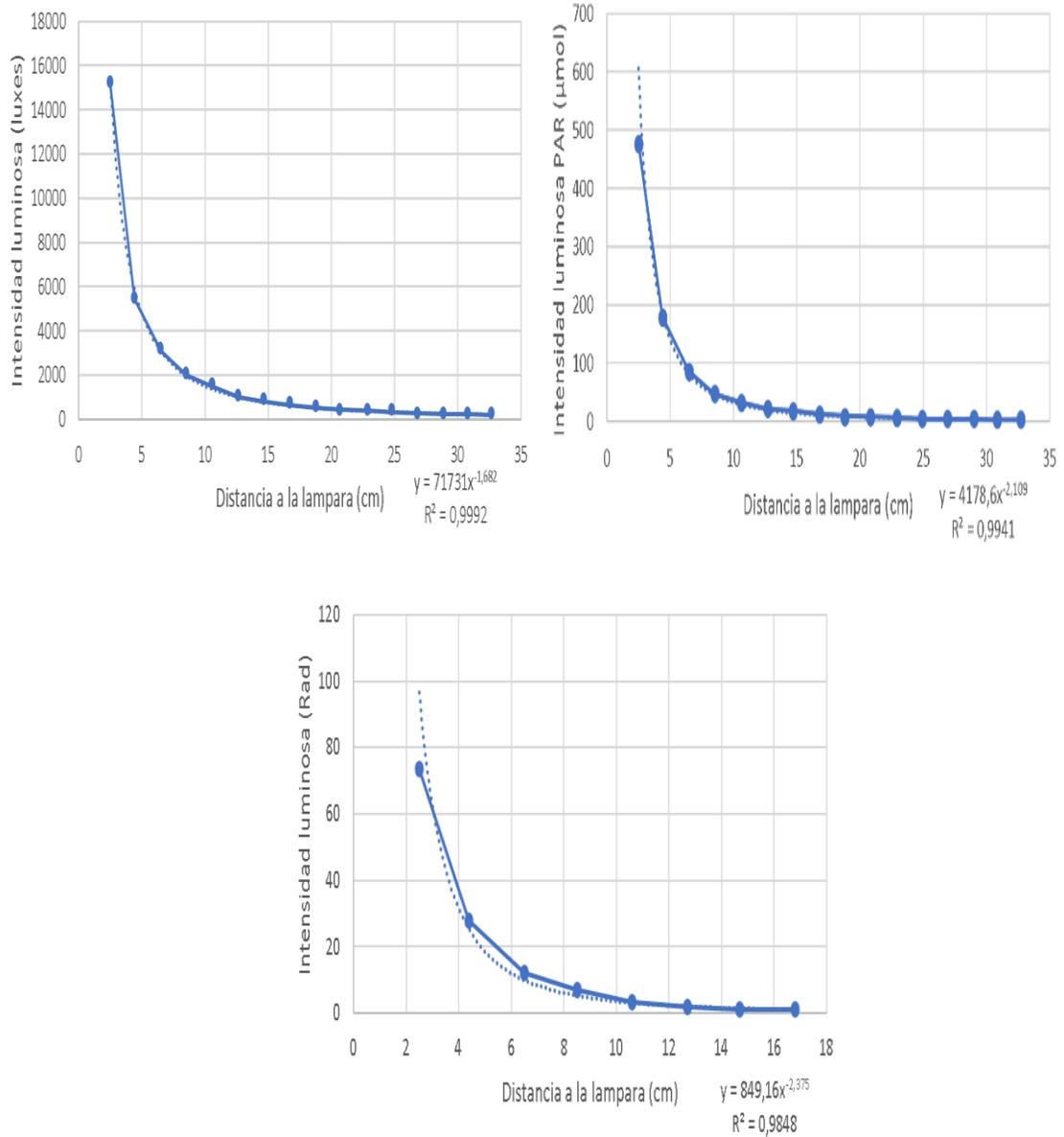


Figura 19. Regresión potencial de los puntos de la Intensidad luminosa de las lámparas blancas (2.71V) con la distancia vertical de la lámpara, R^2 : Coeficiente de determinación, y = modelo matemático de la regresión potencial.

Intensidad luminosa de lámpara azul:verde:UV de intensidad baja

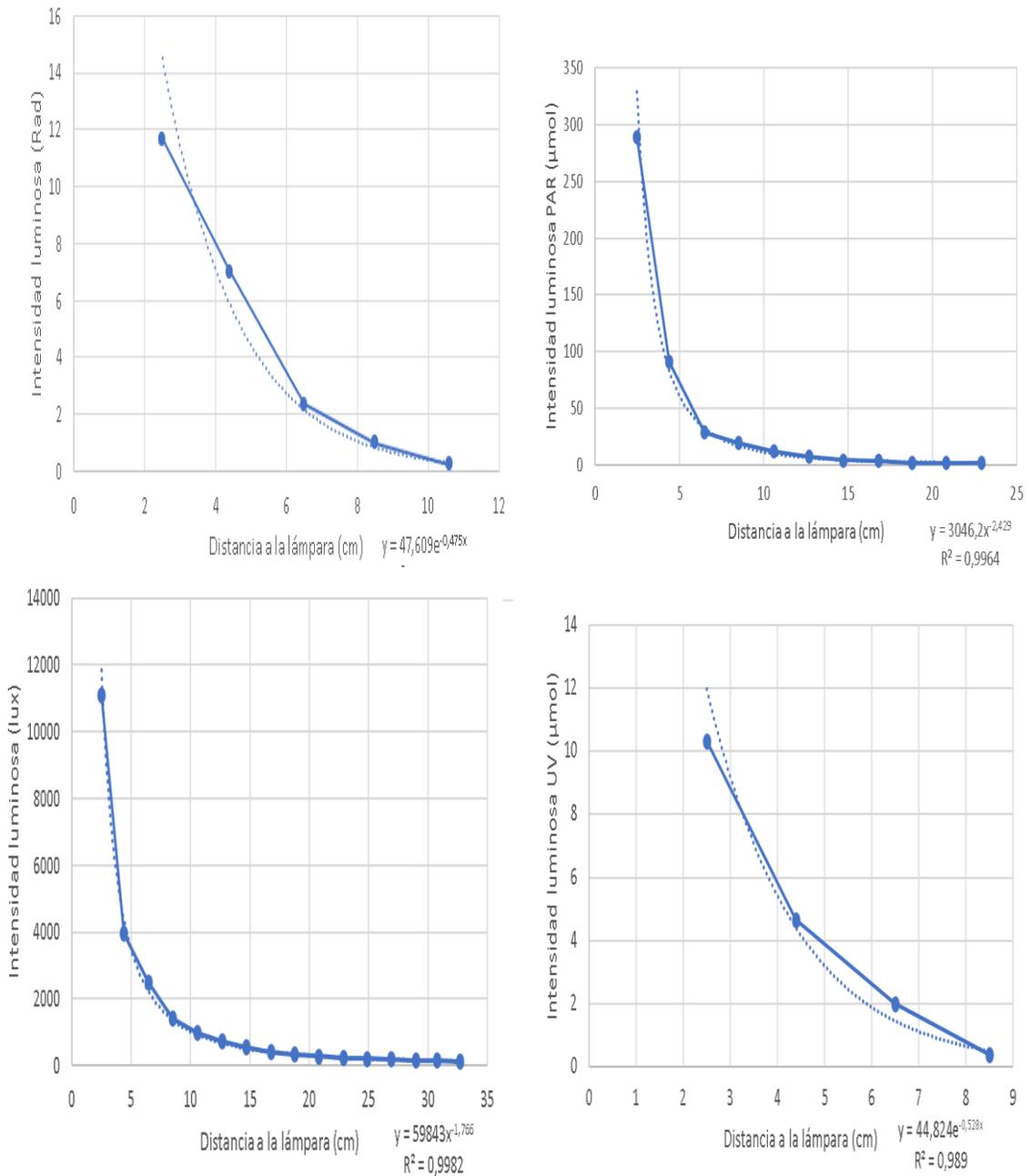


Figura 20. Regresión potencial de los puntos de la Intensidad luminosa de las lámparas con dos LEDs verde, dos LEDs azul(2.6V) y un LED UV (6V) con la distancia vertical de la lámpara, R²: Coeficiente de determinación, y= modelo matemático de la regresión potencial.

Intensidad luminosa de lámpara azul:verde:UV de intensidad media

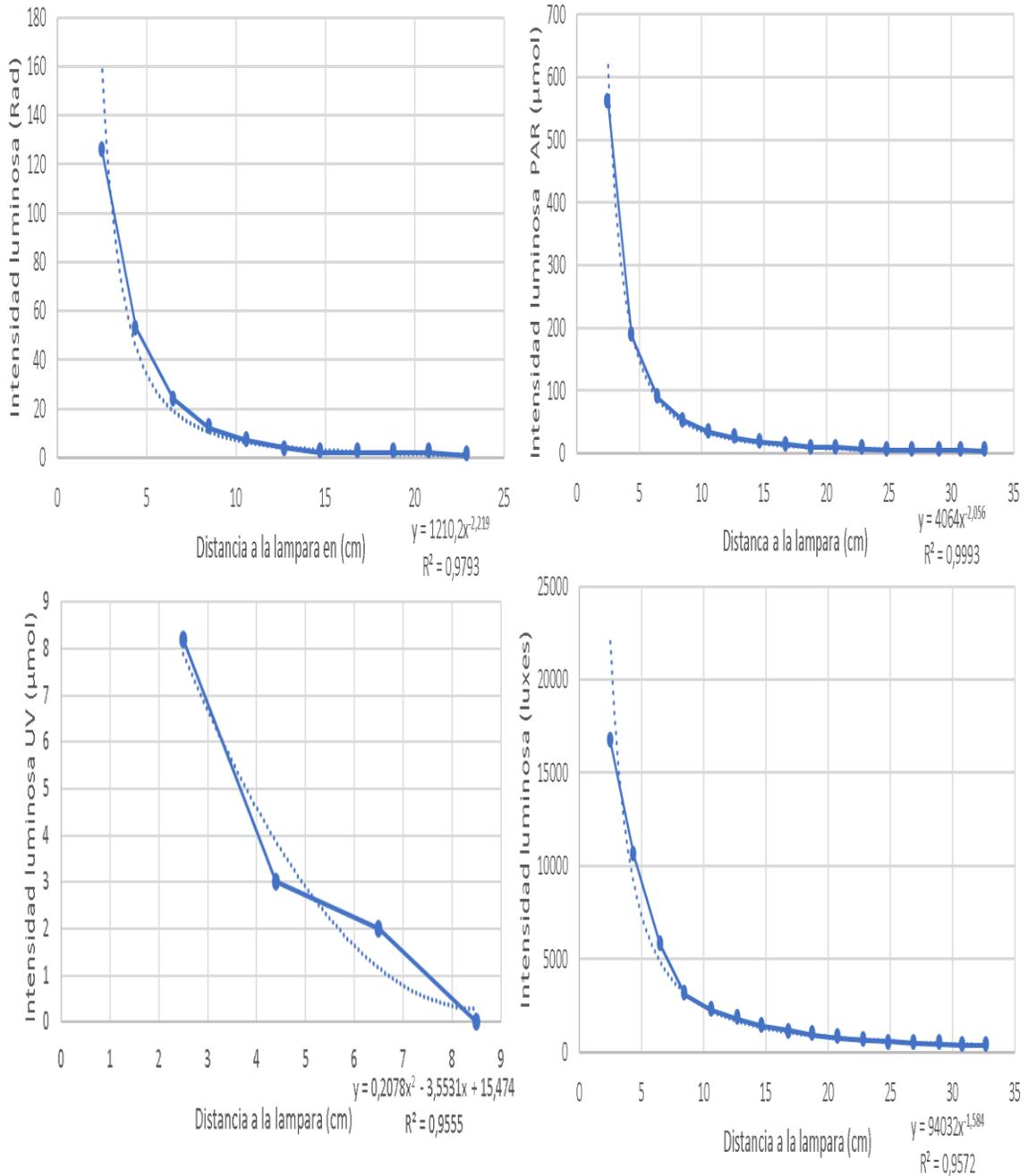


Figura 21. Regresión potencial de los puntos de la Intensidad luminosa de las lámparas con dos LEDs verde, dos LEDs azul(2.81V) y un LED UV (3.2V) con la distancia vertical de la lámpara, R²: Coeficiente de determinación, y= modelo matemático de la regresión potencial.

Intensidad luminosa de lámpara azul:verde:UV de intensidad alta

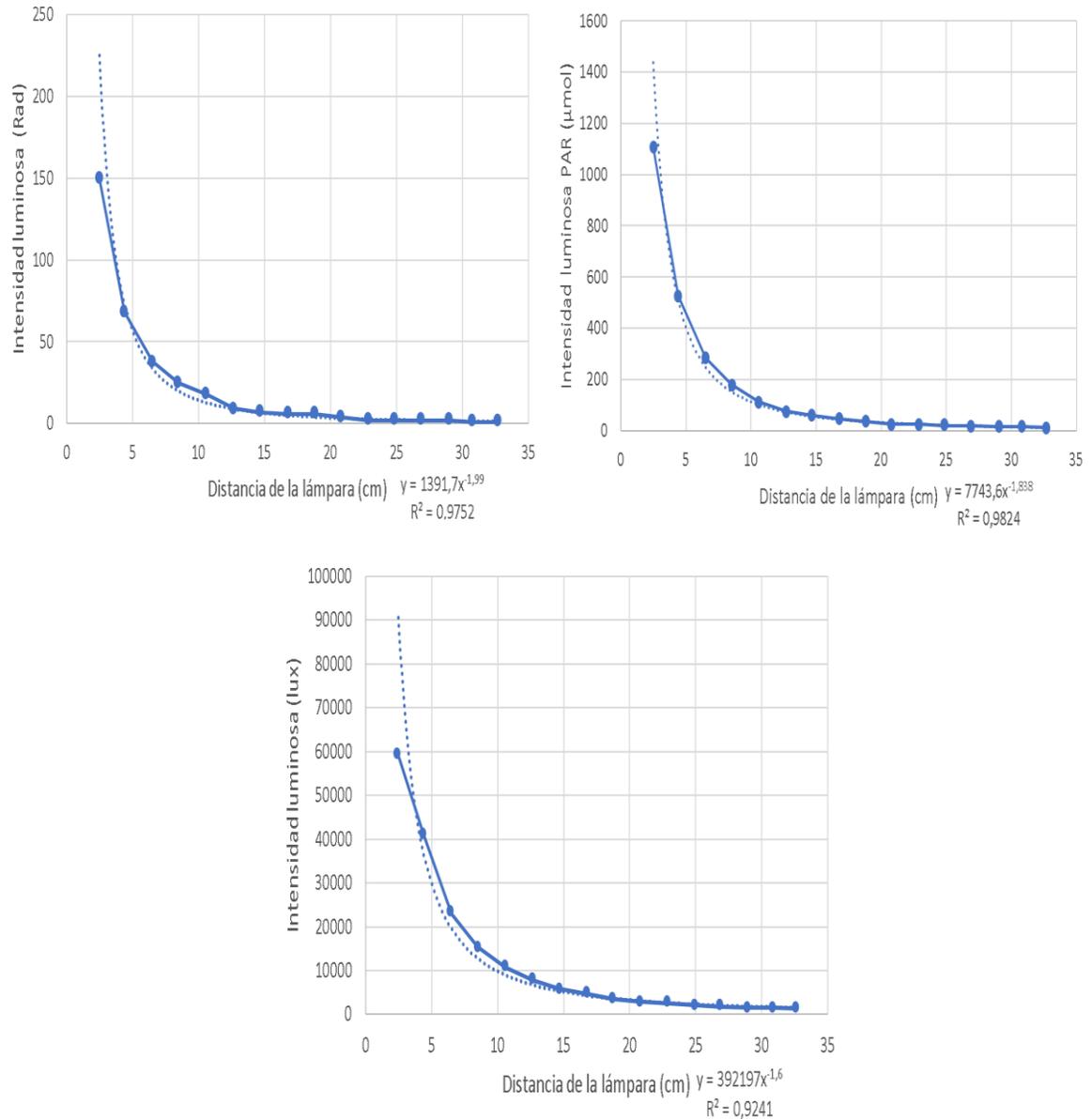


Figura 22. Regresión potencial de los puntos de la Intensidad luminosa de las lámparas con cuatro LEDs verdes, 4 LEDs azul (2.79V) y 2 LEDs UV (3.2V) con la distancia vertical de la lampara, R²: Coeficiente de determinación, y= modelo matemático de la regresión potencial.

Las figuras 19-22 muestran los resultados de las pruebas de intensidad luminosa de las lámparas de baja, media y alta intensidad con luz LED azul, verde, UV-A, así como la lámpara blanca con intensidad media utilizada como tratamiento control. La figura 23 muestra los resultados de la intensidad luminosa en los cuatro tipos de lámparas a manera de comparación basándose en el sensor de luz PAR (400-700 nm).

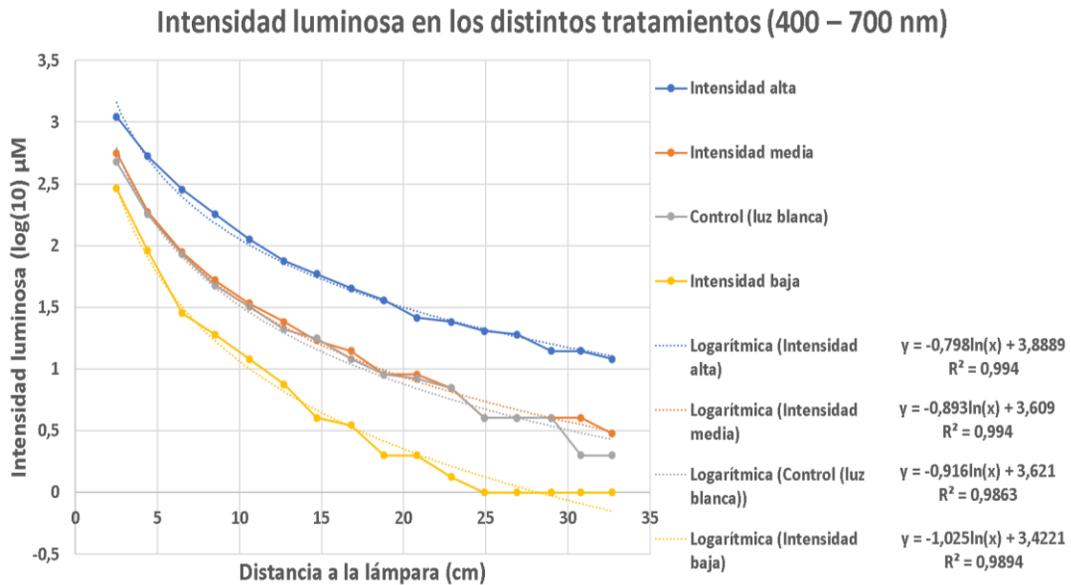


Figura 23. Regresión logarítmica de los puntos de la Intensidad luminosa de las lámparas con la distancia vertical de la lámpara, R²: Coeficiente de determinación, y= modelo matemático de la regresión potencial.

Tamaño de muestra

Los valores seleccionados para la ecuación X fueron los siguientes:

$$Z_{\alpha/2} = 1.96 \text{ es decir, } y E = .006$$

Mientras que el valor de la varianza obtenido de una población de 210 larvas fue:

$$\sigma^2 = .00094 \text{ con peso promedio de } 0,1309, \text{ por lo tanto:}$$

$$n = \frac{(1,96)^2 0,0094}{0,006^2} = 100,3$$

Para fines prácticos del experimento se utilizó el valor n de 100.

Alimento

La tabla 2 se muestra los resultados del Análisis Químico Proximal de la dieta tipo Gainesville utilizada en la alimentación de la larva.

Tabla 2. Análisis Químico Proximal de la Dieta tipo Gainesville

Analito	Base seca	Base húmeda	Método
%Materia seca	100	92.53	A.O.A.C. Official Method 934.01 (2002), 16th Edition
%Humedad	0	7.47	
%Proteína cruda	13.42	12.42	A.O.A.C. Official Method 976.05 (2002), 16th Edition
%Extracto etéreo	3.97	3.67	A.O.A.C. Official Method 920.35 (2002), 16th Edition
%Fibra detergente neutro	42.99	39.78	Van Soest (1991)
%Cenizas	9.90	9.16	A.O.A.C. Official Method 923.03 (2002), 16th Edition
%Elementos libre de nitrógeno	29.70	-	

La aproximación nutrimental se realizó con base a los resultados obtenidos en el análisis químico proximal de la base húmeda, llevada a una humedad del 70% (Tabla 3).

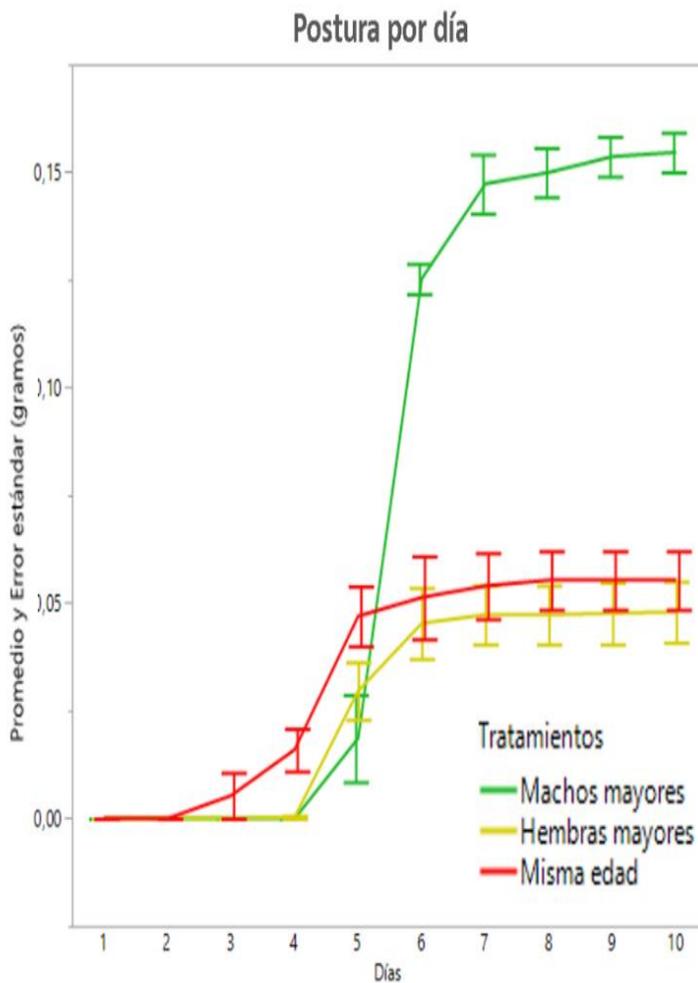
Tabla 3. Aproximación nutricional al 70% de humedad

Analito	Porcentaje
%Materia seca	30
%Humedad	70
%Proteína cruda	4.02
%Extracto etéreo	1.19
%Fibra detergente neutro	12.89
%Cenizas	2,96
%Elementos libre de nitrógeno	8.9

Etapas 1 - Efecto de la edad de MSN en la postura

Oviposición

La figura 24 muestra las mediciones realizadas diariamente desde la eclosión de las primeras moscas hasta la muerte de todas. Los datos presentados son el promedio de cantidad de huevo ovipositado medido en gramos por cada tratamiento, con su debido error estándar. La modificación de la sincronización en la edad de las moscas adulto generó una producción de huevo $179 \pm 14\%$ mayor en el tratamiento con machos 24-48 horas mayores en comparación al grupo control de moscas de la misma edad, mientras que el tratamiento con hembras 24-48 horas mayores no mostró diferencia significativa al grupo control. Los picos de oviposición fueron al día 6 para el tratamiento con machos mayores con una oviposición del 69%, y día 5 para los tratamientos de hembras mayores con 61% de oviposición, y 56% en tratamiento control. El retraso de la oviposición en un día se puede deber al retraso del ingreso de las hembras en 24-48 horas.



Prueba de Kruskal-Wallis

H (chi2): 12,54

Hc (empate corregido): 12,54

p (igual): 0,001786

Existe diferencia significativa entre las medianas de la muestra.

Prueba de Dunn para comparaciones múltiples

	Machos mayores	Hembras Mayores	Misma edad
Machos mayores	1	0,0005072	0,01683
Hembras Mayores	0,0005072	1	0,4561
Misma edad	0,01683	0,2772	1

Figura 24. Postura acumulada, con error estándar. Tratamientos diferente edad por sexo. Prueba de Kruskal-Wallis realizado con software PAST 4.0.

La tabla 4 muestra los datos obtenidos de variables relacionadas a la postura considerando un peso de huevo de 0.0000291 g según Dortmans *et al.*, 2021. Los datos de la tabla x muestran diferencia relacionada con la postura total vista en la figura x. Sin embargo, la tasa de eclosión no fue diferente entre tratamientos. El peso de prepupas obtenido para esta etapa fue de 0,146 ± 0,0214 g (Desviación estándar).

Tabla 4. Parámetros de la postura de MSN en lámpara blanca.

	Hembras mayores	Machos mayores	Misma edad
Fecundidad (huevos por hembra)	39,4 ± 3,77	127,16 ± 12,15	45,46 ± 4,33
Tasa de eclosión (%)	54 ± 5,19	62 ± 5,77	61 ± 4,61
Fertilidad (huevos viables por hembra)	21,276 ± 3,27	78,83 ± 12,355	27,73 ± 3,93
Postura total (g)	0,048 ± ,0057	0,15466 ± ,00378	0,0553 ± 0,00558413
No. de huevos	1973 ± 189	6358 ± 611,4	2273 ± 218,2

± Error estándar de la muestra

Mortalidad

La figura 25 muestra la mortalidad presente en cada tratamiento por sexo, donde se considera la edad de 24-48 horas mayores para ambos sexos, lo cual genera un desfase en las gráficas de dos días, según el tratamiento. Se puede notar una relación entre una mayor mortalidad inicial en machos mayores con una mayor postura de huevo, pudiendo deberse al efecto de competencia (lekking behavior), en el cual los machos compiten por espacio, pudiendo dañar a las hembras en el proceso (Tomberlin y Sheppard, 2001). En todos los casos, los machos fueron los más afectados por la diferencia de la edad, mientras que la diferencia en las hembras del tratamiento de machos mayores se debe a la diferencia de edad en el tratamiento.

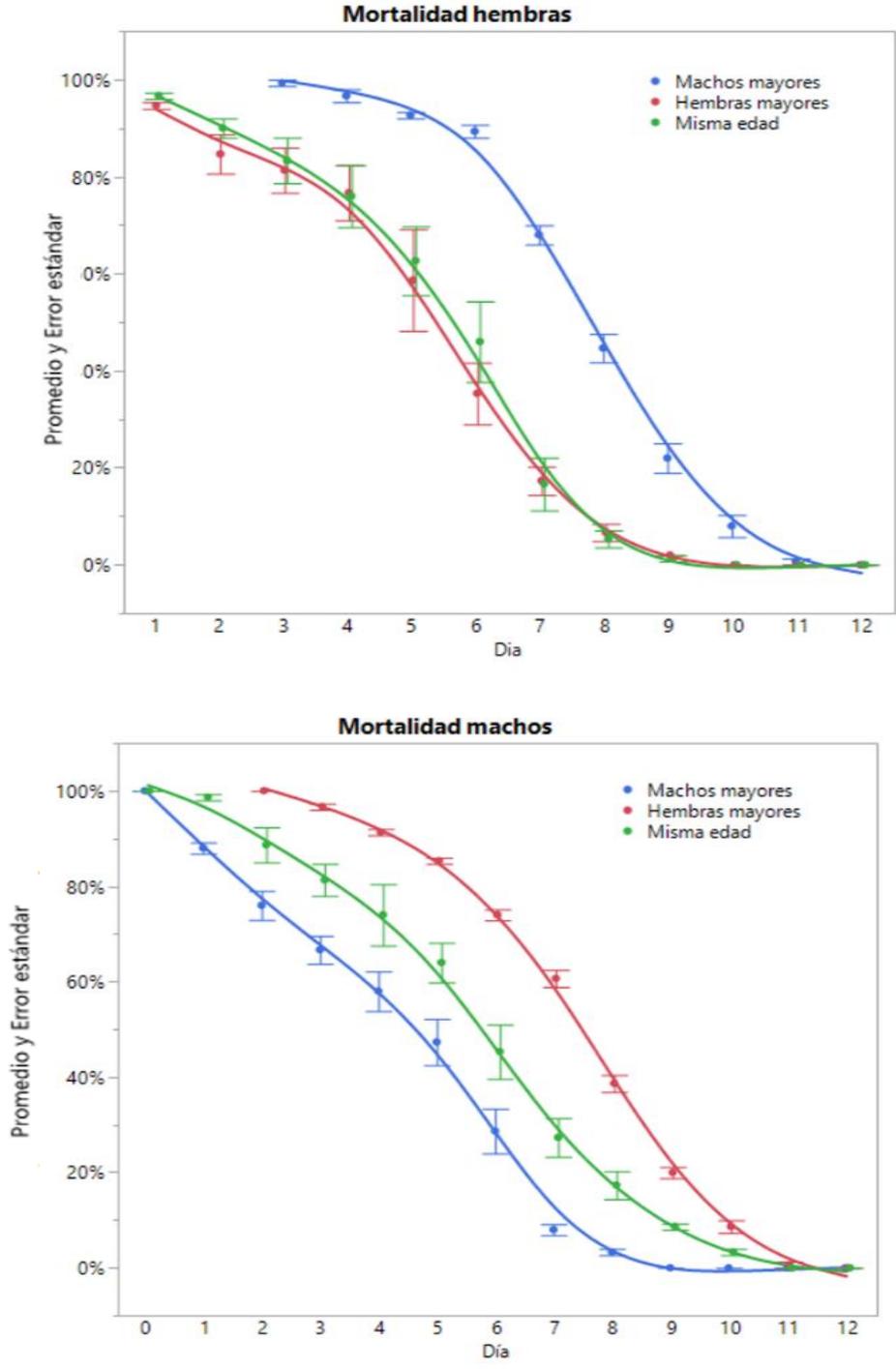


Figura 25. Mortalidad acumulada en tratamiento con diferentes edades, gráficos realizados con el software JMP.

Esperanza de vida

La figura 26 muestra la esperanza de vida en los distintos tratamientos, a diferencia de la mortalidad, en esta gráfica se muestran los datos desde el día uno de vida para todos los sexos. Es importante destacar que existe una mortalidad inicial mayor para el tratamiento de machos mayores durante los primeros dos días, cuando las hembras aún no han sido ingresadas. A manera de comentario, se observó actividad hostil en el periodo donde solo había machos, muy similar a la copula. Durante este comportamiento se observó enfrentamiento físico, así como aleteo exacerbado por parte de macho agresor, al cual termina ahuyentando al macho rival (Figura 27).

Tomberlin *et al.*, (2009), describieron que el tiempo de desarrollo en diferentes etapas puede cambiar según las condiciones climáticas, donde la longevidad de adultos machos varía entre 17.4 y 15.9 días y hembras entre 14 y 12.4, en condiciones de 27 y 30 C, respectivamente. Mostrando que los machos tienden a vivir más en promedio que las hembras.

Se ha reportado que la longevidad puede incrementar cuando no hay presencia de apareamiento (Nakumara *et al.*, 2016)

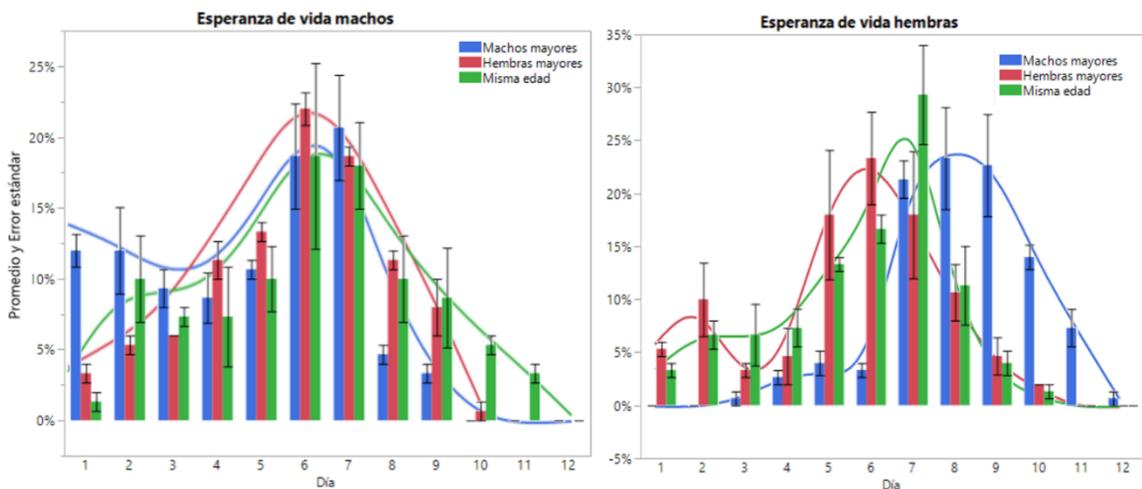


Figura 26. Esperanza de vida en tratamiento con diferentes edades, gráficos realizados con el software JMP.



Figura 27. Comportamiento de competencia entre machos.

Etapa 2 - Efecto de la intensidad de luz en la postura de MSN

Oviposición

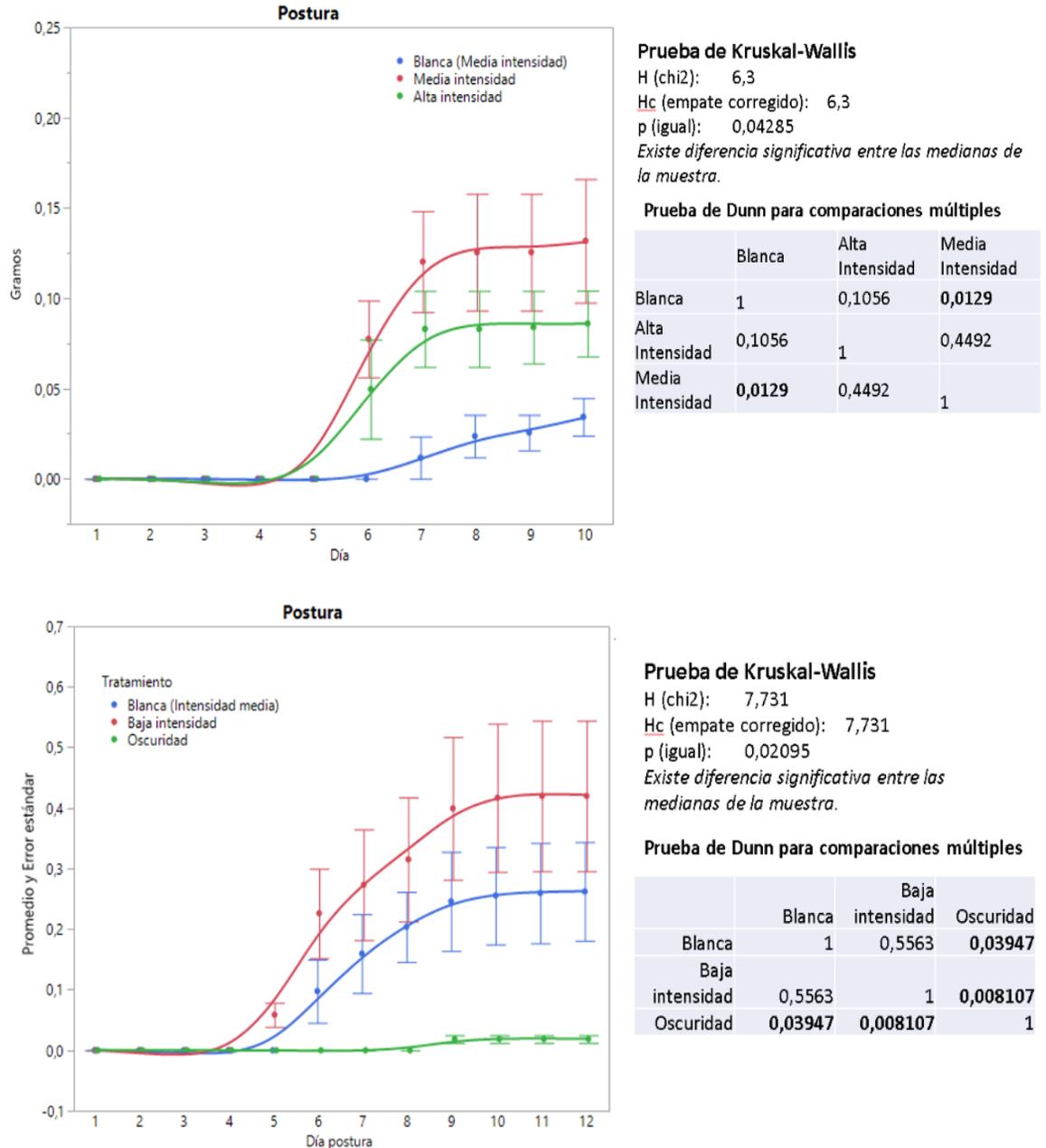


Figura 28. Postura acumulada, con error estándar. Tratamientos diferente intensidad de luz. Prueba de Kruskal-Wallis realizado con software PAST 4.0.

En todos los casos, con lámpara de color, la postura inicio un día antes. El día de máxima postura también fue diferente entre los tratamientos, siendo el día 7 para

tratamientos con lámpara de color y el día 8 para lámpara blanca. A pesar de no haber diferencia entre el tratamiento de lámpara blanca y de baja intensidad de lámpara de color, en todos los casos hay una tendencia en la mejora de las condiciones de postura para lámparas de color. Los resultados sugieren que la intensidad media de lámpara de color puede ser suficiente para estimular la producción máxima de huevo, llegando a producir hasta 1.8 veces más que el tratamiento control.

A pesar de no haber estímulo de luz, en jaulas en oscuridad hubo postura, la cual fue colocada directamente en la tela de la jaula, representando el 7% en comparación al tratamiento control. Esto hace pensar que no todas las hembras ponen huevo en condiciones de oscuridad. Barrett *et al.*, (2023) mencionaron la postura de huevos sin apareamiento en hembras de MSN (Figura 28).

Fecundidad, fertilidad y tasa de eclosión

En esta etapa se muestran los resultados obtenidos en la etapa dos, donde se hace la comparación de la intensidad de luz en lámparas de color. La principal diferencia previa en la realización de estos tratamientos fue el peso obtenido en la etapa de pupa (día 26) y el periodo de ejecución del experimento. Dichos experimentos tuvieron que hacerse en dos partes debido a la cantidad de jaulas y lámparas disponibles. El peso de pupa obtenido en la parte 1 (tabla 5) fue de $0,13085 \text{ g} \pm 0,03135$ (Desviación estándar) $n=212$, mientras que el peso obtenido en la parte (tabla 6), fue de $0,1585 \text{ g} \pm 0,0228$, $n=101$. La experimentación de la etapa 1 (Tabla 6) fue realizada aproximadamente 60 días después de la experimentación de la etapa 2 (Tabla 5).

Tabla 5. Parámetros de la postura de MSN en lámparas de color, parte 1.

	Alta intensidad	Media intensidad	Blanca (media intensidad)
Fecundidad (huevos por hembra)	49,25 ± 10,45	75,45 ± 26,44	19,66 ± 5,95
Tasa de eclosión (%)	57 ± 4,6	57 ± 5,7	56 ± 5,1
Fertilidad (huevos viables por hembra)	28 ± 6,98	43 ± 16,97	11 ± 3,7
Postura total (g)	0,086 ± 0,01824	0,1317 ± 0,0394	0,0343 ± 0,01
No. de huevos	2955,3 ± 627	4527,49 ± 1358	1179 ± 356

± Error estándar de la muestra

La diferencia de la postura total coincide con los resultados de Georgescu *et al.*, 2020, donde se menciona que la postura de una hembra está relacionada con el peso de progenitor adulto, sin embargo, existe una continua pérdida de peso durante todo el estadio pupal que tiene un rol en la postura de las hembras adultos.

Tabla 6. Parámetros de la postura de MSN en lámparas de color, parte 2.

	Oscuridad	Baja intensidad	Blanca (media intensidad)
Fecundidad (huevos por hembra)	10,7 ± 3,55	241,3793103 ± 71,3	150,7183908 ± 41,625
Tasa de eclosión (%)	0	53 ± 4,5	52 ± 4,5
Fertilidad (huevos viables por hembra)	0	127,9 ± 42	78 ± 26,5
Postura total (g)	0,01875 ± 0,006	0,42 ± 0,1245	0,26225 ± 0,0814
No. de huevos	646,551 ± 215	14482,75862 ± 4279	9043,103448 ± 2797

± Error estándar de la muestra

Barrett *et al.*, (2023) ha mencionado posturas de hasta 600 – 700 huevos en una puesta, con hasta 70% de fertilidad. Es importante mencionar, que el conteo de puesta es difícil de realizar, ya que las hembras suelen encimar sus posturas con otras. Por otra parte, no todas las hembras tienen éxito en el apareamiento, esto puede generar posturas menores, posturas infértiles y menor rendimiento en promedio por jaula.

Mortalidad

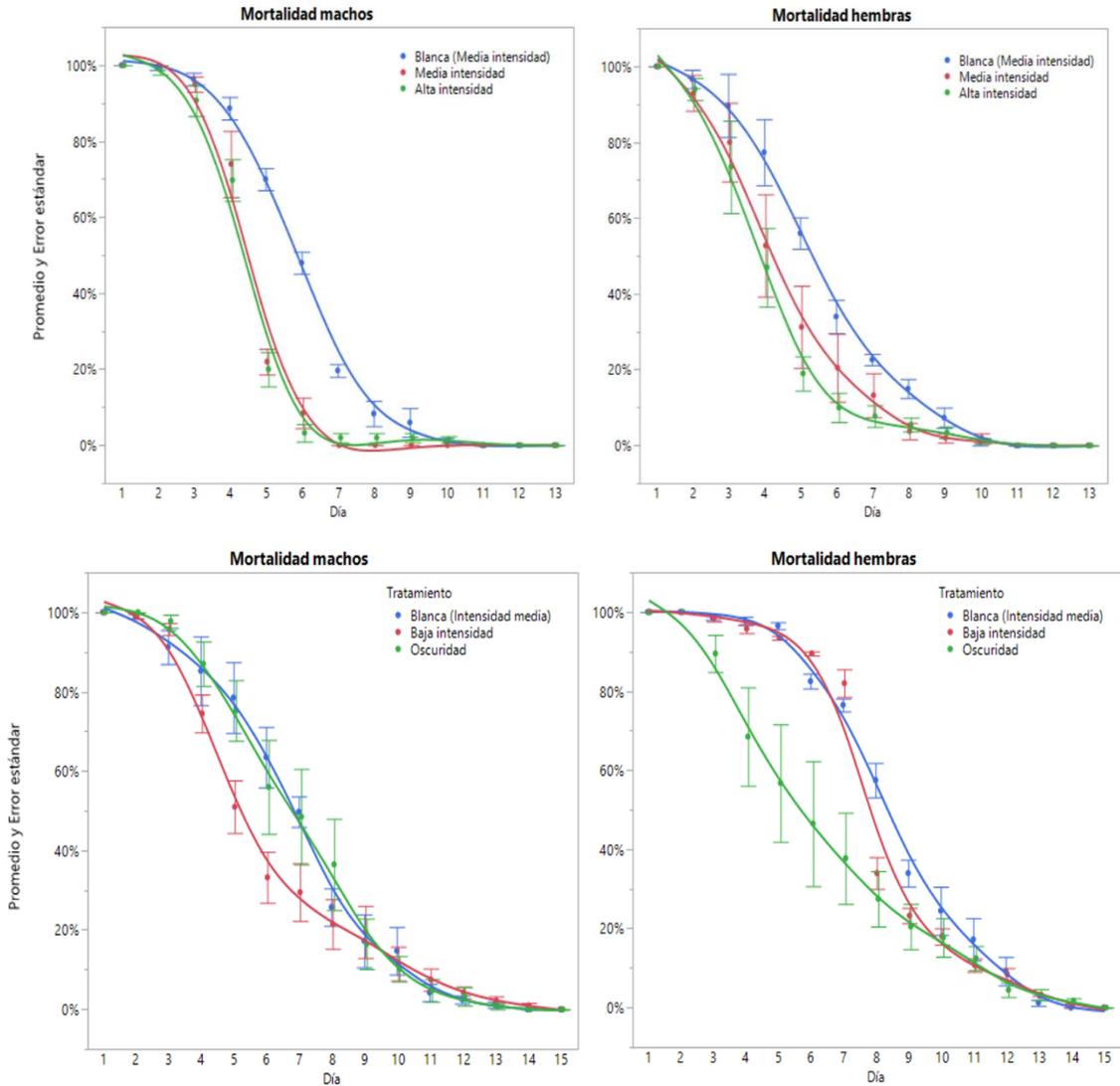
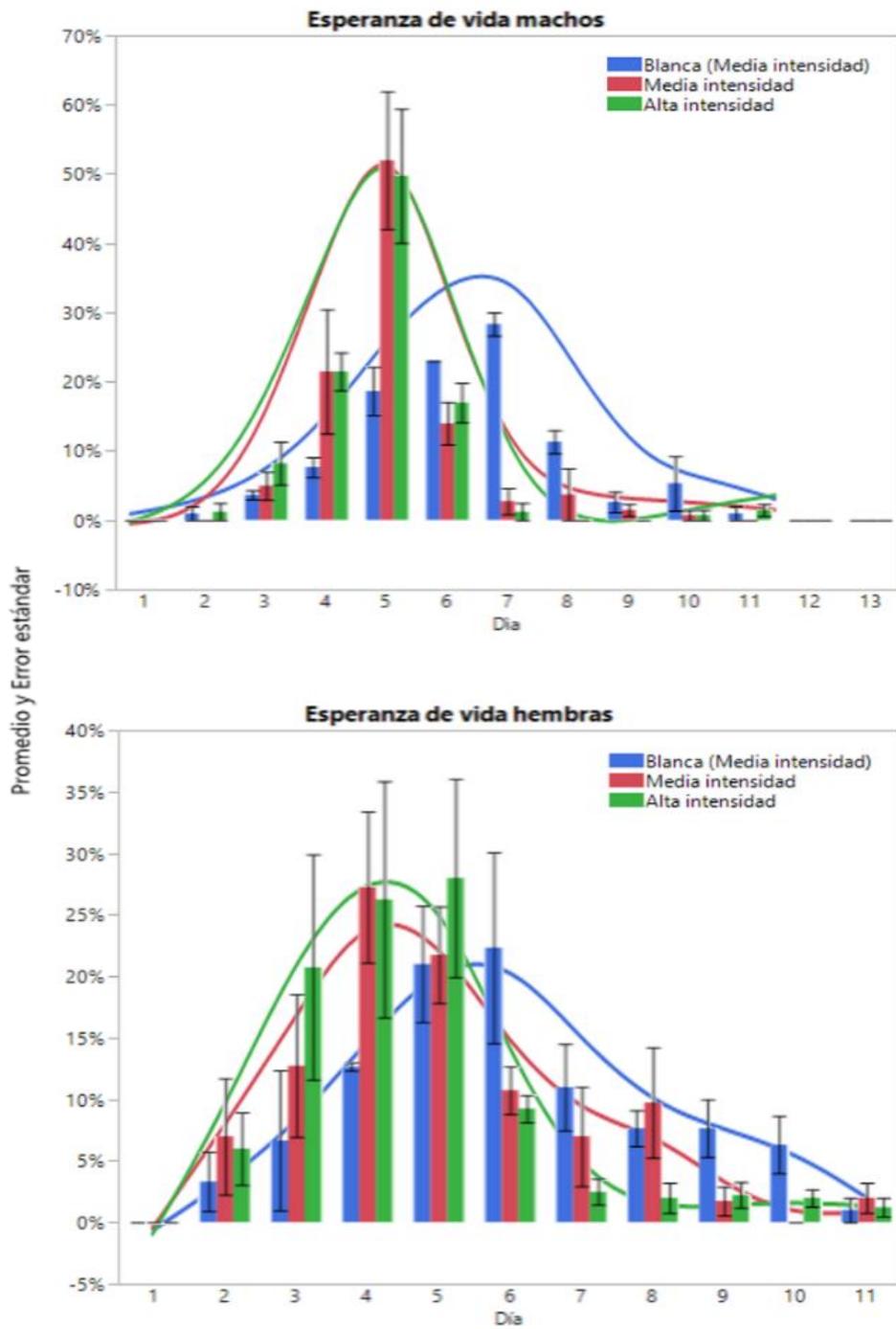


Figura 29. Mortalidad acumulada en tratamiento con diferente intensidad de luz, gráficos realizados con el software JMP.

La mortalidad de los machos tiende a ser más pronunciada en machos en comparación a hembras (**Tabla30**). Estudios han descrito que la mortalidad puede variar en diferentes condiciones, como las condiciones ambientales, la dieta, el peso, entre otros (Nakamura *et al.*, 2016). En los resultados presentados,

observamos que el tipo de luz y la intensidad cambian los patrones de mortalidad.

Esperanza de vida



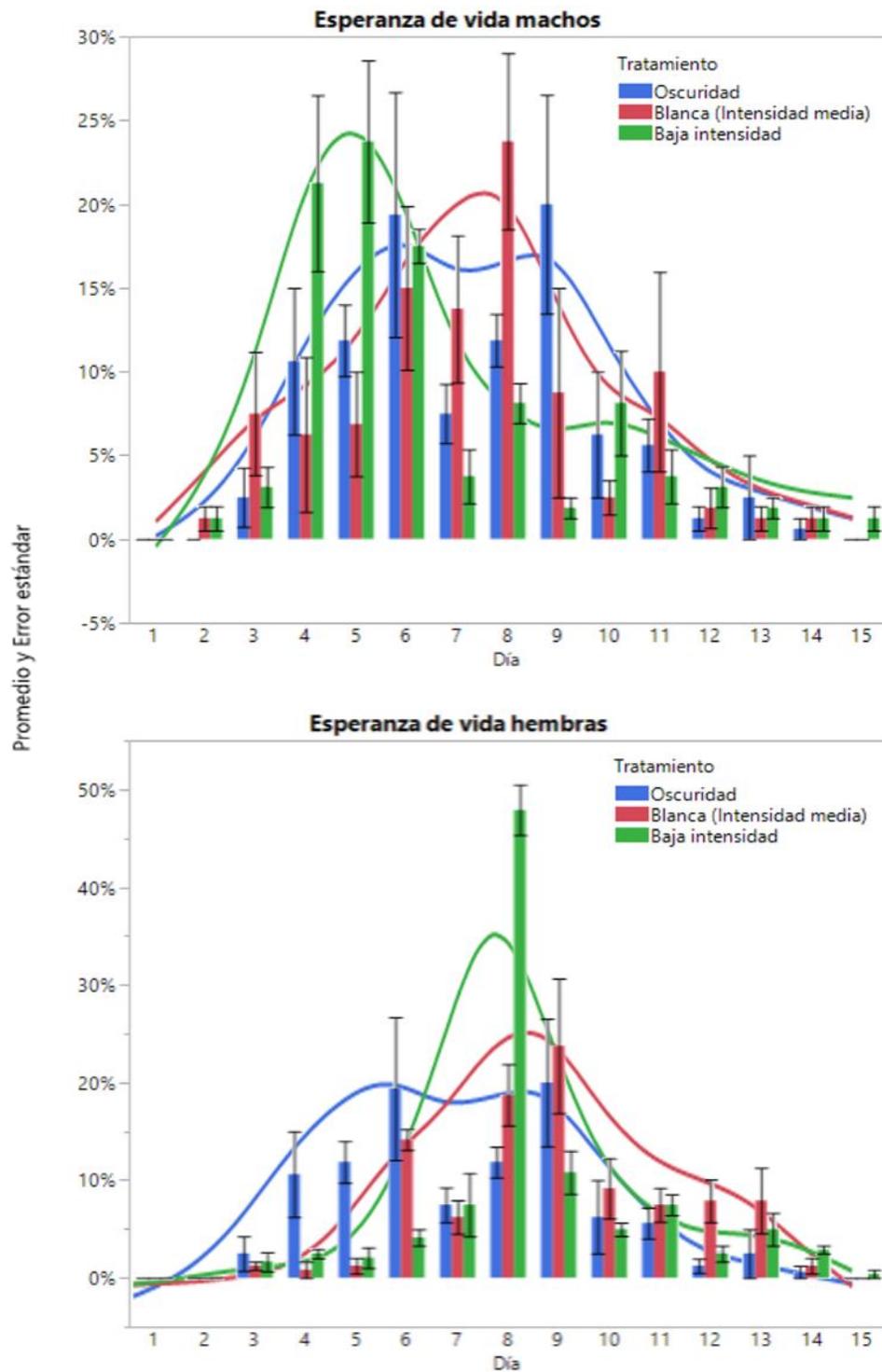


Figura 30. Esperanza de vida en tratamiento con diferente intensidad de luz, gráficos realizados con el software JMP.

Harjoko *et al.*, (2023) sugieren que la esperanza de vida de hembras de MSN puede verse incrementado tras apareamientos exitosos, donde la espermateca o eyaculación de los machos es donada tras la copula, funcionando como una fuente de nutrientes. Tomberlin *et al.*, (2009) sugiere que la esperanza de vida de la mosca adulto está relacionada con su peso, a mayor peso, mayor esperanza de vida, siendo la esperanza de vida un factor para el apareamiento exitoso.

Resumen de datos

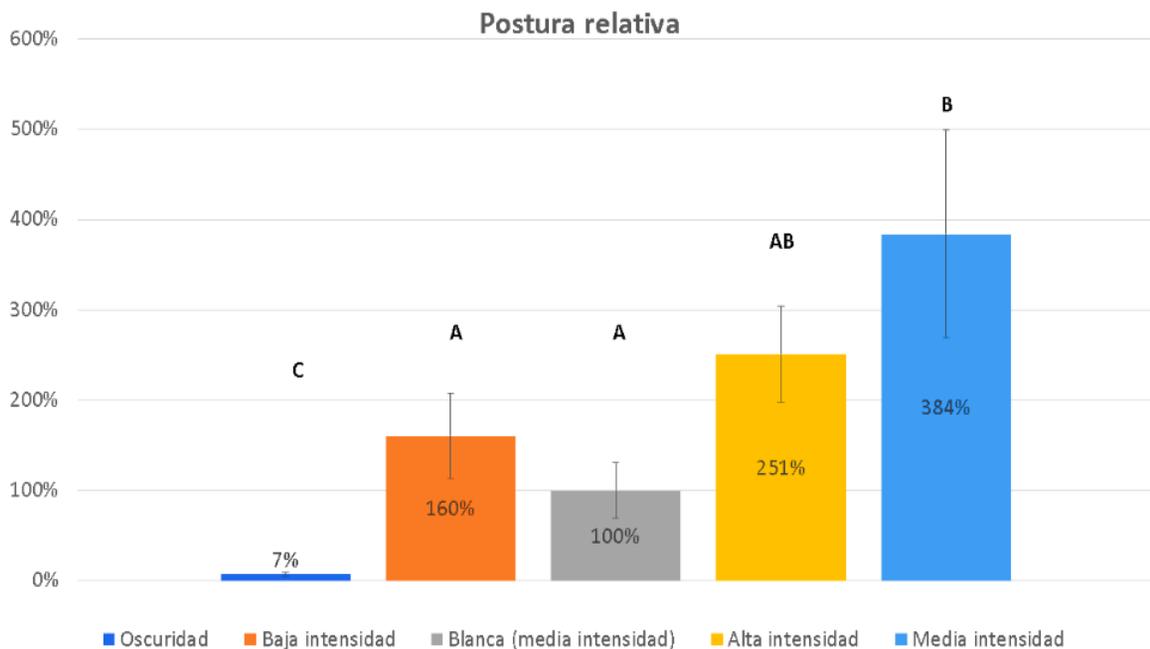


Figura 31. Postura relativa en distintas intensidades de luz

En esta etapa se realizó una estandarización de los datos asignando el valor de 1 (100%) al grupo control, y los demás datos se modificaron respecto a este grupo con su respectivo error estándar. De forma visual todos los tratamientos con lámparas de color tienden a presentar mejores resultados de postura que el tratamiento del grupo control con luz blanca. Sin embargo, solo el tratamiento de media intensidad es estadísticamente significativo al grupo control. El estadístico utilizado para la formación de los grupos fue Kruskal-Wallis y la prueba de Dunn (Figura 31).

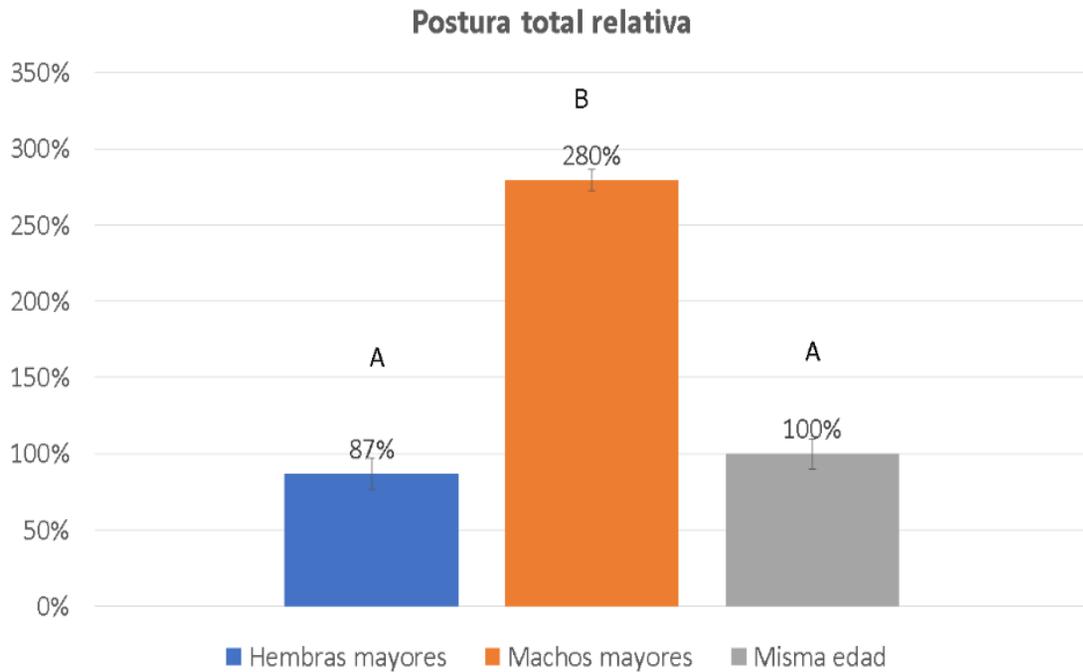


Figura 32. Postura relativa en distintas edades

Los patrones de postura cambian cuando se cambia la sincronización de la edad en mosca adulta. Esto puede derivar del efecto de competencia de los machos, conocido como *Lekking Behavior*, descrito por Tomberlin y Sheppard (2001) para mosca soldado negro, donde se caracteriza una necesidad de protección de un sitio principalmente entre machos, acompañado de comportamientos agresivos, previo al cortejo. Al desfazar la edad entre hembra y machos, siendo los machos los primeros en ingresar a la jaula, podría verse reducidos comportamientos agresivos de machos hacia hembras, provocando que haya mayor postura (Figura 32).

Conclusión

La intensidad de luz tiene un efecto en los patrones de mortalidad y de postura principalmente. Esto podría deberse al aumento en la competencia entre machos y el aumento del apareamiento con las hembras. El uso de lámparas con espectro específicos para MSN modifica los patrones de postura y puede provocar un aumento en la producción de huevo. En todos los tratamientos donde se probaron lámparas con espectro de luz específico verde:azul:UV la postura empieza al menos un día antes. La luz de color afecta principalmente a los machos, incrementando la mortalidad inicial. En el tratamiento de baja intensidad, solo los machos fueron afectados por el uso de lámparas de color, a pesar de no haber diferencia significativa en la postura, si existe una tendencia al igual que los demás tratamientos, lo que hace pensar que los machos son más sensibles a la intensidad de luz y/o que su comportamiento de competencia y reproducción depende más de la luz que las hembras. En general la postura tiende a ser mayor en jaulas que utilizan lámparas de color. En jaulas oscuras, las hembras tienen una esperanza de vida mayor que en los demás tratamientos, y estas ponen huevo aun en la oscuridad, sin seguir búsqueda de atrayentes.

Es importante estudiar otras variables como la modificación de los patrones del fotoperiodo dentro de un mismo día, cambios en la sincronización de lotes entre otros.

El estudio de otras variables físicas y biológicas pueden potencialmente útiles para el aumento del rendimiento en postura en jaula de vuelo: cambio en patrones de luz (fotoperiodo en intermitencia), uso de sitios territoriales en jaula(hojas), desfase y control de edad según el sexo, estudio de colores aislados, selección genética, aumento de peso en adultos, entre otras.

REFERENCIAS

Aldana, J. et al. (2012) Contained systems to provide reproductive habitat for hermetia illucens. (CA Patente No. 2871196C). Individual. <https://patents.google.com/patent/CA2871196C/en?q=black+soldier+fly+light&oq=black+soldier+fly+light>

Awal, M., Rahman, M., Choudhury, M., Razzak, A., Hasan, M., & Mondal, M. (2022). Influences of artificial light on mating of black soldier fly (*Hermetia illucens*)—a review. *International Journal of Tropical Insect Science*, 1-5. <https://doi.org/10.1007/s42690-022-00786-7>

Barragan-Fonseca, K. B., Dicke, M., & van Loon, J. J. (2017). Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed—a review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), 105-120. <https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0055>

Bennie, J., Davies, T. W., Cruse, D., Inger, R. y Gaston, K. J. (2018). Artificial light at night causes top-down and bottom-up trophic effects on invertebrate populations. *Journal of Applied Ecology*, 55(6), pp. 2698-2706. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13240>

Bloch, G., Hazan, E., & Rafaeli, A. (2013). Circadian rhythms and endocrine functions in adult insects. *Journal of Insect Physiology*, 59(1), 56-69. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2012.10.012>

Camacho, G., López, D., Díaz, J., & Gaviria, C. (2012). Caracterización de las técnicas de modulación pulse width modulation (pwm) aplicadas a inversores trifásicos. *Épsilon*, 1(19), 145-176.

Cammack, J. A., & Tomberlin, J. K. (2017). The impact of diet protein and carbohydrate on select life-history traits of the black soldier fly *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae). *Insects*, 8(2), 56.

<https://doi.org/10.3390/insects8020056>

Chen, Y.-R., Wei, W.-L., Tzeng, D. T. W., Owens, A. C. S., Tang, H.-C., Wu, C.-S., Lin, S.-S., Zhong, S. y Yang, E.-C. (2021). Effects of artificial light at night (ALAN) on gene expression of *Aquatica ficta* firefly larvae. *Environmental Pollution*, 281, 116944. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116944>

Chia, S. Y., Tanga, C. M., Khamis, F. M., Mohamed, S. A., Salifu, D., Sevgan, S., ... & Ekesi, S. (2018). Threshold temperatures and thermal requirements of black soldier fly *Hermetia illucens*: Implications for mass production. *PloS one*, 13(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206097>

Chrysantus, T., & Nakimbugwe, D. (2022). Black soldier fly manual-v1. <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/bitstream/handle/10625/60970/IDL%20-%2060970.pdf>

Čičková, H., Newton, G. L., Lacy, R. C., & Kozánek, M. (2015). The use of fly larvae for organic waste treatment. *Waste management*, 35, 68-80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.026>

Danks, H. (2013). The range of insect dormancy responses. *EJE*, 99(2), 127-142.

DeRaedt, S., Bierman, A., van Heusden, P., Richards, C., & Christoffels, A. (2022). microRNA profile of *Hermetia illucens* (black soldier fly) and its implications on mass rearing. *PloS one*, 17(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265492>

Devic, E., & Fahmi, M.R. (2013) BSF Female genitalia (left) and BSF male genitalia (right). https://www.researchgate.net/figure/3-BSF-Female-genitalia-left-and-BSF-male-genitalia-right_fig1_315681950

Dissel, S., Codd, V., Fedic, R., Garner, K. J., Costa, R., Kyriacou, C. P., &

Rosato, E. (2004). A constitutively active cryptochrome in *Drosophila melanogaster*. *Nature neuroscience*, 7(8), 834-840. <https://doi.org/10.1038/nn1285>

Doležal, P., Habušťová, O., & Sehnal, F. (2007). Effects of photoperiod and temperature on the rate of larval development, food conversion efficiency, and imaginal diapause in *Leptinotarsa decemlineata*. *Journal of Insect Physiology*, 53(8), 849-857. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2007.04.009>

Dortmans, B.; Diener, S.; Verstappen, B.M.; Zurbrügg, C. (2017). Black soldier fly biowaste processing - a step-by-step guide. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SWM/BSF/BSF_Biowaste_Processing_LR.pdf

Dunlap, J.C., Loros, J.J., Decoursey, P.J., 2004. *Chronobiology: Biological Timekeeping*, Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland, Massachusetts, U.S.A., pp. 1–406.

Eccard, J. A., Scheffler, I., Franke, S. y Hoffmann, J. (2018). Off-grid: solar powered LED illumination impacts epigeal arthropods. *Insect Conservation and Diversity*, 11(6), pp. 600-607. <https://doi.org/10.1111/icad.12303>

El Jundi, B., Foster, J.J., Byrne, M. J., Baird, E. y Dacke, M. (2015). Spectral information as an orientation cue in dung beetles. *Biology Letters*, 11(11). <https://doi.org/10.1098/rsbl.2015.0656>

Ellers, J., & Van Alphen, J. J. (1997). Life history evolution in *Asobara tabida*: plasticity in allocation of fat reserves to survival and reproduction. *Journal of Evolutionary Biology*, 10(5), 771-785.

Elgert, C., Hopkins, J., Kaitala, A. y Candolin, U. (2020). Reproduction under light pollution: maladaptive response to spatial variation in artificial light in a

glow-worm. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 287(1931). <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.0806>

El-Hack, A., Mohamed, E., Shafi, M. E., Alghamdi, W. Y., Abdelnour, S. A., Shehata, A. M., ... & Ragni, M. (2020). Black soldier fly (*Hermetia illucens*) Meal as a promising feed ingredient for poultry: A comprehensive review. *Agriculture*, 10(8), 339. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080339>

Emery, P., So, W. V., Kaneko, M., Hall, J. C., & Rosbash, M. (1998). *CRY*, a *Drosophila* clock and light-regulated cryptochrome, is a major contributor to circadian rhythm resetting and photosensitivity. *Cell*, 95(5), 669-679. [https://doi.org/10.1016/S0092-8674\(00\)81637-2](https://doi.org/10.1016/S0092-8674(00)81637-2)

Enterra (2017). Enterra natural fertilizer 3-1-3 100% organic. <http://www.enterrafeed.com/wp-content/uploads/2017/08/Enterra-NaturalFertilizer-3-1-3-Product-Specifications.pdf>

European Commission (2021). Commission Regulation (EU) 2021/1372 of 17 August 2021 amending Annex IV to Regulation (EC) No 999/2001 of the European Parliament and of the Council as Regards the Prohibition to Feed Non-Ruminant Farmed Animals, Other than Fur Animals, with Protein Derived from Animals. *Off. J. Eur. Union*, 295, 1-17.

Ferdousi, L., & Sultana, N. (2021). Impact of daylight duration on pupation and adult emergence of black soldier fly (*Hermetia Illucens*). *IJER*, 6(1),142-145.

Foster, J. J., Tocco, C., Smolka, J., Khaldy, L., Baird, E., Byrne, M. J., Nilsson, D.-E. y Dacke, M. (2021). Light pollution forces a change in dung beetle orientation behavior. *Current Biology*, 31(17), pp. 3935-3942. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.06.038>

Hahn, D. A., & Denlinger, D. L. (2007). Meeting the energetic demands of insect diapause: nutrient storage and utilization. *Journal of insect physiology*, 53(8), 760-

773. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2007.03.018>

Hawkey, K. J., Lopez-Viso, C., Brameld, J. M., Parr, T., & Salter, A. M. (2021). Insects: a potential source of protein and other nutrients for feed and food. *Annu. Rev. Anim. Biosci*, 9, 333-354. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-021419-083930>

Heussler, C. D., Walter, A., Oberkofler, H., Insam, H., Arthofer, W., Schlick-Steiner, B. C., & Steiner, F. M. (2018). Influence of three artificial light sources on oviposition and half-life of the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae): Improving small-scale indoor rearing. *PLoS One*, 13(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197896>

Hilker, M., & Meiners, T. (2008). *Chemoecology of insect eggs and egg deposition*. John Wiley & Sons.

Hilker, M., & Meiners, T. (2011). Plants and insect eggs: how do they affect each other? *Phytochemistry*, 72(13), 1612-1623. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2011.02.018>

Hill, E.S., Okada, K., Kanzaki, R., 2003. Visualization of modulatory effects of serotonin in the silkworm antennal lobe. *Journal of Experimental Biology* 206, 345–352. <https://doi.org/10.1242/jeb.00080>

Hoc, B., Noël, G., Carpentier, J., Francis, F., & Caparros Megido, R. (2019). Optimization of black soldier fly (*Hermetia illucens*) artificial reproduction. *PloS one*, 14(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216160>

Holmes L A, Vanlaerhoven S L, Tomberlin J K. (2012). Relative humidity effects on the life history of *Hermetia illucens* (Diptera: Sstratiomyidae). *Environmental Entomology* 41 (4): 971-978. <https://doi.org/10.1603/EN12054>

Holmes, L.A., S. L. VanLaerhoven, and J. K. Tomberlin. (2016). Lower

temperature threshold of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) development. *J. Insects Food Feed.* 2: 255–262. <https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0008>

Holtkamp, G. (2009). The Sunniest and Darkest Places on Earth. *SciLogs*. <https://web.archive.org/web/20091027044102/http://www.scilogseu/en/blog/spacetimedreamer/2009-06-15/the-sunniest-and-darkest-places-on-earth>

Horváth, G., Kriska, G., Malik, P. y Robertson, B. (2009). Polarized light pollution: a new kind of ecological photopollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(6), pp. 317-325. <https://doi.org/10.1890/080129>

Iturbe Chiñas, A. F., & Sandoval Guillén, B. J. (2011). Análisis de alimentos: fundamentos y técnicas. Universidad Nacional Autónoma de México. https://amyd.quimica.unam.mx/pluginfile.php/14545/mod_resource/content/1/An%C3%A1lisis%20de%20alimentos%20fundamentos%20y%20t%C3%A9cnicas.pdf

James, S. M., Honn, K. A., Gaddameedhi, S., & Van Dongen, H. (2017). Shift work: disrupted circadian rhythms and sleep—implications for health and well-being. *Current sleep medicine reports*, 3(2), 104-112. <https://doi.org/10.1007/s40675-017-0071-6>

Joly, G., Nikiema, J., (2019). Global experiences on waste processing with black soldier fly (*Hermetia illucens*): from technology to business. *Resource Recovery and Reuse Series* 16. <https://hdl.handle.net/10568/105751>

Joosten, L., Lecocq, A., Jensen, A. B., Haenen, O., Schmitt, E., & Eilenberg, J. (2020). Review of insect pathogen risks for the black soldier fly (*Hermetia illucens*) and guidelines for reliable production. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 168(6-7), 432-447. <https://doi.org/10.1111/eea.12916>

Jordan, H. R., & Tomberlin, J. K. (2021). Microbial influence on reproduction, conversion, and growth of mass-produced insects. *Current Opinion in Insect*

Science, 48, 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2021.10.001>

Jucker, C., Erba, D., Leonardi, M. G., Lupi, D., & Savoldelli, S. (2017). Assessment of vegetable and fruit substrates as potential rearing media for *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larvae. *Environmental entomology*, 46(6), 1415-1423. <https://doi.org/10.1093/ee/nvx154>

Julita, U., Fitri, L. L., Putra, R. E., & Permana, A. D. (2020). Research Article Mating Success and Reproductive Behavior of Black Soldier Fly *Hermetia illucens* L. (Diptera, Stratiomyidae) in Tropics. *J. Entomol.*, 17: 117-127.

Kadener, S., Menet, J. S., Sugino, K., Horwich, M. D., Weissbein, U., Nawathean, P., ... & Rosbash, M. (2009). A role for microRNAs in the *Drosophila* circadian clock. *Genes & development*, 23(18), 2179-2191.

Kehinde, F. O., Dedeke, G. A., Popoola, O.I. y Isibor, P. O. (2018). Potential of light spectra as a control of cowpea weevil, *Callosobruchus maculatus*, activity. 8th International Biotechnology Conference, Exhibition and Workshop. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 210

Keiser, G. (2016). *Biophotonics*. Springer

Khanna, V.K., 2014. *Fundamentals of solid-state lighting: LEDs, OLEDs, and their applications in illumination and displays*. CRC press.

Ki, H. (2018). Life Cycle Integration System for Breeding Black Soldier Fly. (KR Patente No. 20200063581A). Individual. <https://patents.google.com/patent/KR20200063581A/en?q=black+soldier+fly+light&oq=black+soldier+fly+light&page=1>

Kim, K.-N., Huang, Q.-Y. y Lei, C.-L. (2019). Advances in insect phototaxis and application to pest management: a review. *Pest Management Science*, 75(12), pp. 3135-3143. <https://doi.org/10.1002/ps.5536>

Kistenpfennig, C., Grebler, R., Ogueta, M., Hermann-Luibl, C., Schlichting, M., Stanewsky, R., ... & Helfrich-Förster, C. (2017). A new rhodopsin influences light-dependent daily activity patterns of fruit flies. *Journal of biological rhythms*, 32(5), 406-422. <https://doi.org/10.1177/0748730417721826>

Klüber, P., Bakonyi, D., Zorn, H., & Rühl, M. (2020). Does light color temperature influence aspects of oviposition by the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae)?. *Journal of Economic Entomology*, 113(5), 2549-2552. <https://doi.org/10.1093/jee/toaa182>

Koh, K., Zheng, X., & Sehgal, A. (2006). JETLAG resets the *Drosophila* circadian clock by promoting light-induced degradation of TIMELESS. *Science*, 312(5781), 1809-1812.

Krah, F. S., Hess, J., Hennicke, F., Kar, R., & Bässler, C. (2021). Transcriptional response of mushrooms to artificial sun exposure. *Ecology and evolution*, 11(15), 10538-10546. <https://doi.org/10.1002/ece3.7862>

Kyba, C. C. M., Kuester, T., De Miguel, A. S., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., Bennie, J., Elvidge, C. D., Gaston, K. J. y Guanter, L. (2017). Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. *Science Advances*, 3(11).

Lazzarini, L. E. S., Pacheco, F. V., Silva, S. T., & Duarte, A. (2017). Uso de diodos emissores de luz (LED) na fisiologia de plantas cultivadas: revisão. *Scientia Agraria Paranaensis*, 16(2), 137-144. <http://dx.doi.org/10.18188/1983-1471/sap.v16n1p137-144>

Lessard BD, Yeates DK, Woodley NE. Revision of the Hermetiinae of Australia (Diptera: Stratiomyidae). *Austral Entomol.* 2019;58(1):122–36. <https://doi.org/10.1111/aen.12333>.

Li, Y., & Padgett, R. W. (2012). Bantam is required for optic lobe development

and glial cell proliferation. PLoS One, 7(3).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032910>

Li, C., Addeo, N. F., Rusch, T. W., Dickerson, A. J., Tarone, A. M., Hu, W., & Tomberlin, J. K. (2022). Impact of age, sex, and size on the thermal tolerance of the adult black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae). *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(6), 681-691. <https://doi.org/10.3920/JIFF2021.0092>

Liu, X.; Chen, X.; Wang, H.; Yang, Q.; ur Rehman, K.; Li, W.; Minmin, C.; Li, Q.; Mazza, L.; Zhang, J.; Yu, Z.; Longyu, Z. (2017). Dynamic changes of nutrient composition throughout the entire life cycle of black soldier fly. *PLoS ONE* 12(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182601>

Liu, Z., Najar-Rodriguez, A. J., Minor, M. A., Hedderley, D. I., & Morel, P. C. (2020). Mating success of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), under four artificial light sources. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 205, 111815. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2020.111815>

Longcore, T. y Rich, C. (2016). Artificial night lighting and protected lands: ecological effects and management approaches. Fort Collins, Colorado: U.S. Department of the Interior National Park Service. https://www.researchgate.net/publication/305720851_Artificial_night_lighting_and_protected_lands_ecological_effects_and_management_approaches

Lopatina, E. B., Balashov, S. V., & Kipyatkov, V. E. (2007). First demonstration of the influence of photoperiod on the thermal requirements for development in insects and in particular the linden-bug, *Pyrrhocoris apterus* (Heteroptera: Pyrrhocoridae). *European Journal of Entomology*, 104(1), 23-31.

Macavei, L. I., Benassi, G., Stoian, V., & Maistrello, L. (2020). Optimization of *Hermetia illucens* (L.) egg laying under different nutrition and light conditions. *Plos*

One, 15(4), e0232144. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232144>

Matthäus, B., Piofczyk, T., Katz, H., & Pudel, F. (2019). Renewable Resources from Insects: Exploitation, Properties, and Refining of Fat Obtained by Cold-Pressing from *Hermetia illucens* (Black Soldier Fly) Larvae. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 121(7), 1800376. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201800376>

Melgar-Lalanne, G., Hernández-Álvarez, A. J., & Salinas-Castro, A. (2019). Edible insects processing: Traditional and innovative technologies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(4), 1166-1191. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12463>

Meticulous Research (2022). Black Soldier Fly Market by Product (Protein Meals, Whole Dried Larvae, Biofertilizers {Frass}, Larvae Oil, Others {Cocoons, Pupa}), by Application (Animal Feed, Agriculture, Pet Food, Others), and Geography. <https://www.meticulousresearch.com/product/black-soldier-fly-market-5074#description>.

Mottet, A., de Haan, C., Falcucci, A., Tempio, G., Opio, C., & Gerber, P. (2017). Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security*, 14, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.001>

N.I.H. (2022). Oviposition, MeSH Linked Data. NIH National Library of Medicine. <https://id.nlm.nih.gov/mesh/M0015600.html>

Nakamura S, Ichiki R T, Shimoda M, Morioka S. (2016). Small-scale rearing of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), in the laboratory: low-cost and year-round rearing. *Applied Entomology and Zoology* 51(1): 161-166. <https://doi.org/10.1007/s13355-015-0376-1>

Nesic, K., & Zagon, J. (2019). Insects—a promising feed and food protein source?. *Meat Technology*, 60(1), 56-67.

<https://doi.org/10.18485/meattech.2019.60.1.8>

Newton, G. L., Sheppard, D. C., Watson, D. W., Burtle, G. J., Dove, C. R., Tomberlin, J. K., & Thelen, E. E. (2005). The black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a manure management/resource recovery tool. Symposium on the state of the science of Animal Manure and Waste Management ,1, p. 57.

Niwa, R., & Niwa, Y. S. (2014). Enzymes for ecdysteroid biosynthesis: their biological functions in insects and beyond. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 78(8), 1283-1292. <https://doi.org/10.1080/09168451.2014.942250>

Oonincx, D. G. A. B., Volk, N., Diehl, J. J. E., Van Loon, J. J. A., & Belušič, G. (2016). Photoreceptor spectral sensitivity of the compound eyes of black soldier fly (*Hermetia illucens*) informing the design of LED-based illumination to enhance indoor reproduction. *Journal of insect physiology*, 95, 133-139. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2016.10.006>

Ordoñez, J. L. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Manual formativo de ACTA*, (62), 17-31

Ortiz, J. C., Ruiz, A. T., Morales-Ramos, J. A., Thomas, M., Rojas, M. G., Tomberlin, J. K., ... & Jullien, R. L. (2016). Insect mass production technologies. *Insects as sustainable food ingredients*, pp. 153-201. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802856-8.00006-5>

Owens, A. C., & Lewis, S. M. (2018). The impact of artificial light at night on nocturnal insects: a review and synthesis. *Ecology and evolution*, 8(22), 11337-11358. <https://doi.org/10.1002/ece3.4557>

Park H. (2016). Black soldier fly larvae manual. <http://scholarworks.umass.edu.Erişim.tarihi>

Pegoraro M, Bafna A, Davies NJ, Shuker DM & Tauber E (2016) DNA

methylation changes induced by long and short photoperiods in *Nasonia*. *Genome Research* 26: 203– 210.

Prasad, P. N. (2003). *Introduction to biophotonics*. John Wiley & Sons.

Prosekov, A. Y., & Ivanova, S. A. (2018). Food security: The challenge of the present. *Geoforum*, 91, 73-77. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.02.030>

Rehman, K. ur; Cai, M.; Xia, X.; Zheng, L.; Wang, H.; Soomro, A.Az.; Zhou, Y.; Li, W.; Yu, Z.; Zhang, J. 2017a. Cellulose decomposition and larval biomass production from the co-digestion of dairy manure and chicken manure by mini-livestock (*Hermetia illucens* L.). *Journal of Environmental Management* 196: 458-465.

Resh, V. H., & Cardé, R. T. (Eds.). (2009). *Encyclopedia of insects*. Academic press.

Ricci-Jürgensen, M., Gilbert, J., & Ramola, A. (2020). Global Assessment of municipal organic waste production and recycling. *ISWA*. 1, 1-32. <https://www.altereko.it/wp-content/uploads/2020/03/Report-1-Global-Assessment-of-Municipal-Organic-Waste.pdf>

Rosenheim, J. A., Heimpel, G. E., & Mangel, M. (2000). Egg maturation, egg resorption and the costliness of transient egg limitation in insects. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 267(1452), 1565-1573. <https://doi.org/10.1098/rspb.2000.1179>

Rugeles, V. H. F., Garzón, H. B. C., & Osorio, J. A. C. (2010). Aplicaciones de iluminación con leds. *Scientia et technica*, 16(45), 13-18.

Salomone, R., Saija, G., Mondello, G., Giannetto, A., Fasulo, S., & Savastano, D. (2017). Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of Life Cycle Assessment to process using *Hermetia illucens*. *Journal*

of Cleaner Production, 140, 890-905.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.154>

Samayoa, A. C., & Hwang, S. Y. (2018). Degradation capacity and diapause effects on oviposition of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *Journal of economic entomology*, 111(4), 1682-1690. <https://doi.org/10.1093/jee/toy078>

Sánchez-Muros, M. J., Barroso, F. G., & De Haro, C. (2016). Brief summary of insect usage as an industrial animal feed/feed ingredient. *Insects as Sustainable Food Ingredients*, 273-309. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802856-8.00010-7>

Saunders DS (2012) Insect photoperiodism: seeing the light. *Physiological Entomology* 37: 207–218. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.2012.00837.x>

Saunders, D. (2022). Time measurement in insect photoperiodism: The role of photophase duration and light intensity. *European Journal of Entomology*, 119, 69-76.

Schmitz, A., Gebhardt, M., & Schmitz, H. (2008). Microfluidic photomechanic infrared receptors in a pyrophilous flat bug. *Naturwissenschaften*, 95(5), 455-460. <https://doi.org/10.1007/s00114-008-0344-5>

Schneider, J. C. (2020). Effects of light intensity on mating of the black soldier fly (*Hermetia illucens*, Diptera: Stratiomyidae). *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(2), 111-119. <https://doi.org/10.3920/JIFF2019.0003>

Sharkey, C. R., Fujimoto, M. S., Lord, N. P., Shin, S., McKenna, D. D., Suvorov, A., Martin, G. J. y Bybee, S. M. (2017). Overcoming the loss of blue sensitivity through opsin duplication in the largest animal group, beetles. *Scientific Reports*, 7(1), 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00061-7>

Sindermann, D., Heidhues, J., Kirchner, S., Stadermann, N., & Kühn, A. (2021).

Industrial processing technologies for insect larvae. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 857-875. <https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0103>

Specht, K., Zoll, F., Schümann, H., Bela, J., Kachel, J., & Robischon, M. (2019). How will we eat and produce in the cities of the future? From edible insects to vertical farming—a study on the perception and acceptability of new approaches. *Sustainability*, 11(16), 4315. <https://doi.org/10.3390/su11164315>

Srinivasan, T. M. (2017). Biophotons as subtle energy carriers. *International journal of yoga*, 10(2), 57.

Steel, C. G., & Vafopoulou, X. (2006). Circadian orchestration of developmental hormones in the insect, *Rhodnius prolixus*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 144(3), 351-364. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2006.02.018>

Stewart, A. J. A., Perl, C. D. y Niven, J. E. (2020). «Artificial lighting impairs mate attraction in a nocturnal capital breeder». *Journal of Experimental Biology*, 223(19). <https://doi.org/10.1242/jeb.229146>

Subala, S. P. R. R., & Shivakumar, M. S. (2018). Changes in light and dark periods affect the arylalkylamine N-acetyl transferase, melatonin activities and redox status in the head and hemolymph of nocturnal insect *Spodoptera litura*. *Biological Rhythm Research*, 49(1), 13-28. <https://doi.org/10.1080/09291016.2017.1325564>

Surendra, K. C., Tomberlin, J. K., van Huis, A., Cammack, J. A., Heckmann, L.-H. L., & Khanal, S. K. (2020). Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF). *Waste Management*, 117, 58–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050>

Tataroglu, O., & Emery, P. (2015). The molecular ticks of the *Drosophila*

circadian clock. *Current opinion in insect science*, 7, 51-57.
<https://doi.org/10.1016/j.cois.2015.01.002>

Teikari, P. (2007). *LIGHT POLLUTION: Definition, legislation, measurement, modeling and environmental effects*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Tomberlin JK, Sheppard DC (2002) Factors influencing mating and oviposition of black soldier flies (Diptera: Stratiomyidae) in a colony. *J Entomol Sci* 37, 345-352. <https://doi.org/10.18474/0749-8004-37.4.345>

Tougeron, K. (2019). Diapause research in insects: historical review and recent work perspectives. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 167(1), 27-36. <https://doi.org/10.1111/eea.12753>

Valenzuela Zuccar, S. R. (2020). Efecto de la iluminación en el patrón respiratorio de reposo en *Astylus trifasciatus* (Guérin-Ménéville, 1844) (Coleoptera: Melyridae): Una aproximación experimental al efecto de la contaminación lumínica en insectos (Tesis de pregrado). Universidad de Chile.

Van den Broeck, M., De Cock, R., Van Dongen, S. y Matthysen, E. (2021a). «Blinded by the light: artificial light lowers mate attraction success in female glow-worms (*Lampyris noctiluca* L.)». *Insects*, 12(8), 734. <https://doi.org/10.3390/insects12080734>

Vaz, S., Manes, S., Gama-Maia, D., Silveira, L., Mattos, G., Paiva, P.C., Figueiredo, M. y Lorini, M.L. (2021). «Light pollution is the fastest growing potential threat to firefly conservation in the Atlantic Forest hotspot». *Insect Conservation and Diversity*, 14(2), pp. 211-224. <https://doi.org/10.1111/icad.12481>

Vera Carrasco, O. (2009). Cómo escribir artículos de revisión. *Revista médica la paz*, 15(1), 63-69.

Wakakuwa, M., Stavenga, D. G., & Arikawa, K. (2007). Spectral organization of ommatidia in flower-visiting insects. *Photochemistry and Photobiology*, 83(1), 27-34. <https://doi.org/10.1562/2006-03-03-IR-831>

Wang, F., Huang, Y., & Zheng, Z. (2019). For the light supply apparatus of black soldier flies breeding and the method for breeding of black soldier flies. (CN Patente No. 110199959A) Guangdong Rui Jie Environmental Protection Industry Investment Co Ltd. <https://patents.google.com/patent/CN110199959A/en?q=black+soldier+fly+light&oq=black+soldier+fly+lightt>

Wang, S., Wang, K., Michaud, J. P., Zhang, F. y Tan, X.-L. (2014b). «Reproductive performance of *Propylea japonica* (Coleoptera: Coccinellidae) under various light intensities, wavelengths and photoperiods». *European Journal of Entomology*, 111(3), pp. 341-347.

Wang, S., Guo, X., Zhang, J. y Zhang, F. (2014a). «Copulatory behavior of predacious ladybird *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) under different illuminative conditions». *Acta Ecologica Sinica*, 34(24), pp. 7428-7435.

Wang, Y. S., & Shelomi, M. (2017). Review of black soldier fly (*Hermetia illucens*) as animal feed and human food. *Foods*, 6(10), 91. <https://doi.org/10.3390/foods6100091>

Yang, F., Wu, Z., & Wu, H. (2018). Black soldier flies adult mating system and its applicable artificial light source. (CN Patente No. 108012996A). XI'AN JIEMU ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY Co Ltd

<https://patents.google.com/patent/CN108012996A/en?q=black+soldier+fly+light&oq=black+soldier+fly+light#citedBy>

Yoshii, T., Rieger, D., & Helfrich-Förster, C. (2012). Two clocks in the brain: an update of the morning and evening oscillator model in *Drosophila*. *Progress in*

brain research, 199, 59-82. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59427-3.00027-7>

Yu, J. (2019). Light filling lamp for adult hermetia illucens. (CN Patente No. 210831587U). Sichuan Zhongdi Oil Technology Co Ltd. <https://patents.google.com/patent/CN210831587U/en?q=black+soldier+fly+light&oq=black+soldier+fly+light&page=4t>

Zhang, J., Huang, L., He, J., Tomberlin, J.K., Li, J., Lei, C., Sun, M., Liu, Z., Yu, Z. (2010). An artificial light source influences mating and oviposition of black soldier flies, *Hermetia illucens*. *J. Insect Sci.* 10, 202. <https://doi.org/10.1673/031.010.20201>

Zurbrügg, C.; Dortmans, B.; Fadhila, A.; Vertsappen, B.; Diener, S. 2018. From pilot to full scale operation of a waste-to-protein treatment facility. *Detritus* 01: 18-22. <http://doi.org/10.26403/detritus/2018.22>

Dortmans B.M.A., Egger J., Diener S., Zurbrügg C. (2021) *Black Soldier Fly Biowaste Processing - A Step-by-Step Guide*, 2nd Edition

Tomberlin, J. K., & Sheppard, D. C. (2001). Lekking behavior of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae). *Florida Entomologist*, 729-729.

Nakamura S., R. T. Ichiki, M. Shimoda, and S. Morioka. 2016. Small-scale rearing of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), in the laboratory: low-cost and year-round rearing. *Appl. Entomol. Zool.* 51: 161–166.

Georgescu, B., Struțu, D., Păpuș, T., Ladoși, D., & Boaru, A. (2020). Body weight loss of black soldier fly *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) during development in non-feeding stages: Implications for egg clutch parameters. *European Journal of Entomology*, 117, 216-225.

AOAC. *Official Methods of Analysis of AOAC international*. 16th edn. AOAC International, Gaithersburg, MD (2002).

Van Soest, P. V., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of dairy science*, 74(10), 3583-3597.

Barrett, M., Chia, S. Y., Fischer, B., & Tomberlin, J. K. (2023). Welfare considerations for farming black soldier flies, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae): a model for the insects as food and feed industry. *Journal of Insects as Food and Feed*, 9(2), 119-148.