



Scientia Agropecuaria

Web page: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>

Facultad de Ciencias
Agropecuarias

Universidad Nacional de
Trujillo



REVIEW

Comprehensive utilization of the Black Soldier Fly: Bioconversion, sustainability, and emerging challenges

Aprovechamiento integral de la Mosca Soldado Negra: Bioconversión, sostenibilidad y desafíos emergentes

Ileana Maricruz Bermúdez-Serrano¹ ; Oscar Abel Sánchez-Velázquez²; * 

¹ Universidad de Costa Rica, Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Guanacaste, Costa Rica.

² Unidad de Tecnología Alimentaria, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), A.C., Camino Arenero #1227, Col. El Bajío, CP 45019. Zapopan, Mexico.

* Corresponding author: ossanchez_pos@ciatej.edu.mx (O. A. Sánchez-Velázquez).

Received: 24 June 2023. Accepted: 12 December 2023. Published: 16 December 2023.

Abstract

The black soldier fly (BSF) has garnered the attention of the scientific community due to its outstanding efficiency in transforming organic waste into raw materials that can be incorporated into the value chain. A bibliometric and bibliographic review was conducted to elucidate the pivotal role played by the bioconversion of organic matter in shaping sustainable circular economy systems. The analysis revealed that black soldier fly larvae (BSFL) have proven effective in the bioconversion of common waste, such as household and livestock waste, yielding valuable biomass. Despite these advancements, the exploration of new sources of organic matter persists to mitigate its environmental impact. Emerging technologies enable the efficient processing of BSFL biomass, yielding substitutes for environmentally unfriendly materials. Although the literature emphasizes the advantages of BSF in constructing circular economy models, obstacles such as limited legislation and insufficient incentives for producers, concerns about pathogens and contaminants, and low public acceptance of this species are identified. However, the growing trend in scientific interest suggests that BSF could play a central role in building sustainable societies in the future.

Keywords: black soldier fly; *Hermetia illucens*; circular economy; sustainability; bioconversion; use of waste.

Resumen

La mosca soldado negra (MSN) ha captado la atención de la comunidad científica debido a su destacada eficiencia en la transformación de desechos orgánicos en materias primas integrables en la cadena de valor. Se llevó a cabo una revisión bibliométrica y bibliográfica con el objetivo de elucidar el papel crucial que desempeña la bioconversión de materia orgánica en la configuración de sistemas sustentables de economía circular. El análisis reveló que las larvas de MSN (LMSN) han demostrado ser efectivas en la bioconversión de residuos comunes como desechos domésticos y ganaderos, generando biomasa útil. A pesar de estos avances, persiste la exploración de nuevas fuentes de materia orgánica para mitigar su impacto ambiental. Tecnologías emergentes permiten procesar eficientemente la biomasa de LMSN, generando productos sustitutos de materiales poco amigables con el entorno. Aunque la literatura destaca las ventajas de la MSN en la construcción de modelos de economía circular, se identifican obstáculos como la limitada legislación, falta de incentivos para productores, preocupaciones por patógenos y contaminantes y la baja aceptación pública de esta especie. Sin embargo, la creciente tendencia en el interés científico sugiere que la MSN podría desempeñar un papel central en la edificación de sociedades sostenibles en el futuro.

Palabras clave: mosca soldado negra; *Hermetia illucens*; economía circular; sostenibilidad; bioconversión; aprovechamiento de residuos.

DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.047>

Cite this article:

Bermúdez-Serrano, I. M., & Sánchez-Velázquez, O. A. (2023). Aprovechamiento integral de la Mosca Soldado Negra: Bioconversión, sostenibilidad y desafíos emergentes. *Scientia Agropecuaria*, 14(4), 571-590.

1. Introducción

El cambio climático y el constante aumento de la población, acompañado de una mejora general en el nivel de vida y el poder adquisitivo, han provocado un constante incremento de la presión sobre los bienes y

servicios ambientales, especialmente en países en vías de desarrollo (Bárcena-Ibarra et al., 2020; Leal Filho et al., 2023). Ante estas circunstancias, los modelos predominantes de producción y suministro resultan limitados y poco efectivos para adaptarse a un futuro más sostenible (Leng et al., 2022).

Dentro de este contexto, la economía circular se presenta como una alternativa viable que busca minimizar los residuos y maximizar el aprovechamiento de recursos, fomentando la reutilización, reciclaje y diseño de productos para cerrar los ciclos de vida (Gomez-San Juan et al., 2022). En la búsqueda de modelos multiespecíficos que permitan abordar los problemas socioeconómicos ante las crisis socioambientales actuales sobresale una especie de insecto versátil sobre otras: la mosca soldado negra (MSN) (*Hermetia illucens*) (Wade & Hoelle, 2020). La MSN destaca por su capacidad de transformar desechos orgánicos de diferente origen en materias primas de alto valor nutricional, agroalimentario e industrial (Woodley, 2009; Mahmood et al., 2021; Amrul et al., 2022).

La capacidad que tienen las larvas de MSN (LMSN) de reciclar la materia orgánica en descomposición (MOD) abre la posibilidad de reincorporar al mercado un cúmulo de subproductos de todo tipo de procedencia, incluyendo el sector agropecuario y silvícola, la manufactura de alimentos, desechos domésticos y restauranteros, entre muchos otros, los cuales pueden convertirse en un problema de salud pública si no son tratados adecuadamente (Luperdi et al., 2023; Alagappan et al., 2022; Amrul et al., 2022; Ioannou et al., 2022).

Diversos expertos concuerdan en que existe una gran oportunidad de mercado en torno al aprovechamiento de la biomasa de MSN y sus derivados (da Silva & Hesselberg, 2020; Alagappan et al., 2022; Van Huis et al., 2021). Las implicaciones económicas, legales, ambientales y bioéticas en la cadena de producción de proteínas de origen animal, coloca a la MSN como una de las alternativas más viables sobre otros sistemas convencionales como la ganadería y la acuicultura para un futuro más sustentable (Skrivervik, 2020; Alagappan et al., 2022; Milburn, 2023; Rehman et al., 2023). Sin embargo, aún se deben superar algunos obstáculos para alcanzar este hito, ya que se debe garantizar que los productos derivados de MSN estén libres de contaminantes biológicos y químicos, cumplan con las normas de bioseguridad alimentaria, cuenten con un mercado dispuesto a utilizarlos y que se llegue a un consenso general que permita el desarrollo de legislaciones nacionales y regionales sobre toda la cadena de producción de MSN.

En los últimos 10 años ha incrementado exponencialmente el número de publicaciones científicas donde se aborda a la MSN desde múltiples perspectivas, destacando su participación en la construcción de un futuro más sostenible. Sin embargo, la normatividad y legislación que en torno al uso de la MSN como parte del sistema económico no se

ha desarrollado a la misma velocidad que la generación de conocimiento en torno a la MSN (Alagappan et al., 2022). Por todo lo anterior, es necesario conocer el estado actual del conocimiento sobre la MSN como una especie potencial para su incorporación en la transición hacia la economía circular y los desafíos futuros. El objetivo de la presente revisión es elucidar el papel que desempeña la bioconversión de materia orgánica utilizando la MSN en la configuración de sistemas sustentables de economía circular.

2. Conocimiento actual de la mosca soldado negra

La participación de la MSN en el entorno de la sostenibilidad es amplia y puede abordarse desde diferentes aristas, sin embargo, para fines prácticos de esta revisión bibliográfica se exploró su papel en la bioconversión de materia orgánica y en la economía circular. Para dimensionar el estado del conocimiento actual de la mosca soldado negra desde las perspectivas de su papel en la sustentabilidad, bioconversión de residuos orgánicos y la economía circular, se realizó un análisis bibliométrico en las bases de datos Scopus (www.scopus.com), PubMed (www.pubmed.com) y Web of Science (www.webofscience.com) del 2013 al 2023 mediante el programa VOSviewer versión 1.6.20 (www.vosviewer.com). Se utilizaron las palabras claves "black soldier fly (mosca soldado negra)" o "hermetia illucens" (Categoría 1) en combinación con "sustainability (sustentabilidad)", "bioconversion (bioconversión)" o "circular economy (economía circular)" (Categoría 2). Bajo estos criterios no se eliminaron duplicados entre las bases de datos ni entre palabras clave para tener un panorama amplio de la bibliografía disponible entre las bases de datos y las posibles interrelaciones semánticas de las palabras claves. El total de publicaciones resultantes se resume en la **Tabla 1**.

Tabla 1

Número de publicaciones resultantes en las bases de datos Scopus, PubMed y Web of Science (2013-2023)

Palabras claves		Bases de datos consultadas		
Categoría 1	Categoría 2	Scopus	PubMed	Web of Science
Black soldier fly	Sustainability	152	227	186
	Bioconversion	288	132	302
	Circular economy	109	45	125
<i>Hermetia illucens</i>	Sustainability	121	209	182
	Bioconversion	257	117	290
	Circular economy	103	45	117

De manera recurrente, las búsquedas arrojaron palabras clave en común como "larva/larvae", "waste management/organic waste", "fertilizers",

“biotransformation”, “animal food/feed”, “manure (chicken/dairy/poultry)”, “biodiesel”, “protein”, “lipids”, “frass”, “refuse disposal” y “aquaculture (fish meal)” (**Material Suplementario 1**), además, las palabras clave consultadas aparecieron en búsquedas donde no se incluyeron como palabras clave de búsqueda, lo que indica la interconexión existente entre los estudios reportados en estas bases de datos. Las relaciones de alimentación-manejo de residuos sólidos orgánicos-energía surgen de esta búsqueda como las tendencias evidentes del interés del papel central que puede jugar la MSN en el contexto de la sustentabilidad, la bioconversión de materia orgánica y la economía circular. Para profundizar en estos hallazgos, en las siguientes secciones se desarrollan y discuten estos puntos de manera individual.

2.1 Generalidades de la Mosca Soldado Negra

La mosca soldado negra (MSN), *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758) es un díptero perteneciente a la familia Stratiomyidae. Esta especie es nativa de regiones tropicales, subtropicales y templadas del continente americano, con temperaturas óptimas de 25 a 30 °C, no pudiendo sobrevivir a menos de 5 °C (Lu et al., 2022). Debido a que la mosca puede soportar diferentes condiciones de humedad, luz y temperatura, se ha establecido en Australia, India, Europa y África, después de ser transportada por los humanos (Barragan et al., 2017).

En su forma adulta, el insecto es negro y alargado, con tres segmentos (cabeza, tórax y vientre) y ronda los 10–25 mm de longitud (Tomberlin & Cammack, 2018). Tiene alas de color marrón y tentáculos que se proyectan desde la cabeza. En el abdomen cuenta con cinco segmentos con manchas blancas. Los machos son más largos que las hembras, pero tienen alas y genitales finales más pequeños. Las hembras tienen longitudes corporales entre 12 y 20 mm y alas entre 8 y 14,8 mm (Lu et al., 2022). Este insecto experimenta una metamorfosis completa, pasando por cinco etapas durante su ciclo de vida: huevo, larva, prepupa, pupa y adulto (Figura 1). El ciclo de vida completo dura de 20 a 22 días bajo condiciones ambientales idóneas, con una pupa durante los primeros 6 a 8 días y una metamorfosis adulta durante los últimos 14 días (Lu et al., 2022). Sin embargo, la duración del ciclo de vida puede variar de dos semanas a varios meses en relación con la temperatura, la humedad de la dieta, la humedad relativa, entre otros (Tomberlin & Cammack &, 2018).

La MSN no representa una amenaza para otros organismos y no tienen afinidad por el cuerpo humano ni por los alimentos frescos, por lo que no

son consideradas especies vectores o plagas en los países donde habitan naturalmente (Lu et al., 2022; Barragan et al., 2017).

Las LMSN han cobrado gran interés como alternativa para la alimentación animal, principalmente, y en menor medida, para la humana debido a su importante valor nutricional (Tabla 2). Las etapas de larva y pupa son las más ricas en nutrientes y dependen en gran medida de la calidad de los sustratos de los que se alimentan, con alrededor de 14,7–39 g/100 g en base seca (bs) de grasa y 37–56,2 g/100 g bs de proteína en base seca (Cammak & Tomberlin, 2017; Caligiani et al., 2018; Barragan-Fonseca et al., 2017; Gligorescu et al., 2018; Liu et al., 2017; Müller et al., 2017). Al respecto, Cammak & Tomberlin (2017) han reportado que el perfil nutricional de las larvas de *H. illucens* depende de la composición de nutrientes de las dietas, por lo que se puede lograr mayores porcentajes de proteína, lípidos o carbohidratos en la biomasa de larvas enriqueciendo el sustrato del que se alimentan. La MSN también presenta un perfil de aminoácidos esenciales y ácidos grasos, así como un contenido de vitaminas y minerales muy interesante y beneficioso para animales y humanos (Ooninx & Finke, 2021; Bessa et al., 2020; Caligiani et al., 2019).

Tabla 2
Composición nutricional de larvas de mosca soldado negra

Nutriente	Contenido (g/100 g b.s.)	Referencias
Proteínas totales	14,7–56,2	Cammak y Tomberlin, 2017; Caligiani et al., 2018; Gligorescu et al., 2018; Barragán-Fonseca et al., 2017; Liu et al., 2017; Müller et al., 2017
Lípidos totales	4,8–39	Cammak y Tomberlin, 2017; Caligiani et al., 2018; Barragán-Fonseca et al., 2017; Gligorescu et al., 2018; Liu et al., 2017; Müller et al., 2017
Cenizas	4–19	Caligiani et al., 2018; Liu et al., 2017
Carbohidratos totales	8,75–21	Cammak & Tomberlin, 2017; Caligiani et al., 2018
Quitina	9–10	Caligiani et al., 2018
Calorías	105–233	Cammak & Tomberlin, 2017

g/100 g bs, gramos por 100 gramos en base seca.

2.2 Aprovechamiento de residuos orgánicos

La actual demanda de proteínas de origen animal ha llevado a que cerca del 80% de las tierras cultivables se destinen a la ganadería, ya sea para el establecimiento de granjas o zonas de cultivo para la producción del alimento que se destinará a este sector (FAO, 2015; Eldridge, 2016).

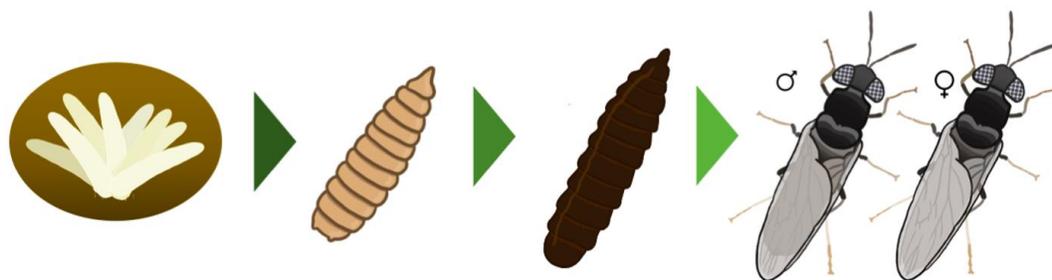


Figura 1. Etapas de vida de la mosca soldado negra. A, huevos; B, larva; C, pupa; D, adultos.

Esto supone una gran presión por la demanda de recursos naturales y servicios ambientales de todo el planeta, puesto que los casi 30 mil millones de animales de cría (reses, cerdos, cabras y ovejas, aves de corral, etc.) requieren no solo espacio y alimento, sino también altos volúmenes de agua dulce, aire de calidad, cuidado, condiciones de higiene, etc. (FAO, 2015).

En este contexto, numerosos estudios reconocen la alta capacidad de la MSN para convertir desechos orgánicos de diferentes orígenes en proteína animal, es decir, ésta es capaz de alimentarse de sustratos bajos en proteína formados por desperdicios, desechos y restos de alimentos, granjas, agroindustria, entre otros, y transformarlos en proteínas asequibles y de alta calidad relativa para alimentar y nutrir animales y humanos (Lalander et al., 2020; Surendra et al., 2020). Por lo tanto, no es de extrañar, que en la revisión bibliográfica palabras dentro de la semántica de la bioconversión aparecieran frecuentemente como "biotransformation", "waste management", "food waste", "waste", "manure", "waste treatment", "organic waste", "circular economy" o "biomass". Es por ello que se considera a la MSN como una especie "eficiente" para la bioconversión de residuos orgánicos en materias primas de alto valor en el sector agroalimentario (Mahmood et al., 2021; Amrul et al., 2022). Inclusive, la MSN es capaz de reciclar gases de efecto invernadero, ya que Lalander et al. (2020) encontraron que sus larvas pueden tomar el 1,95–13,41% y el 5,40 – 18,93% del carbono y el nitrógeno del sustrato, respectivamente, evitando así su liberación a la atmósfera. La reducción del peso total, la biotransformación y la tasa de conversión de diferentes sustratos por medio de las LMSN se ejemplifica en la Tabla 3. Se ha constatado que LMSN son capaces de reducir entre 46,7–68% el peso total de MOD como residuos de frutas y vegetales, industriales de trigo y orgánicos municipales (Surendra et al., 2020). Sobre estos mismos sustratos se observó un porcentaje de bioconversión del 4,1–14% y una tasa de conversión de alimento de 5,8–12,5. La biomasa

obtenida de las larvas de *H. illucens* alimentadas con estos desechos presentan perfiles nutricionales idóneos para ser consideradas como alimentos potenciales para animales de cría monogástricos y rumiantes (Khanal et al., 2023; Toral et al., 2022).

Tabla 3

Reducción del sustrato, tasa de bioconversión y tasa de conversión de alimento de LMSN en diferentes sustratos

Sustrato	Reducción del sustrato (% Bs)	Bioconversión (%)	Tasa de conversión de alimento
Residuos de frutas y vegetales	46,7–60	4,1–10,8	9,3–12,5
Residuos industriales de trigo	56,4	14,9	ND
Residuos orgánicos municipales	68	11,8	5,8

Reducción de sustrato = (peso del sustrato añadido-peso del residuo/peso del sustrato inicial) * 100; bioconversión = (peso de la biomasa de las larvas/peso de sustrato añadido) * 100; tasa de conversión de alimento = peso del sustrato consumido/peso ganado de las larvas. % bs, porcentaje en base seca; ND, no disponible. Adaptado de Surendra et al. (2020).

Los desechos animales de rastros vacunos, porcinos y de aves también son un potencial recurso alimenticio para las LMSN (Luperdi et al., 2023). Unos pocos estudios, como el de Luperdi et al. (2023), reportan que sustratos basados en diferentes sub-productos de rastros de pollo y ganado incrementan significativamente la composición proteínica (50,81% del peso seco) de las LMSN en comparación con el grupo control alimentado sólo con granos. Sin embargo, aún son necesarias más pruebas sobre bioseguridad para el consumo de larvas desarrolladas en estos y otros sustratos antes de ser consideradas para la alimentación humana o animal (Alagappan et al., 2022).

Por sus características de bioconversión, la MSN representa una alternativa amigable con el medioambiente para contribuir a la revalorización de los residuos sólidos orgánicos (Purkayastha & Sarkar, 2021; Amrul et al., 2022; Mahmood et al., 2021), es decir, la MSN presenta alto potencial para ser la base de un sistema de economía circular agroindustrial. En última instancia, el uso de la MSN para

la reducción y aprovechamiento de residuos orgánicos requiere una evaluación equilibrada de sus beneficios y riesgos, junto con una regulación efectiva para garantizar prácticas sostenibles y seguras.

2.3. Procesamiento y productos derivados de la Mosca Soldado Negra

La bioconversión de residuos orgánicos por medio de la MSN ofrece una amplia gama de posibilidades para el sector industrial (Figura 2). Actualmente, las LMSN son principalmente utilizadas para la alimentación de animales monogástricos (Joly & Nikiema, 2019), pudiéndose comercializar larvas vivas, larvas deshidratadas o larvas en forma de polvo, ya sea entero o desengrasado. Adicionalmente, Surendra et al. (2020) mencionan que los principales productos que se pueden obtener de la cría y procesamiento de las LMSN son: proteína (para obtener bioplásticos, hidrolizados proteicos y agentes emulsificantes), la grasa (útil para producir concentrados para animales, biodiesel y agentes lubricantes), la quitina (de la cual se puede obtener films comestibles, quitosano, aglutinantes e hilo quirúrgico), pigmentos extraídos de las moscas adultas, así como los residuos llamados "frass", de los que se obtiene fertilizantes orgánicos y biogás.

2.3.1. Procesamiento

Luego de que las larvas alcanzan el peso adecuado en la etapa de cría, se realiza una separación del excremento generado durante la digestión de las larvas y los restos de sustrato. Joly & Nikiema (2019) indican que la técnica utilizada para separar las LMSN del residuo de sustrato depende de la etapa en la que se encuentre el animal al ser cosechado, es decir, etapa larval o prepupal. Cuando la cosecha se lleva a cabo en la etapa prepupal, el método más común reportado en la literatura es la autocosecha, es decir, que las prepupas migran naturalmente del resto de sustrato para encontrar un sitio de pupación. Las prepupas son guiadas a un lugar determinado, generalmente a través de una rampa, para ser cosechadas. La ventaja de la autocosecha es que es un método simple y no intensivo en mano de obra (Joly & Nikiema, 2019). Por otro lado, para cosechar las larvas antes de que se conviertan en prepupas, se utiliza un tamiz, ya sea manual o automático (Dortmans et al., 2017).

Una vez cosechadas, las larvas requieren una etapa que asegure su inocuidad microbiológica, así como estabilidad para el transporte y almacenamiento. El escaldado es una opción para sacrificar las LMSN,

ya que no sólo reduce la carga microbiana en la biomasa y vacía el intestino de las larvas (Dortmans et al., 2017), sino que también es rápido y menos costoso, mitiga la oxidación de lípidos, aumenta la estabilidad del color y mejora el sabor (Larouche et al., 2019). Para realizar el escaldado, las larvas son sumergidas en agua hirviendo por 2 min (Dortmans et al., 2017).

No existe un consenso en cuanto a la mejor técnica de secado de LMSN antes de su procesamiento y/o almacenamiento, ya que existe una discrepancia en cuanto a las ventajas y desventajas de algunos de los protocolos de secado empleados (Hernández-Álvarez et al., 2021). En este contexto, el secado en horno y al sol son más populares que otros métodos como el secado por microondas, liofilización y al vacío. El secado en horno puede aplicarse en temperaturas >60 °C/2–12 h o hasta alcanzar una humedad ≤ 10% (Charlton et al., 2015; Dortmans et al., 2017; Joly & Nikiema, 2019). Sin embargo, una desventaja del secado por horneado y solar es que si se emplean temperaturas relativamente bajas (60–80 °C) se extiende el tiempo de deshidratación y no se garantiza una disminución significativa de algunos microorganismos como *Ascaris suum*, pero sí sobre *Salmonella* spp. (Lalander et al., 2013). Otra desventaja es que el secado a estas temperaturas puede ocasionar rancidez de los lípidos de las larvas, por lo que las propiedades tecnofuncionales y organolépticas de estas pueden verse afectadas negativamente.

En muchas ocasiones, después de la cosecha, el sacrificio y el secado, las LMSN se procesan mediante tratamientos térmicos (Hernández-Álvarez et al., 2021). Estos pueden ser el escaldado, cocción, ultrasonificación, tostado, ahumado y horneado a altas temperaturas (>105 °C). Con estos tratamientos se puede reducir la presencia de agentes microbianos, modificar el perfil nutricional, reducir los tiempos de deshidratación (cuando no se aplica un pretratamiento de secado) y conservar/generar características tecnofuncionales deseables (Hernández-Álvarez et al., 2021).

Las larvas deshidratadas (y en ocasiones tratadas térmicamente) pueden ser sometidas a una operación de extracción de lípidos, con el fin de optimizar su aplicación en alimentos animales. Esta extracción se puede realizar mecánicamente, por medio de una prensa o realizando una extracción química con éter de petróleo. El polvo desengrasado puede empacarse y comercializarse directamente.

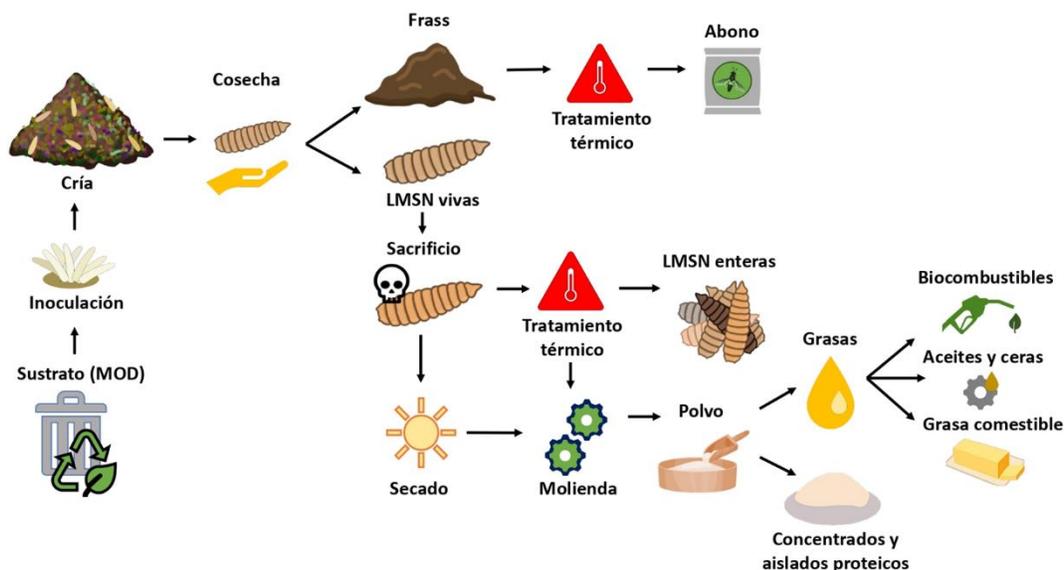


Figura 2. Opciones de procesamiento a la mosca soldado negra. MOD, materia orgánica en descomposición; LSMN, larvas de mosca soldado negra.

El aceite extraído se puede utilizar como ingrediente en concentrados animales o como biodiesel (Joly & Nikiema, 2019), sin embargo, debe de considerarse el fin para el que se requiere la fracción lipídica, ya que el uso de solventes orgánicos puede ser no adecuado para elaborar alimentos animales, pero sí para biocombustibles y resinas industriales, entre otros productos. Cuando existe un interés sobre la proteína es posible realizar etapas subsiguientes, como la molienda y la extracción acuosa por medio de precipitación por variación de pH, lo cual permite obtener desde concentrados hasta aislados con proporciones proteicas entre 50% a 90% (Bußler et al., 2016). Asimismo, Edah & Owolabi (2023) demostraron que la extrusión de LMSN desengrasadas (con reducción de 60% de grasa) es idónea para la producción de pellets que cuenten con mejores características de flotación adecuadas para la alimentación de peces.

2.3.2. Aplicaciones de la MSN para consumo animal

El aumento en el precio y la demanda de insumos para la alimentación animal, exacerbada sobre todo después de la pandemia de COVID-19, los conflictos bélicos de Europa Oriental y la llamada guerra comercial China-Estados Unidos, han ocasionado un aumento vertiginoso de los precios de la harina de pescado, la soya y los granos para forraje (Attia et al., 2023; Jia et al., 2022). Ante esta situación varios expertos han propuesto a los insectos como una fuente innovadora para suplir las necesidades nutricionales de los alimentos, debido principalmente a su alto contenido calórico, lipídico y proteico (Gasco et al., 2020; Ozhohanych et al.,

2023). Específicamente, la MSN se presenta como una excelente alternativa para la alimentación de animales debido a su alta capacidad como bioreciclador de MOD y la rapidez y facilidad de producción (Barragan-Fonseca et al., 2017).

Una de las principales aplicaciones que se propone para la MSN es su uso en la alimentación de peces, principalmente en la acuicultura. Al respecto, Muin & Taufek (2024) compararon el rendimiento del crecimiento de la tilapia híbrida roja al alimentarla con LMSN y harina de pescado. Los resultados demostraron que los peces alimentados con la dieta de LMSN exhibieron una ganancia de peso, una tasa de crecimiento específico, un índice de eficiencia proteica y un índice de conversión alimenticia significativamente mayores ($p < 0,05$) que los alimentados con harina de pescado.

Asimismo, Eide et al. (2024) concluyeron que la harina de LMSN es un ingrediente proteico alternativo adecuado en inclusiones de hasta al menos el 8% para el salmón del Atlántico en condiciones de acuicultura industrial. Los investigadores realizaron una prueba de alimentación para evaluar el impacto de LMSN en el crecimiento y la salud del salmón del Atlántico durante la fase de crecimiento en agua de mar, en un sitio comercial en el condado de Vestland, Noruega. Un total de 181.046 salmones del Atlántico post-smolt se distribuyeron en seis jaulas marinas duplicadas y se alimentaron con una de tres dietas (una dieta de control similar a la comercial y dos dietas de prueba que reemplazaban parcialmente el contenido de proteína de la dieta de control con 4% y 8% de harina LMSN desengrasada). Los resultados mostraron que la inclusión de

harina LMSN favoreció el crecimiento y no tuvo ningún efecto adverso en la salud intestinal de los peces. Además, no se atribuyó ningún cambio histopatológico a la ingesta de comida de LMSN. Asimismo, se demostró que la inclusión de LMSN modula los procesos metabólicos asociados con los lípidos, la respuesta a los estrógenos, la actividad de los receptores inmunes (a las quimiocinas), la fagocitosis y las vesículas extracelulares.

Los formuladores de dietas animales de cría y compañía también han comenzado a explorar la posibilidad de incluir a las LMSN como ingrediente alimenticio para satisfacer la demanda de los principales macro y micronutrientes (Barragan-Fonseca et al., 2017). En la mayoría de los casos se propone una sustitución parcial del concentrado animal con LMSN, ya que una sustitución completa no ha resultado en un crecimiento satisfactorio del animal (Barragan-Fonseca et al., 2017). Estos resultados pueden asociarse al alto contenido de grasas y ceniza de las LMSN, a la forma de procesamiento de las LMSN y los aminoácidos limitantes en las dietas específicas de cada animal (Barragan-Fonseca et al., 2017).

Los requerimientos nutricionales de los animales domésticos, incluyendo los de compañía y los de cría para alimentación, son muy variables y específicos entre sí (Tabla 4), por lo que es necesario considerar aspectos como la edad, el tamaño, el genotipo y el nivel de actividad físico de los individuos antes de la formulación (Castrica et al., 2018; Dzanis, 1994; NRC, 1994, 2006, 2007, 2011, 2016; Van Huis et al., 2013). Los criadores de animales entienden estas necesidades, por lo que las dietas son complementadas con diversas fuentes y también son modificadas conforme avanza el desarrollo de los animales.

Los formuladores de dietas animales de cría y compañía han comenzado a explorar la posibilidad de incluir a las LMSN como ingrediente alimenticio

para satisfacer la demanda de los principales macro y micronutrientes (Barragan-Fonseca et al., 2017). En la mayoría de los casos se propone una sustitución parcial del concentrado animal con LMSN, ya que una sustitución completa no ha resultado en un crecimiento satisfactorio del animal (Barragan-Fonseca et al., 2017). Como ejemplo de ello, en un estudio conducido por Facey et al. (2022) se sustituyó parcial o totalmente la dieta de pollos que consiste en maíz-soya por LMSN (0% - 100%) durante 49 días, resultando las dietas de 12,5% y 25% LMSN las que mostraron las mejores ganancias de peso en los pollos y las de 50 y 100% LMSN las menores. Estos resultados pueden asociarse al alto contenido de grasas y ceniza de las LMSN, a la forma de procesamiento de las LMSN y los requerimientos aminoacídicos de estos animales (Barragan-Fonseca et al., 2017; Facey et al., 2022). Sin embargo, debe de entenderse también que la composición nutricional de las LMSN está directamente relacionada con el tipo de sustrato alimenticio con el que se desarrollaron. La Tabla 5 muestra la composición nutricional de LMSN crecidas en cinco de los sustratos alimenticios más comunes. Como se puede apreciar, la harina de pescado permite que las LMSN contengan una mayor cantidad de proteína (42,50% bs), grasa (28,90% bs) y calcio (0,32% bs), pero el contenido de fibra es relativamente bajo (3,02% bs), por lo que una dieta basada mayormente en LMSN no es apta para reptiles y aves de compañía, cuyas demandas de fibra son de 30–80 g/kg, además de que sobrepasarían fácilmente los requerimientos dietarios de grasa (30–55 g/kg). A diferencia de reptiles y aves de compañía, para animales de cría, como cerdos, pollos de engorda y peces, las LMSN podría aportar la mayor parte de los requerimientos de proteína y grasa, independientemente del tipo de sustrato en el que se hayan desarrollado.

Tabla 4
Requerimientos nutricionales de algunas especies animales de compañía y cría

Especies animales	Requerimientos nutricionales (g/kg)					
	Proteínas	Grasas	Carbohidratos	Fibra	Calcio	Fósforo
<i>Animales de Compañía</i>						
Perros (adultos)	230–310	90–150	300–500	12–18	2,5–5	2,0–4,0
Gatos (adultos)	210–310	90–150	300–500	12–18	3,5–5,5	2,5–4,5
Tortugas (terrestres)	160–270	35–55	200–350	40–80	10–25	5–15
Iguana verde	120–240	30–50	400–600	60–80	5–20	4–10
Psitácidos	130–200	30–50	350–500	30–60	5–15	3–6
<i>Animales de Cría</i>						
Ganado (engorda)	80–110	30–50	500–600	10–20	1,0–1,5	0,8–1,2
Ovejas y cabras	80–120	25–40	500–600	20–30	1,5–2,0	1,0–1,5
Pollos (engorda)	160–220	25–40	400–500	10–20	3,0–5,0	2,0–4,0
Cerdos	130–160	30–60	400–500	10–20	1,2–1,5	1,0–1,2
Peces*	200–300	50–100	100–300	ND	5–20	3–10

ND, no disponible. Adaptado de Castrica et al. (2018); Dzanis (1994); NRC (1994, 2006, 2007, 2011, 2016) y Van Huis et al. (2013). *Tilapias (*Oreochromis* spp.) y truchas (*Salvelinus* spp. y *Oncorhynchus* spp.).

Tabla 5

Composición nutricional de larvas de mosca soldado negra alimentadas con diferentes tipos de sustratos

Sustrato alimenticio	Proporción de los principales nutrientes (% bs)					
	Proteína	Grasa	Fibra	Cenizas	Calcio	Fósforo
Harina de pescado	42.50	28.90	3.02	12.50	0.32	0.72
Salvado de trigo	42.22	18.05	12.68	7.15	0.12	0.12
Residuos de frutas y verduras (agroindustriales)	40.51	21.00	9.33	12.33	0.12	0.77
Alimentos para mascotas	39.89	22.22	9.17	10.89	0.13	0.69
Estiércol de ganado vacuno	42.34	20.39	11.67	14.35	0.14	0.92
Desperdicios de cocina	35.5	34.1	10.6*	13.2	ND	ND

% bs, porcentaje en base seca. ND, no disponible. Adaptado de [Kawasaki et al. \(2019\)](#), [Shumo et al. \(2019\)](#), [Nyakeri et al. \(2017\)](#), [Spranghers et al. \(2017\)](#), [Singh et al. \(2022\)](#), [Pérez-Pacheco et al. \(2022\)](#), [Surendra et al. \(2016\)](#), [Meng et al. \(2023\)](#) y [Diener et al. \(2009\)](#).

En cuanto a los beneficios de incorporar a las LMSN en dietas de herbívoros estrictos como el ganado vacuno, ovino-caprino y equino, algunas primeras exploraciones han mostrado que la digestibilidad y absorción de compuestos nitrogenados (como proteínas y péptidos) de dietas enriquecidas con LMSN para ganado vacuno son menores a las observadas en pollos y cerdos, mientras que la eficiencia en la conversión de fósforo fue considerablemente mayor que en pollos y cerdos ([Ooninx et al., 2015](#)). Por otra parte, la formación y liberación de amoníaco y metano se reducen drásticamente en comparación con ganado alimentado exclusivamente con alimentos de origen vegetal ([Jayanegara et al., 2017](#)).

Otros insectos como *Zophobas morio*, *Alphitobius diaperinus* y *Acheta domesticus* han mostrado también alto potencial para ser considerados como alimento para animales de granja ([Toral et al., 2022](#)), sin embargo, las ventajas ambientales y económicas que conlleva la utilización de la MSN para estos propósitos la colocan por encima de estas y otras especies entomológicas.

Aún existe un gran campo de estudio abierto para investigar el potencial de las LMSN como suplemento nutricional para animales de cría y de compañía. Por ejemplo, los sistemas experimentales de inoculaciones bacterianas en sustratos y en los propios tractos digestivos de LMSN han demostrado efectos directos sobre la respuesta inmunológica de estas, por lo que el campo de la inmunología nutricional es una de las áreas que puede tener un mayor impacto en el desarrollo de productos alimenticios con características idealizadas ([Vogel et al., 2018](#); [Li et al., 2021](#); [Keetanon et](#)

[al., 2023](#)). Como esta existen muchas otras investigaciones que requieren de más tiempo para que tengan resultados concluyentes.

2.3.3. Aplicaciones de los residuos de la LMSN como fertilizante orgánico

Una de las áreas de estudio más recurrentes en la bibliografía de los últimos 5 años sobre MSN es el entendimiento y aprovechamiento de la capacidad de las LMSN para digerir y transformar residuos orgánicos en compost de alta calidad con fines agrícolas ([Lopes et al., 2022](#)). Estos residuos pueden incluir desperdicios alimentarios, estiércol animal, desechos de jardín y otros materiales orgánicos.

Los desechos de la cría de LMSN, específicamente, el excremento junto con restos del sustrato e insectos muertos es un subproducto que está ganando popularidad debido a su alto contenido de compuestos orgánicos, nutrientes y potencial para su uso como fertilizante orgánico para cultivos ([Ooninx et al., 2015](#)), lo que cierra el ciclo de nutrientes y reduce la dependencia de los fertilizantes agroquímicos.

El "frass" (como es conocido en inglés) es definido por la Comisión de la Unión Europea como "una mezcla de excrementos derivados de insectos de cría, el sustrato de alimentación, partes de insectos, huevos muertos y con un contenido de insectos de cría muertos no superior al 5% en volumen ni superior al 3% en peso" (Reglamento de la Comisión (UE) 2021/1925). Este subproducto se puede empaquetar y vender como abono orgánico, siempre y cuando sea tratado térmicamente para reducir su carga microbiana. El alto contenido de nitrógeno y fósforo biodisponibles para la nutrición vegetal permite que el frass sea utilizado como suplemento o sustituto de los fertilizantes inorgánicos que se utilizan para la producción de diversos cultivos. Esta sustitución puede representar beneficios para los suelos, evitando problemas como la eutrofización ([Chavez & Uchanski, 2021](#)).

Diversos estudios comprueban la efectividad del frass como fertilizante orgánico para mejorar la salud de las plantas, aumentar el rendimiento de cultivos y la fertilidad del suelo. [Tanga et al. \(2021\)](#) evaluaron el uso del frass de LMSN (FLMSN) en la producción de maíz y obtuvieron un aumento del rendimiento de hasta un 212% en comparación con el fertilizante comercial Evergrow, mientras que un tratamiento combinando de FLMSN con fertilizante mineral resultó en un contenido de proteína y fibra mayor en el maíz comparado a los otros tratamientos evaluados. Por su parte, [Agustiyani et al. \(2021\)](#) evaluaron el efecto de la aplicación de FLMSN sobre el crecimiento de Pakchoi (*Brassica rapa* L.) y

obtuvieron una mayor biomasa en comparación con el control (sin fertilizante) y el fertilizante inorgánico.

Adicionalmente, se ha demostrado que el FLMSN puede reducir la incidencia de patógenos y enfermedades en las plantas, debido al alto contenido de quitina (Van Huis, 2020). Específicamente, el FLMSN ha sido propuesto como insecticida, pudiendo reducir las poblaciones del gusano minador o de alambre. Asimismo, estudios han demostrado la inhibición de *F. oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, *Trichoderma* spp., *Salmonella enterica* y *E. coli* (Chavez & Uchanski, 2021).

A pesar de que hay un consenso general de la efectividad del FLMSN como fertilizante orgánico de menor costo para la producción de diversos cultivos, se debe tomar en cuenta que los valores de minerales presentes en este subproducto están directamente relacionados al sustrato utilizado para la cría de LMSN. Gebremikael et al. (2022) evaluaron el efecto de FLMSN a partir de 7 sustratos sobre el crecimiento y la calidad del suelo del cultivo de maíz. Sus resultados indican que la disponibilidad de nitrógeno y la calidad microbiológica del suelo varían significativamente dependiendo del sustrato utilizado. Por lo tanto, aún se requiere más investigación para determinar cuáles son los sustratos óptimos para obtener la mayor calidad de FLMSN, sin afectar el rendimiento y la rentabilidad de una granja de MSN.

2.3.4. Aplicaciones con MSN más allá de la alimentación animal y la agroindustria

La MSN tiene un potencial interesante en la producción de biocombustibles (Purkayastha & Sarkar, 2021), ya que son capaces de digerir y transformar residuos orgánicos en aceites y grasas. Estos aceites y grasas pueden ser utilizados como materia prima para la producción de biocombustibles, como biodiesel. El biodiesel elaborado a partir de LMSN presenta ventajas sobre las fuentes vegetales para la producción de este biocombustible, como alto contenido lipídico, cosecha en corto tiempo, alta disponibilidad de material de partida, etc. Un reciente estudio bibliométrico sobre la MSN y el biodiesel muestra el estado actual de la investigación científica en torno al uso de este modelo biológico como una fuente multifacética para ayudar a mitigar las necesidades actuales y futuras en abastecimiento energético, concluyendo que más del 60% de los estudios en este campo se han venido realizando a partir del 2020 y que este puede ser un eslabón importante en la construcción de modelos de economía circular a diferentes escalas (Mangindaan et al., 2022).

Además, cuando se alimentan de estos materiales, generan excrementos ricos en nutrientes y descomponen la materia orgánica en el proceso. El residuo resultante, conocido como lodo de MSN, puede ser utilizado como sustrato para la producción de biogás a través de la digestión anaeróbica. Durante este proceso, bacterias descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, liberando metano que puede ser capturado y utilizado como fuente de energía (Papa et al., 2022). La producción de biogás a partir de residuos orgánicos con la ayuda de las LMSN ofrece una doble ventaja: manejo sostenible de residuos y generación de energía renovable (Papa et al., 2022; Wedwitschka et al., 2023). Sin embargo, es fundamental abordar los desafíos asociados, como la gestión adecuada de las poblaciones de moscas, la selección de residuos seguros y la mitigación de posibles impactos ambientales. La producción de biocombustibles con la MSN es una alternativa sostenible a los combustibles fósiles, que son una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes (Purkayastha & Sarkar, 2021; Singh & Kumari, 2019; Boakye-Yiadom et al., 2022).

Otra aplicación interesante de la MSN es su uso en la producción de bioplásticos (Setti et al., 2020). Los residuos generados por las LMSN pueden ser utilizados como fuente de materia prima para la producción de bioplásticos. Los bioplásticos son una alternativa sostenible a los plásticos convencionales, que son una fuente importante de contaminación ambiental. La producción de bioplásticos con la MSN es un proceso que utiliza menos energía y recursos que la producción de plásticos convencionales y con múltiples aplicaciones (Rosa et al., 2020; Setti et al., 2020). Además de las aplicaciones mencionadas, la MSN también tiene un potencial interesante en la producción de productos químicos y medicamentos (Xia et al., 2021; Choi et al., 2014). Las LMSN son capaces de sintetizar compuestos químicos con propiedades antibacterianas, antivirales y antifúngicas en la producción de agroinsumos y fármacos (Rehman et al., 2023; Liu et al., 2019). La utilización de la MSN en las áreas mencionadas puede contribuir significativamente a la transición hacia una economía circular y sostenible en la que se aprovechen los recursos de manera eficiente y minimizando el impacto ambiental.

2.4. Aseguramiento de la inocuidad

El riesgo de contaminación microbiana y químico asociado con el uso de MSN para bioconversión de residuos orgánicos en la alimentación animal no cuenta con consenso general, limitando así el uso de la biomasa MSN criada en una variedad de

desechos orgánicos a la alimentación animal (Gold et al., 2020). Sin embargo, varios estudios han demostrado que las LMSN poseen propiedades antimicrobianas y son capaces de reducir las bacterias patógenas como *Salmonella* spp. y *E. coli* en los sustratos, comúnmente encontrados en desechos orgánicos como heces humanas y animales (Liu et al., 2008). Al respecto, diversos estudios afirman que la cría de insectos en residuos orgánicos disminuye significativamente los patógenos (Liu et al., 2008; Lalander et al., 2013; Surendra et al., 2020). Aunque el tratamiento con MSN reduce las bacterias patógenas mencionadas, algunos estudios reportan presencia de *Salmonella* spp. y *Bacillus cereus* tanto en la biomasa MSN como en los residuos (Wynants et al., 2019). En esta misma línea, Vandeweyer et al. (2021) y Surendra et al. (2020) concluyeron que *Bacillus cereus* parece ser el mayor riesgo microbiano asociado a los insectos para consumo animal, incluida la MSN. Por otro lado, el tratamiento de los residuos con LMSN no tuvo efectos sobre los ooquistes o huevos de los parásitos como *Eimeria tenella*, *Eimeria nieschulzi* y *Ascaris suum*, según Muller et al. (2019). Por lo tanto, es necesario un pretratamiento adecuado antes de usar biomasa de MSN como alimento para animales y residuos como fertilizante, especialmente cuando se aplica para el cultivo de alimentos.

Asimismo, como se mencionó anteriormente, es recomendable incorporar pasos de sanitización y/o esterilización de las larvas o pupas de MSN previo a comenzar las etapas de procesamiento y transformación industrial. Esto podría garantizar una reducción considerable del riesgo por contaminación biológica, sin embargo, este preprocesamiento no garantiza una eliminación de sustancias químicas resistentes, como los metales pesados. Por lo que se requiere del desarrollo de otras técnicas para el manejo de estas y otras sustancias químicas presentes en MSN o subproductos derivados de estas.

La posible bioacumulación de metales pesados, pesticidas y productos farmacéuticos en las LMSN, provenientes de desechos orgánicos contaminados, es una preocupación que podría limitar el uso de la MSN y debe ser más estudiada (Surendra et al., 2020). Metales pesados ("heavy metals") y bioacumulación ("bioaccumulation") fueron también palabras recurrentes en el análisis bibliométrico (Material Suplementario 1). Hasta el momento, los estudios han señalado que las LMSN son capaces de bioacumular metales pesados como el cadmio, mercurio, cobre y plomo en cantidades que pueden generar efectos adversos en la salud de los

consumidores (Ooninx & Finke, 2020). No se ha observado acumulación de los metales pesados cromo, níquel, arsénico, zinc y mercurio.

Asimismo, diversos estudios han demostrado que no hay bioacumulación de micotoxinas (específicamente aflatoxinas B1/B2/G2, deoxinivalenol, ocratoxina A y zearalenona), de pesticidas ni de residuos farmacéuticos (Surendra et al., 2020). Es importante resaltar que los contaminantes químicos deben mantenerse en valores dentro de los límites establecidos por las autoridades correspondientes para no considerar a los productos de larvas de MSN como un alimento potencialmente tóxico y perjudicial para la población.

Otro aspecto que considerar en el caso de utilizar la MSN para consumo humano es que se ha reportado que los insectos pueden generar alergias, especialmente a personas que ya son alérgicas a otros organismos artrópodos como los camarones y otros crustáceos y ácaros (de Gier & Verhoecx, 2018; Pali-Schöll et al., 2019b). Esto se debe a una reacción cruzada, es decir, cuando los anticuerpos IgE producidos originalmente contra un alérgeno, se unen a otro alérgeno estructuralmente relacionado (Ribeiro et al., 2021). Específicamente, las proteínas de los artrópodos y moluscos que provocan alergias son la tropomiosina y la quinasa arginina. Delfino et al. (2024) investigaron la alergenicidad de dos variantes de tropomiosina identificadas en el genoma de MSN y producidas como proteínas recombinantes. Los experimentos de inmunotransferencia mostraron que ambas proteínas fueron reconocidas por el suero de pacientes alérgicos a los camarones o a los ácaros, lo que destaca el riesgo de reactividad cruzada. Por esta razón, la Plataforma Internacional de Insectos como Alimento Animal y Humano (IPIFF, por sus siglas en inglés) recomienda que los productos que contienen insectos incluyan en su etiqueta la indicación de que "personas alérgicas a los moluscos, crustáceos y/o ácaros pueden tener una reacción alérgica al consumir insectos" (IPIFF, 2019).

En general, en caso de que no se logre asegurar la inocuidad de la biomasa de MSN, Van Huis (2019a) propone que las larvas resultantes se pueden utilizar para usos no alimentarios como bioplásticos, biolubricantes o producción de biodiesel (Surendra et al., 2020).

2.5. Bioética durante la cría y el sacrificio

Los aspectos bioéticos sobre el manejo de animales de cría es un tema polémico en la actualidad, sin embargo, son pocas las investigaciones que existen en este ámbito para los insectos y otros invertebrados (Fiebelkorn et al., 2022). Esto se ve reflejado en

los resultados del análisis bibliométrico, ya que palabras clave como bioética o similares a esta, no destacaron o simplemente no aparecieron en la búsqueda, lo que indica una oportunidad para las investigaciones en este campo (**Material Suplementario 1**).

Debido a que los insectos de cría (incluyendo a la MSN) son sometidos a condiciones favorables para su desarrollo (de temperatura, iluminación, hidratación, alimentación, densidad, asepsia, etc.), sin la utilización de estimulantes de crecimiento como hormonas o suplementos alimenticios, estos pueden lograr obtener las características buscadas sin implicaciones bioéticas en el proceso (**Pali-Schöll et al., 2019a; Fiebelkorn et al., 2022**). Por ello, en la mayoría de los individuos, los mecanismos instintivos de nocicepción no son activados durante su manipulación durante todo el proceso de cría (**Eisemann et al., 1984; Delvendahl et al., 2022**).

Sin embargo, a diferencia de la cría, el sacrificio ofrece muchas maneras diferentes de activación de mecanismos de repulsión o nocicepción en los insectos. Esto debido a que dependiendo del tipo de sacrificio que se practique, será la activación de mecanismos innatos hacia la situación que enfrenten los individuos (**Van Huis, 2019b**). Para el sacrificio de MSN usualmente se aplica la ultracongelación (**Pali-Schöll et al., 2019a**). El enfriamiento rápido con N₂ líquido o la ultracongelación son técnicas que se usan comúnmente para el sacrificio de LMSN, pero para esto se requiere de insumos y equipos costosos en comparación con otras técnicas como las térmicas (**Pali-Schöll et al., 2019a**). Este método puede considerarse de mayor coste y de la utilización de equipos e insumos de difícil acceso, a comparación de métodos térmicos o de presión, pero los métodos por congelación son efectivos no solo para dar una muerte de manera rápida a las LMSN, sino que presenta grandes ventajas como la conservación del estado natural de algunos compuestos químicos de interés como grasas, quitina y proteínas (**Pali-Schöll et al., 2019a**).

Actualmente existen regulaciones de crianza y sacrificio para animales vertebrados y derechos animales a nivel internacional, nacionales y subnacionales, pero aún no hay legislaciones para insectos y otros artrópodos comestibles y para la alimentación más allá de cuestiones de bioseguridad y condiciones agroindustriales (**Žuk-Gołaszewska et al., 2022**). Sin embargo, se han comenzado a realizar algunos esfuerzos para garantizar el bienestar de los insectos con fines de alimentación humana y animal. En algunas legislaciones nacionales, como en Austria y Alemania, los insectos merecen consideraciones especiales en las que su crianza debe de estar libre

de sed, hambre, una alimentación inapropiada, estrés, inconvenientes físicos y fisiológicos, dolor (controvertible por su conceptualización en insectos), lesiones y enfermedades, pero sobre todo se debe de garantizar que no se limita su comportamiento natural (**APA, 2004; De Goede et al., 2013**). Aún existe un campo abierto para la investigación sobre el bienestar de insectos criados con fines entomofágicos y, debido a la gran diversidad de insectos comestibles (> 2,000 especies) y de las diferencias morfofisiológicas, requerimientos y necesidades de sus estados de desarrollo, no basta con estudios aislados y que se basen en generalidades (**De Goede, et al., 2013; Milburn, 2023**), sino que se deben de hacer investigaciones específicas que permitan conocer las implicaciones morales del manejo entomológico con fines alimenticios.

2.6. Mercado, legislación y aceptación de derivados de Mosca Soldado Negra

El análisis bibliométrico indica que existen áreas de oportunidad para estudios de mercado y la normatividad que deben de acompañar la integración de la MSN al sistema económico. Sin embargo, la aceptación pública de la MSN o sus derivados como un recurso alimenticio para humanos o animales, así como una vía para la bioconversión de residuos orgánicos en otras materias primas, sí ha sido objeto de estudio en los últimos 5 años, donde ya se cuenta con al menos tres docenas de publicaciones al respecto. A continuación, se presenta un panorama general sobre estos aspectos.

2.6.1. Mercado, comercialización y aspectos económicos

Actualmente existen diversos insectos que son de interés para el cultivo comercial, tales como los grillos *Acheta domesticus*, *Gryllus assimilis* y *Grillodes sigillatus*, y los gusanos de la harina *Tenebrio molitor* y *Zophobas morio* (**Surendra et al., 2020**). En efecto, la MSN actualmente es reconocida como la principal especie de artrópodo producido para su uso como alimentación animal en todo el mundo (**Tomberlin & Van Huis, 2020**). Este interés se ve reflejado en el aumento exponencial de las publicaciones científicas sobre MSN: 384 artículos de revistas fueron publicados del 2017 al 2019 y más de un millar desde el 2020, mientras que durante los 70 años anteriores (1946 – 2016) sólo se publicaron 137 artículos (**Surendra et al., 2020**). De hecho, **Tomberlin & Van Huis (2020)** reportan que hasta 1980, las publicaciones sobre MSN se referían a esta como una peste y no es hasta 1994 que se empieza a investigar acerca de sus beneficios como se conocen hoy. Además, acorde el portal BugsBurger

(www.bugsburger.se) más del 50% de las compañías en funcionamiento relacionadas con la cría de insectos para la alimentación animal funcionan entorno a la MSN.

Según la IPIFF, se han invertido más de \$1,000 millones de USD en la industria europea de insectos comestibles (IPIFF, 2019). En el año 2019, los miembros de la IPIFF produjeron más de 6000 t de proteína de insectos (Van Huis et al., 2021). **Meticulous Research (2022)** estimó que el valor del mercado de insectos comestibles en todo el mundo aumentaría a una tasa compuesta de crecimiento anual del 30,5% desde 2022 para alcanzar los 3960 millones de USD en 2033. Barclays estimó que el mercado de proteínas de insectos tendría un valor de hasta 8 mil millones de USD para 2030 (Barclays, 2021).

Alrededor del mundo operan diversas empresas en torno a la MSN (Figura 3A, 3B). Se han detectado al menos 66 empresas funcionando al momento de elaborar esta revisión, las cuales participan en el mercado con una amplia gama de servicios como asesoramiento técnico para el establecimiento de granjas de MSN (Figura 3C), proveyendo capacitaciones, enteramientos y certificaciones para la cría de MSN (p.ej. Proticycle, Insect School, Entocycle, FreezeM, Manna Insect, etc.). Otras empresas se han especializado en el establecimiento de granjas inteligentes, desarrollo tecnológico, generación de software, robotización y digitalización de granjas y criaderos de MSN y otros insectos comestibles a gran escala (p.ej. Cogastro, CoRoSect, Insect Engineers, Insectum, etc.). Destacan también las empresas avocadas hacia el manejo de residuos orgánicos de diferentes orígenes para su bioconversión (p.ej. River Road Research, Sarnergy). Sin embargo, la mayoría de las empresas que actualmente operan se desempeñan en un entorno mixto entre el desarrollo de productos e ingredientes alimenticios para animales de cría y compañía y la generación de fertilizantes y mejoradores de suelo (p.ej. Illucens, EntoSystem, Entocycle, Hermetia Bio Science, InsectiPro, etc.), con los que el aprovechamiento de la MSN es integral y se da valor agregado a materias que en otras industrias se consideran desechos o subproductos.

Fluker's Farm sobresale como la única empresa constituida en el siglo XX y que aún opera, pero esta es una empresa familiar que no se erigió bajo el esquema de la producción de la MSN, sino que la adoptó con el pasar de los años y aplicó su modelo de negocio sobre esta. El resto de empresas nacieron después del 2007 y mantuvieron un ritmo de crecimiento estable hasta el 2014. A partir del 2015 la tendencia de crecimiento fue sostenida y decayó hasta valores similares a los del 2013 con la

pandemia del COVID-19 (Figura 3B). Hasta nuestro conocimiento, es el primer reporte del escenario pre- y post-COVID-19 de la industria de la MSN. Este panorama contrasta con el de las investigaciones científicas entorno a la MSN, puesto que previo a la pandemia de COVID-19 (antes del 2020) se contaba con un acervo bibliográfico que rondaba las 700 publicaciones científicas, mientras que a partir del 2020 estas superan las más de 1200. Esto podría ser un indicador de que los incentivos financieros para investigación científica podrían ser mayores que los existentes para emprendedores, ya que son pocos los medios de financiación que existen en la actualidad para estimular la creación y seguimiento para empresas entomológicas y/o entomofágicas (Bermúdez-Serrano, 2020).

La mayoría de las empresas que operan actualmente se encuentran en Europa, Estados Unidos y Canadá (cerca del 60%), las cuales también ofrecen la mayor gama de servicios y productos. En Latinoamérica las empresas participan en el sector de la agrícola orgánica y en la producción de larvas para consumo animal, así como concentrados proteicos y aceites a partir de procesamientos relativamente sencillos de las LMSN, por lo que el establecimiento de empresas tecnológicas es una oportunidad latente para el mercado de la región. Llama la atención la ausencia global de empresas que estén colocando productos a base de MSN para el consumo humano.

2.6.2. Aspectos económicos de la producción y comercialización de MSN y derivados

Joly & Nikiema (2019) indican que el rendimiento económico de la tecnología de MSN varía sustancialmente dependiendo de la ubicación de la operación, los sustratos utilizados, la producción a gran escala y el uso previsto de los productos. Los principales parámetros que se reportan para evaluar la eficiencia de un proceso de bioconversión con MSN son: la tasa de reducción de desechos, la tasa de bioconversión, el peso promedio de las larvas o prepupas, el tiempo de desarrollo de las larvas y la tasa de conversión de sustrato a alimento. En este contexto, es importante tomar en cuenta que el rendimiento de un sistema de bioconversión con MSN depende principalmente del tipo de sustrato utilizado (Joly & Nikiema, 2019). Algunos estudios han demostrado que la tecnología de bioconversión con MSN actual está dominada por la operación en modo discontinuo utilizando el sistema de bandeja plana, el cual no sólo requiere de un intensivo uso de mano de obra, sino que también de un espacio sustancialmente superior al de otros insectos criados en granjas.

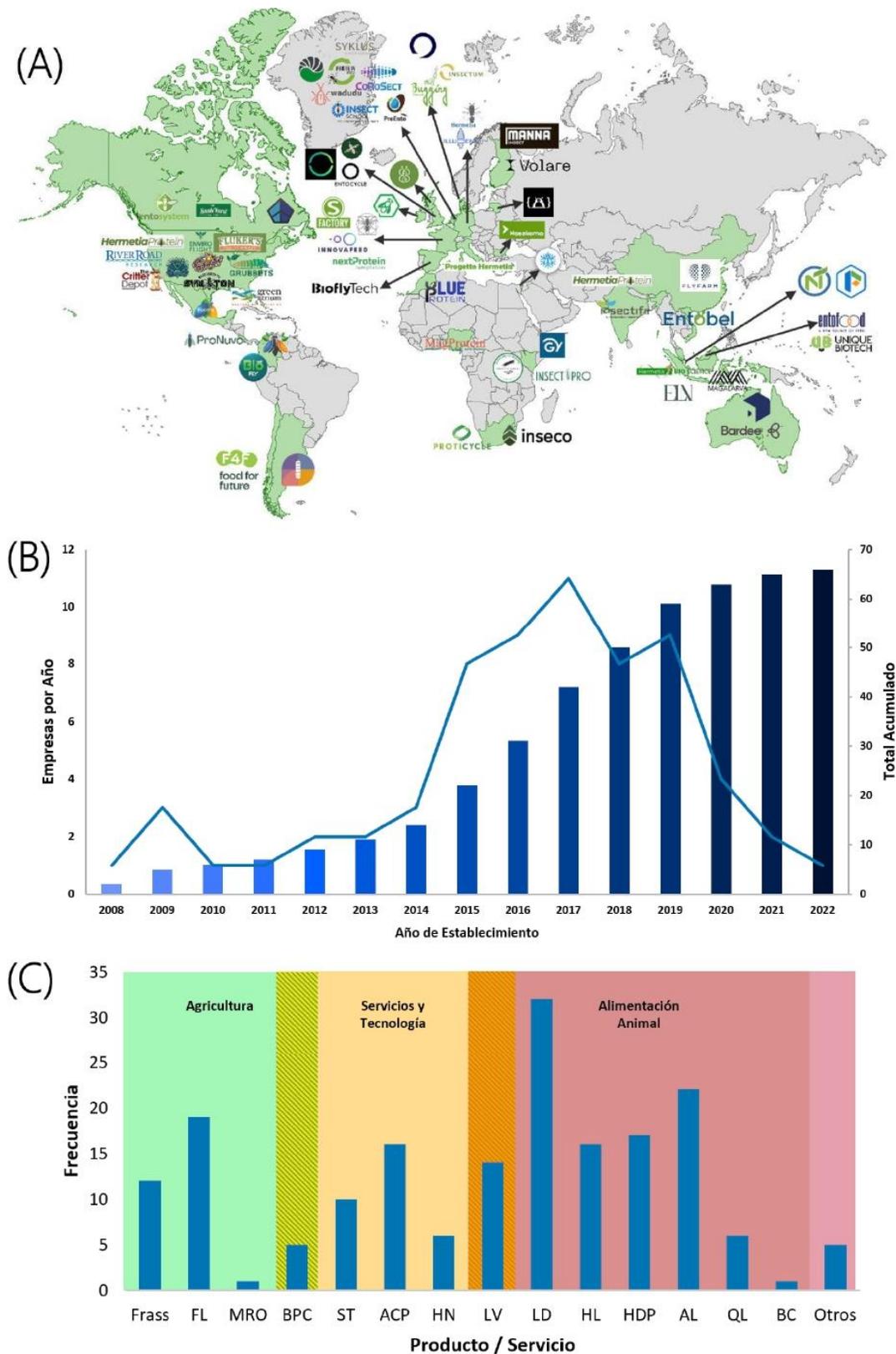


Figura 3. Empresas entorno a la mosca soldado negra. A). Empresas vigentes alrededor del mundo. B). Año de fundación de empresas en operaciones en el último trimestre del 2023. La línea azul indica las empresas constituidas por año; las barras representan el acumulado de empresas vigentes a finales del 2023. C) Frecuencia en los servicios y productos ofrecidos por las empresas. FL, fertilizante; MRO, manejo de residuos orgánicos; BPC, biomasa, pellets, composta; ST, software y tecnología; ACP, asistencia, capacitación, pie de cría; HN, huevos y neonatos; LV, larvas vivas; LD, larvas deshidratadas; HL, harina; HDP, harina desgrasada/proteica; AL, aceite; QL, quitina-quitosano; BC, biocombustibles; Otros, melanina, pienso, puré.

Esto hace que la biomasa de MSN tenga un mayor costo que la alimentación animal convencional, como la harina de pescado y la harina de soya (Caruso et al., 2013; Pleissner & Smetana, 2019). En este sentido, Drew & Pieterse (2015) sugieren que, para alcanzar la rentabilidad, una operación de MSN tiene que alcanzar una escala de conversión de aproximadamente 110 toneladas al día de sustrato alimenticio en 7,72 toneladas de polvo de MSN y el costo por tonelada no debería exceder los \$907 USD (\$1000 USD por ton métrica de biomasa de MSN). Sin embargo, actualmente se reporta que, para una instalación que convierte 53,6 toneladas de residuos húmedos de alimentos en 3,64 toneladas de prepupas secas y 6,35 toneladas de fertilizante seco por día, la operación por sí sola costará \$5,850 USD por día, es decir, unos \$1600 USD por tonelada de prepupas secas (Pleissner & Smetana, 2019).

En general, no existen muchos estudios que analicen la eficiencia y rentabilidad de un proceso de bioconversión con MSN. Sin embargo, Beesigamukama et al. (2021) demostraron que la combinación de producción de LMSN y "frass" aumenta considerablemente los ingresos para los productores. La baja disponibilidad de información podría deberse al secretismo característico de los productores de insectos, quienes son cautelosos con la revelación de datos económicos, con el argumento de mantener su ventaja competitiva (Zurbrügg et al., 2018; Van Huis, 2020).

2.6.3. Marco regulatorio y legal

Aunque el sector de insectos comestibles ha experimentado un crecimiento notable en los últimos años, con un enfoque particular en la producción de mosca soldado negra (MSN), la legislación emerge como una de las principales barreras que obstaculizan la expansión de los insectos como fuente de alimento tanto para humanos como para animales (Surendra et al., 2020; Van Huis, 2020). Alagappan et al. (2021) revisaron la legislación aplicable a la MSN en diferentes regiones del mundo y concluyeron que la Unión Europea, Australia, Canadá y EUA permiten específicamente el comercio y fabricación de MSN como alimento bajo condiciones específicas. Mientras que, paradójicamente, la mayoría de los países donde la entomofagia es una tradición, carecen de normativa específica en cuanto a su uso como pienso y/o actualmente se encuentran redactando marcos normativos.

En la Unión Europea, las larvas y prepupas de MSN están permitidas como alimento para mascotas y peces siempre y cuando sean criados en materiales de origen vegetal. Las grasas derivadas de insectos,

así como los insectos vivos están permitidas (IPIFF, 2019; Van Huis, 2020). Sin embargo, no se permiten sustratos de estiércol animal, residuos de restaurantes y antiguos alimentos (como carne y pescado) para la cría de insectos (Van Huis, 2020). En abril del 2021, la Comisión Europea autorizó las proteínas de insectos en la alimentación de aves de corral y cerdos cuando se crían sobre sustratos de origen vegetal o con residuos vegetales, lácteos o de huevo (IPIFF, 2022), lo que abrió nuevas posibilidades de comercialización para la MSN en esta región.

En Estados Unidos, la alimentación de animales de granja y mascotas se regula de forma conjunta por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, Food and Drugs Administration) y la Asociación Estadounidense de Control de Alimentos Oficiales (AAFCO, Association of American Food Control Officials) permiten el uso de polvo seco o LMSN como alimento acuícola, para aves (de corral y mascotas) y cerdos (Sogari et al., 2022a; Alagappan et al., 2021).

En Asia, la biomasa de MSN puede ser producida en una variedad de residuos orgánicos y utilizado como alimento para una gran cantidad de animales (Surendra et al., 2020). Sin embargo, las normas específicas en estas naciones no son transparentes para los autores y requieren pericia regulatoria para interpretarse. Una situación similar ocurre en varios países de África y Latinoamérica, ya que, de acuerdo con los resultados de Alagappan et al. (2021), la MSN es utilizada como alimento animal, pero no existen regulaciones específicas para esta especie. Sin embargo, en Brasil, la empresa Nutrinsecta registró a la MSN como "insecto deshidratado" ante el Ministerio de Agricultura y Ganadería para uso como alimento de pollos (Alagappan et al., 2021). Este es el primer paso en la región latinoamericana para sentar las bases la regulación en el uso de productos de MSN como insumo agropecuario, sin embargo, aún se requiere de mayor claridad y estandarización regulatoria para permitir el uso de la MSN y sus derivados como alimento animal y humano en la región y el resto del mundo.

2.6.4. Aceptación del público

Uno de los grandes retos a los que se enfrenta la popularización del consumo de productos de MSN, y de los insectos comestibles en general, es el posible rechazo de los consumidores por circunstancias como la repulsión y la neofobia, especialmente al tratarse de utilizarlos como ingredientes alimenticios (Van Huis, 2020). Por las implicaciones en la producción y cría de MSN, la utilización de esta y sus derivados para el consumo humano es más

limitada que la de otras especies de insectos comestibles como *A. domesticus* y *T. molitor*. Sin embargo, parece existir mayor aceptación cuando se trata de utilizar insectos para consumo animal, así, por ejemplo, el proyecto PROteINSECT, financiado por la Unión Europea, llevó a cabo una encuesta de percepción en la que participaron 2400 consumidores de más de 70 países, donde el 70% de los encuestados opinan que los insectos son una fuente adecuada de proteínas para alimentar a los animales (PROteINSECT, 2016). Asimismo, **Ankamah-Yeboah et al. (2018)** mostraron que sería probable que los encuestados alemanes consuman pescado alimentado con insectos comestibles, si el precio es asequible.

Un estudio realizado por **Bazoche & Poret (2021)** donde se informaba a la población objetivo sobre los efectos negativos de la sobrepesca para la producción de harina para la acuicultura y sobre la utilización de insectos comestibles como alternativa alimenticia para este sistema, concluyó que los consumidores de peces criados están interesados en adquirir pescado alimentado con insectos comestibles. La población informada sobre el tema mostró una aceptabilidad del 76%, sobre un 64% de aceptabilidad en población que no fue informada con este tema. La población masculina y personas con baja neofobia alimentaria mostraron mayor disposición a comer pescado alimentado con insectos comestibles. Por otro lado, **Sogari et al. (2022a)** encontraron que el interés en los problemas ambientales y la actitud positiva hacia el bienestar animal influyen más en la aceptabilidad de productos cárnicos de animales alimentados con insectos comestibles que el propio precio de los productos.

En general, existen pocos estudios relacionados con la preferencia del consumidor por los insectos comestibles como alimento animal, en comparación con la cantidad de estudios existentes sobre la aceptabilidad de los insectos como alimento para humanos. Esto probablemente se deba a que el alimento usado para criar animales no se indica en las etiquetas del producto final (**Sogari et al., 2022a**). Sin embargo, los autores indican que en el futuro esta información podría ser un diferenciador de compra. Es importante recalcar que, según **Sogari et al. (2022b)**, la aceptación de los consumidores no obstaculiza el crecimiento del mercado de derivados animales alimentados con insectos comestibles, pero existen múltiples factores que deben tenerse en cuenta, como las condiciones cría, tratamiento, bioseguridad, etc. Mientras que factores como el precio, conocimientos previos e información proporcionada, características sociodemográficas y el sabor de la carne o pescado derivado de animales

alimentados con insectos comestibles son aspectos que considerar al incursionar en el mercado alimentario.

3. Desafíos actuales y futuros

Actualmente los dos principales obstáculos que impiden la expansión a escala industrial de la MSN son: 1) las patentes existentes de las técnicas de producción que impiden el uso de dichos métodos por parte de otras empresas y 2) la falta de infraestructura fácilmente disponible, así como la tecnología adicional para explorar tales esfuerzos (**Surendra et al., 2020**). Como consecuencia, el precio del polvo de LMSN no ha logrado ser competitivo con las harinas de pescado y de soya (**Surendra et al., 2020**). Los autores afirman que la disminución del precio se podría lograr mediante el uso de residuos orgánicos de bajo valor comercial (p.ej., estiércol animal), la producción a gran escala y la automatización con internet de las cosas. Otra recomendación para comercializar el polvo de MSN a un mejor precio es que estos tengan beneficios adicionales para la salud de humanos o animales. Algunos de los compuestos de los insectos que promueven la salud son la quitina, ácidos grasos y proteínas con propiedades antimicrobianas como las fenoloxidasas y con actividad enzimática, como como amilasa y tripsina (**Surendra et al., 2020**). Por lo que destacar estos atributos podría mejorar la imagen pública y, por ende, aumentar la aceptación de productos derivados de la MSN.

Una posible amenaza para la expansión de la bioconversión de residuos con MSN es que se requieren dos ciclos de conversión: el primero, de productos orgánicos a insectos y el segundo, de insectos (como alimento) a los animales de producción. Sin embargo, actualmente existe un interés en la utilización directa de residuos con bajo costo de oportunidad como los residuos de alimentos, subproductos del procesamiento de alimentos y pastos (**Van Huis, 2020**). Al implicar dos ciclos de conversión, la utilización de la MSN podría ser más cara, por lo que es importante tomar en cuenta los beneficios adicionales de una alimentación con subproductos de MSN para que estos sean competitivos. Al respecto, **Surendra et al. (2020)** proponen como solución que la industria se asocie con la academia para llevar a cabo las investigaciones requeridas respetando la confidencialidad de los productores.

4. Conclusiones

El creciente número de publicaciones entorno a la MSN es un reflejo del gran interés que esta especie despierta en la comunidad científica de múltiples

disciplinas alrededor del mundo. El papel de la MSN como bioconvertor sostenible de desechos orgánicos en biomasa con valor agregado la destacan sobre otros modelos biológicos. Esto permite augurar un futuro promisorio para esta especie como parte de los sistemas de economía circular de múltiples sectores, como la agroindustria y las bioenergías. La bioseguridad se asoma como una de las preocupaciones principales para adoptar a la MSN como parte de la industria alimentaria, ya que se requieren de más estudios para garantizar que bajo procedimientos estandarizados se garantice la inocuidad ante agentes biológicos y químicos. A pesar de que la pandemia por COVID-19 mostró la vulnerabilidad de las empresas que trabajan con MSN, la falta de regulaciones y de aceptación popular son la principal barrera para la inserción y la sostenibilidad al mediano y largo plazo de la MSN en los sistemas económicos vigentes y emergentes. La integración de la sociedad, la industria, la academia y los gobiernos es indispensable para alcanzar este hito.

Agradecimientos

Los autores agradecemos al Proyecto B9611– Consumo de insectos y su aplicación en matrices alimentarias en costa rica: retos y oportunidades de una estrategia potencial para el fortalecimiento de la seguridad alimentaria nacional de la Universidad de Costa Rica por el soporte en la cofinanciación del presente trabajo de investigación. De igual manera al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología por la Beca Posdoctoral No. 3882867.

ORCID

I. M. Bermúdez-Serrano  <https://orcid.org/0000-0002-3516-6751>
O. A. Sánchez-Velázquez  <https://orcid.org/0000-0002-6129-671X>

Referencias bibliográficas

- Agustiyani, D., Agandi, R., Arinafril, A., Nugroho, A. and Antonius, S. 2021. The effect of application of compost and frass from Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens* L.) on growth of Pakchoi (*Brassica rapa* L.). *Earth and Environmental Science*, 762 (1): 012036.
- Alagappan, S., Rowland, D., Barwell, R., Mantilla, S.M.O., Mikkelsen, D., James, P., Yarger, O., & Hoffman, L.C. (2022). Legislative landscape of black soldier fly (*Hermetia illucens*) as feed. *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(4), 343-355.
- Amrul, N.F., Kabir Ahmad, I., Ahmad Basri, N.E., Suja, F., Abdul Jalil, N.A., & Azman, N.A. (2022). A Review of Organic Waste Treatment Using Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*). *Sustainability*, 14(8), 4565
- Ankamah-Yeboah, I., Jacobsen, J.B., & Olsen, S.B. (2018). Innovating out of the fishmeal trap: The role of insect-based fish feed in consumers' preferences for fish attributes. *British Food Journal*.
- APA, Animal Protection Act. (2004). Federal Act on the Protection of Animals (Tier- schutzgesetz – TSchG), Federal Law Gazette I no 118/2004, Art. 2, in its current version.
- Attia, Y. A., Bovera, F., Asiry, K. A., Alqurashi, S., & Alrefaei, M. S. (2023). Fish and Black Soldier Fly Meals as Partial Replacements for Soybean Meal Can Affect Sustainability of Productive Performance, Blood Constituents, Gut Microbiota, and Nutrient Excretion of Broiler Chickens. *Animals*, 13(17), 2759.
- Bárcena-Ibarra, A., Samaniego, J., Peres, W., & Alatorre, J. E. (2020). La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿ seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?. CEPAL.
- Barclays. 2021. Insect protein: bitten by the bug. Barclays, London, UK. Consultado en diciembre 2022. Disponible en: <https://www.investmentbank.barclays.com/our-insights/insect-protein-bitten-by-the-bug.html>
- Barragan-Fonseca K., Dicke, M. & van Loon, 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.
- Bazoche, P., & Poret, S. (2021). Acceptability of insects in animal feed: A survey of French consumers. *Journal of Consumer Behaviour*, 20(2), 251-270.
- Beesigamukama, D., Mochoge, B., Korir, N., Menale, K., Muriithi, B., Kidoido, M., Kirscht, H., Diiro, G., Ghemoh, C.J., Sevgan, S., Nakumbugwe, D., Musyoka, M.W., Ekesi, S. & Tanga, C. M. (2022). Economic and ecological values of frass 586fertilizer from black soldier fly agro-industrial waste processing. *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(3), 245-254.
- Bermúdez-Serrano, I. M. (2020). Challenges and opportunities for the development of an edible insect food industry in Latin America. *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(5), 537-556.
- Bessa, L. W., Pieterse, E., Marais, J., & Hoffman, L.C. (2020). Why for feed and not for human consumption? The black soldier fly larvae. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(5), 2747-2763.
- Boakye-Yiadom, K. A., Ilari, A., & Duca, D. (2022). Greenhouse Gas Emissions and Life Cycle Assessment on the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* L.). *Sustainability*, 14(16), 10456.
- BuBler, S., Rumpold, B.A., Jander, E., Rawel, H.M., & Schlüter, O.K. (2016). Recovery and techno-functionality of flours and proteins from two edible insect species: Meal worm (*Tenebrio molitor*) and black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *Heliyon*, 2(12), e00218.
- Caligiani, A. Marseglia, A., Leni, G., Baldassarre, S., Maistrello, L., Dossena, A., & Sforza, S. (2018). Composition of black soldier fly prepupae and systematic approaches for extraction and fractionation of proteins, lipids and chitin. *Food Research International*, 105, 812 – 820.
- Caligiani, A., Marseglia, A., Sorci, A., Bonzanini, F., Lolli, V., Maistrello, L., & Sforza, S. (2019). Influence of the killing method of the black soldier fly on its lipid composition. *Food Research International*, 116, 276 – 282.
- Cammak, J. & Tomberlin, J. (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.
- Cammack, J.A., Miranda, C.D., Jordan, H.R., & Tomberlin, J.K. (2021). Upcycling of manure with insects: current and future prospects. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 605-619.
- Caruso, D., Devic, E., Subamia, I. W., Talamond, P., & Baras, E. (2013). Technical handbook of domestication and production of diptera Black Soldier Fly (BSF) *Hermetia illucens*, Stratiomyidae. *IRD editions, Bogor*.
- Castrica, M., Tedesco, D. E., Panseri, S., Ferrazzi, G., Ventura, V., Frisio, D. G., & Balzaretto, C. M. (2018). Pet food as the most concrete strategy for using food waste as feedstuff within the European context: A feasibility study. *Sustainability*, 10(6), 2035.
- Charlton, A. J., Dickinson, M., Wakefield, M. E., Fitches, E., Kenis, M., Han, R., ... & Smith, R. (2015). Exploring the chemical safety of fly larvae as a source of protein for animal feed. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(1), 7-16.
- Chavez, M. & Uchanski, M. (2021). Insect left-over substrate as plant fertiliser. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5): 683-694.

- Choi, W. H., & Jiang, M. (2014). Evaluation of antibacterial activity of hexanedioic acid isolated from *Hermetia illucens* larvae. *Journal of Applied Biomedicine*, 12(3), 179-189.
- Da Silva, G.D.P., & Hesselberg, T. (2020). A review of the use of black soldier fly larvae, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), to compost organic waste in tropical regions. *Neotropical Entomology*, 49(2), 151-162
- Delvendahl, N., Rumpold, B. A., & Langen, N. (2022). Edible insects as food–insect welfare and ethical aspects from a consumer perspective. *Insects*, 13(2), 121.
- de Gier, S., & Verhoeckx, K. (2018). Insect (food) allergy and allergens. *Molecular Immunology*, 100, 82-106
- De Goede, D. M., Erens, J., Kapsomenou, E., & Peters, M. (2013). Large scale insect rearing and animal welfare. In: The ethics of consumption, eds. H. Rocklinsberg, P. Sandin, 236–42. Wageningen:Wageningen Academic Publishers.
- Delfino, D., Prandi, B., Ridolo, E., Dellafiora, L., Pedroni, L., Nicoletta, F., ... & Folli, C. (2024). Allergenicity of tropomyosin variants identified in the edible insect *Hermetia illucens* (black soldier fly). *Food Chemistry*, 437, 137849.
- Diener, S., Zurbrügg, C., & Tockner, K. (2009). Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates. *Waste Management & Research*, 27(6), 603-610.
- Dortmans B., Egger J., Diener S. & Zurbrügg C. (2021) *Black Soldier Fly Biowaste Processing – A Step-by-Step Guide, 2nd Edition*. Dübendorf, Suiza: Eawag – Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
- Dortmans, B.M.A., 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. *Dübendorf, Switzerland*, 100.
- Drew, D.J.W., & Pieterse, E. (2015). Markets, money, and maggots. *Journal of Insects as Food Feed*, 1, 227–231.
- Dzanic, D. A. (1994). The Association of American Feed Control Officials dog and cat food nutrient profiles: Substantiation of nutritional adequacy of complete and balanced pet foods in the United States. *The Journal of nutrition*, 124(suppl_12), 2535S-2539S.
- Edah, B. & Owolabi, O.D. Physical properties of defatted and extruded black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae-based aqua-feed using a twin-screw extruder. (2023). *Discov Food*, 3(14).
- Eide, L. H., Rocha, S. D., Morales-Lange, B., Kuiper, R. V., Dale, O. B., Djordjevic, B., ... & Øverland, M. (2024). Black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) meal is a viable protein source for Atlantic salmon (*Salmo salar*) during a large-scale controlled field trial under commercial-like conditions. *Aquaculture*, 579, 740194
- Eisemann, C. H., Jorgensen, W. K., Merritt, D. J., Rice, M. J., Cribb, B. W., Webb, P. D., & Zalucki, M. P. (1984). Do insects feel pain? A biological view. *Experientia*, 40(2), 164-167.
- Eldridge, D. J., Poore, A. G., Ruiz-Colmenero, M., Letnic, M., Soliveres, S. (2016). Ecosystem structure, function, and composition in rangelands are negatively affected by livestock grazing. *Ecol Appl*, 26(4), 1273-1283.
- Facey, H., Kithama, M., Mohamadigheisar, M., Huber, L. A., Shoveller, A. K., & Kiarie, E. G. (2023). Complete replacement of soybean meal with black soldier fly larvae meal in feeding program for broiler chickens from placement through to 49 days of age reduced growth performance and altered organs morphology. *Poultry Science*, 102(1), 102293.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). Disponible en: <https://www.fao.org/gleam/results/es/>. Consultado el: 02 noviembre del 2022.
- Fiebelkorn, F., Dupont, J., & Lammers, P. (2022). Acceptance of insects and in vitro meat as a sustainable meat substitute in Germany: in search of the decisive nutritional-psychological factors. In *Bioeconomy and Sustainability* (pp. 77-92). Springer, Cham
- Gasco, L., Acuti, G., Bani, P., Dalle Zotte, A., Danieli, P. P., De Angelis, A., ... & Roncarati, A. (2020). Insect and fish by-products as sustainable alternatives to conventional animal proteins in animal nutrition. *Italian Journal of Animal Science*, 19(1), 360-372.
- Gebremikael, M. T., Wickeren, N., Hosseini, P. S., De Neve, S. (2022). The Impacts of Black Soldier Fly Frass on Nitrogen Availability, Microbial Activities, C Sequestration, and Plant Growth. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 6: 795950
- Gligorescu, A., Toft, S., Hauggaard-Nielsen, H., Axelsen, J. A., & Nielsen, S. A. (2018). Development, metabolism and nutrient composition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*; Diptera: Stratiomyidae) in relation to temperature and diet. *Journal of Insects as Food and Feed*, 4(2), 123–133.
- Gomez-San Juan, M., Harnett, S., & Albinelli, I. (2022). *Sustainable and circular bioeconomy in the climate agenda: Opportunities to transform agrifood systems*. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc2668en>
- Gold, M., Cassar, C.M., Zurbrugg, C., Kreuzer, M., Boulos, S., Diener, S., & Mathys, A. (2020). Biowaste treatment with black soldier fly larvae: Increasing performance through the formulation of biowaste based on protein and carbohydrates. *Waste Management*, 102, 319–329.
- Hernández-Álvarez, A. J., Mondor, M., Piña-Domínguez, I. A., Sánchez-Velázquez, O. A., & Melgar Lalanne, G. (2021). Drying technologies for edible insects and their derived ingredients. *Drying Technology*, 39(13), 1991-2009.
- Ioannou, T., Bazigou, K., Katsigianni, A., Fotiadis, M., Chroni, C., Manios, T., Daliakopoulos, I.N., Tsompanidis, C., Michalodimitraki, E., & Lasaridi, K. (2022). The A2Ufood Training Kit: Participatory Workshops to Minimize Food Loss and Waste. *Sustainability*, 14, 2446.
- IPIFF, International Platform of Insects for food and feed. (2019). Guidance: the provision of food information to consumers, edible insect-based products. Accessed 22 Nov 2022. Available in: <https://ipiff.org/wp-content/uploads/2019/09/FIC-doc.pdf>
- IPIFF, International Platform of Insects for food and feed. (2022). EU Legislation. Accessed 8 March 2023. Available in: <https://ipiff.org/insects-eu-legislation/>
- Jayanegara, A., Novandri, B., Yantina, N., & Ridla, M. (2017). Use of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) to substitute soybean meal in ruminant diet: An in vitro rumen fermentation study. *Veterinary world*, 10(12), 1439.
- Jia, S., Li, X., He, W., & Wu, G. (2022). Protein-sourced feedstuffs for aquatic animals in nutrition research and aquaculture. *Recent Advances in Animal Nutrition and Metabolism*, 237-261.
- Joly, G., & Nikiema, J. (2019). Global experiences on waste processing with black soldier fly (*Hermetia illucens*): from technology to business. *Iwmi*, 16.
- Kawasaki, K., Hashimoto, Y., Hori, A., Kawasaki, T., Hirayasu, H., Iwase, S. I., ... & Fujitani, Y. (2019). Evaluation of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae and pre-pupae raised on household organic waste, as potential ingredients for poultry feed. *Animals*, 9(3), 98.
- Keetanon, A., Chuchird, N., Phansawat, P., Kitsanayanyong, L., Chou, C. C., Verstraete, P., ... & Rairat, T. (2023). Effects of black soldier fly larval meal on the growth performance, survival, immune responses, and resistance to *Vibrio parahaemolyticus* infection of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture International*, 1-16.
- Khanal, P., Pandey, D., Næss, G., Cabrita, A. R., Fonseca, A. J., Maia, M. R., et al. (2023). Yellow mealworms (*Tenebrio molitor*) as an alternative animal feed source: A comprehensive characterization of nutritional values and the larval gut microbiome. *Journal of Cleaner Production*, 389, 136104.

- Lalander, C., Diener, S., Magri, M.E., Zurbrügg, C., Lindström, A., & Vinnerås, B. (2013). Faecal sludge management with the larvae of the black soldier fly (*Hermetia illucens*)—From a hygiene aspect. *Science of the Total Environment*, 458, 312-318.
- Lalander, C., Ermolaev, E., Wiklicky, V., & Vinnerås, B. (2020). Process efficiency and ventilation requirement in black soldier fly larvae composting of substrates with high water content. *Science of The Total Environment*, 729, 138968.
- Larouche, J., Deschamps, M.-H., Saucier, L., Lebeuf, Y., Doyen, A., & Vandenberg, G. W. (2019). Effects of Killing Methods on Lipid Oxidation, Colour and Microbial Load of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae. *Animals*, 9(4), 182.
- Leal Filho, W., Vidal, D. G., & Dinis, M. A. P. (Eds.). (2023). *Climate Change and Health Hazards: Addressing Hazards to Human and Environmental Health from a Changing Climate*. Springer Nature.
- Leng, J., Sha, W., Lin, Z., Jing, J., Liu, Q., & Chen, X. (2022). Blockchain smart contract pyramid-driven multi-agent autonomous process control for resilient individualised manufacturing towards Industry 5.0. *International Journal of Production Research*, 1-20.
- Li, X., Zhou, S., Zhang, J., Zhou, Z., & Xiong, Q. (2021). Directional changes in the intestinal bacterial community in black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *Animals*, 11(12), 3475.
- Liu, C., Wang, C., & Yao, H. (2019). Comprehensive resource utilization of waste using the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.))(Diptera: Stratiomyidae). *Animals*, 9(6), 349.
- Liu, X., Chen, X., Wang, H., Yang, Q., Ur Rehman, K., Li, W., Cai, M., Li, Q., Mazza, L. & Zheng, L. (2017). Dynamic changes of nutrient composition throughout the entire life cycle of black soldier fly. *PLOS ONE*, 12(8), e0182601.
- Lopes, I. G., Yong, J. W., & Lalander, C. (2022). Frass derived from black soldier fly larvae treatment of biodegradable wastes. A critical review and future perspectives. *Waste Management*, 142, 65-76.
- Lu, S.; Taethaisong, N.; Meethip, W.; Surakhunthod, J.; Sinpru, B.; Sroichak, T.; Archa, P.; Thongpea, S.; Paengkoum, S.; Purba, R.A.P.; Paengkoum, P. (2022). Nutritional Composition of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens* L.) and Its Potential Uses as Alternative Protein Sources in Animal Diets: A Review. *Insects*, 13, 831. <https://doi.org/10.3390/insects13090831>
- Luperdi, A.P., Flores-Calla, S.S., Barriga, X.J., Rivera, V., Salazar, I., Manrique, P.L. and Reátegui, J.E. (2023). Bioprocessing of organic wastes from poultry and bovine slaughterhouses as food substrate for *Hermetia illucens* larval development. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 9(1), 31-42.
- Mahmood, S., Zurbrügg, C., Tabinda, A. Ali, A. & Ashraf, A. (2021). Sustainable Waste Management at Household Level with Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*). *Sustainability*, 13, 9722.
- Mangindaan, D., Kaburuan, E.R., & Meindrawan, B. (2022). Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*) for Biodiesel and/or Animal Feed as a Solution for Waste-Food-Energy Nexus: Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 14(21), 13993.
- Meng, L., Ma, L., Xu, J., Rong, K., Peng, N., & Zhao, S. (2023). Effect of enzyme-assisted fermentation on quality, safety, and microbial community of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) as a novel protein source. *Food Research International*, 174, 113624.
- 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 – Global Forecast to 2033. Consultado en: 01 febrero 2023. <https://www.meticulousresearch.com/product/black-soldier-fly-market-5074#description>
- Milburn, J. (2023). Ethics of meat alternatives. *Meat and Meat Replacements*, 257-280
- Muin, H., & Taufek, N. M. (2024). Evaluation of growth performance, feed efficiency and nutrient digestibility of red hybrid tilapia fed dietary inclusion of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*). *Aquaculture and Fisheries*, 9(1), 46-51.
- Müller, A., Wolf, D., & Gutzeit, H.O. (2017). The black soldier fly, *Hermetia illucens*—a promising source for sustainable production of proteins, lipids and bioactive substances. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 72(9-10), 351-363.
- Müller, A., Wiedmer, S., & Kurth, M. (2019). Risk evaluation of passive transmission of animal parasites by feeding of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae and prepupae. *Journal of food protection*, 82(6), 948-954.
- NRC, National Research Council. (1994). *Nutrient Requirements of Poultry: Ninth Revised Edition*. Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC, National Research Council. (2006). *Nutrient Requirements of Dogs and Cats*. Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC, National Research Council. (2007). *Nutrient Requirements of Small Ruminants: Sheep, Goats, Cervids, and New World Camelids*. Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC, National Research Council. (2011). *Nutrient Requirements of Fish and Shrimp*. Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC, National Research Council. (2016). *Nutrient Requirements of Beef Cattle: Eighth Revised Edition*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Nyakeri, E. M., Ogola, H. J. O., Ayieko, M. A., & Amimo, F. A. (2017). Valorisation of organic waste material: growth performance of wild black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) reared on different organic wastes. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(3), 193-202.
- Ooninx, D.G.A.B., & Finke, M.D. (2021). Nutritional value of insects and ways to manipulate their composition. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 639-659.
- Ooninx, D. G. A. B., Van Huis, A., & Van Loon, J. J. A. (2015). Nutrient utilisation by black soldier flies fed with chicken, pig, or cow manure. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(2), 131-139.
- Ooninx, 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.
- Ozhohanych, T., Iermakova, O., Klenin, O., Dolinskyi, L., Glushchovsky, V., & Tkach, O. (2023). Circular economy: the future of aquaculture sector in Ukraine. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1126, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.
- Papa, G., Scaglia, B., D'Imporzano, G., Savoldelli, S., Jucker, C., Colombini, S., ... & Adani, F. (2022). Valorizing the organic fraction of municipal solid waste by producing black soldier fly larvae and biomethane in a biorefinery approach. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134422.
- Pali-Schöll, I., Binder, R., Moens, Y., Polesny, F., & Monsó, S. (2019a). Edible insects—defining knowledge gaps in biological and ethical considerations of entomophagy. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(17), 2760-2771.
- Pali-Schöll, I., Meinschmidt, P., Larenas-Linnemann, D., Purschke, B., Hofstetter, G., Rodríguez-Monroy, F.A., Einhorn, L., Mothes-Luksch, N., Jensen-Jarolim, E., & Jäger, H. (2019b). Edible insects: Cross-recognition of IgE from crustacean- and house dust mite allergic patients, and reduction of allergenicity by food processing. *World Allergy Organization Journal*, 12(1), 100006.
- Pérez-Pacheco, R., Hinojosa-Garro, D., Ruíz-Ortiz, F., Camacho-Chab, J. C., Ortega-Morales, B. O., Alonso-Hernández, N., ... & Granados-Echegoyen, C. A. (2022). Growth of the black soldier fly *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) on

- organic-waste residues and its application as supplementary diet for Nile Tilapia *Oreochromis niloticus* (Perciformes: Cichlidae). *Insects*, 13(4), 326.
- Pleissner, D., & Smetana, S. (2019). Estimation of the economy of heterotrophic microalgae- and insect-based food waste utilization processes. *Waste Management* 102, 198–203.
- PROteINSECT. (2016). Insect protein – feed for the future: Addressing the need for feeds of the future today. Consultado en: 21 nov 2023. Disponible en: <https://www.fera.co.uk/media/wysiwyg/our-science/proteinsect-whitepaper-2016.pdf>
- Purkayastha, D., & Sarkar, S. (2021). Sustainable waste management using black soldier fly larva: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-26.
- Rehman, K.U., Hollah, C., Wiesotzki, K., Rehman, R.U., Rehman, A.U., Zhang, J., Zheng, L., Nienaber, T., Heinz, V., & Aganovic, K. (2023). Black soldier fly, *Hermetia illucens* as a potential innovative and environmentally friendly tool for organic waste management: A mini-review. *Waste Management & Research*, 41(1), 81-97.
- Ribeiro, J.C., Sousa-Pinto, B., Fonseca, J., Caldas-Fonseca, S., & Cunha, L.M. (2021). Edible insects and food safety: allergy. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5): 833-847.
- Rosa, R., Spinelli, R., Neri, P., Pini, M., Barbi, S., Montorsi, M., ... & Ferrari, A. M. (2020). Life cycle assessment of chemical vs enzymatic-assisted extraction of proteins from black soldier fly prepupae for the preparation of biomaterials for potential agricultural use. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(39), 14752-14764.
- Setti, L., Francia, E., Pulvirenti, A., De Leo, R., Martinelli, S., Maistrello, L., ... & Ronga, D. (2020). Bioplastic film from black soldier fly prepupae proteins used as mulch: preliminary results. *Agronomy*, 10(7), 933.
- Shumo, M., Khamis, F. M., Tanga, C. M., Fiaboe, K. K., Subramanian, S., Ekesi, S., ... & Borgemeister, C. (2019). Influence of temperature on selected life-history traits of black soldier fly (*Hermetia illucens*) reared on two common urban organic waste streams in Kenya. *Animals*, 9(3), 79.
- Singh, A., & Kumari, K. (2019). An inclusive approach for organic waste treatment and valorisation using Black Soldier Fly larvae: A review. *Journal of Environmental Management*, 251, 109569.
- Singh, A., Marathe, D., Raghunathan, K., & Kumari, K. (2022). Effect of Different Organic Substrates on Selected Life History Traits and Nutritional Composition of Black Soldier fly (*Hermetia illucens*). *Environmental Entomology*, 51(1), 182-189.
- Skrivervik, E. (2020). Insects' contribution to the bioeconomy and the reduction of food waste. *Heliyon*, 6(5), e03934.
- Smetana, S., Leonhardt, L., Kauppi, S., Pajic, A. & Heinz, V. (2020). Insect margarine: Processing, sustainability and design. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121670.
- Smetana, S., Schmitt, E., & Mathys, A. (2019). Sustainable use of *Hermetia illucens* insect biomass for feed and food: Attributional and consequential life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 144, 285-296.
- Sogari, G., Dagevos, H., Amato, M., & Taufik, D. (2022^a). Consumer Perceptions and Acceptance of Insects As Feed and Food: Current Findings and Future Outlook. In: Scaffardi, L., Formici, G. (eds) *Novel Foods and Edible Insects in the European Union*. Springer, Cham.
- Sogari, G., Menozzi, D., Mora, C., Gariglio, M., Gasco, L., & Schiavone, A. (2022b). How information affects consumers' purchase intention and willingness to pay for poultry farmed with insect-based meal and live insects. *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(2), 197-206.
- Spranghers, T., Ottoboni, M., Klootwijk, C., Olyn, A., Deboosere, S., De Meulenaer, B., ... & De Smet, S. (2017). Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(8), 2594-2600.
- Surendra, K. C., Olivier, R., Tomberlin, J. K., Jha, R., & Khanal, S. K. (2016). Bioconversion of organic wastes into biodiesel and animal feed via insect farming. *Renewable energy*, 98, 197-202.
- 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.
- Tanga, C.M., Beesigamukama, D., Kassie, M., Egonu, P.J., Ghemoh, C.J., Nkoba, K., Subramanian, S., Anyega, A.O., & Ekesi, S. (2021). Performance of black soldier fly frass fertiliser on maize (*Zea mays* L.) growth, yield, nutritional quality, and economic returns. *Journal of Insects as Food and Feed*, 8 (2) 185 – 196.
- Tomberlin, J.K & Cammack, J.A. (2018). Black soldier fly: biology and mass production. In: van Huis, A. & Tomberlin, J.K (eds). *Insects as Food and Feed: from production to consumption*. 231-246 pp. Wageningen Academic Publishers.
- Tomberlin, J.K., & Van Huis, A. (2020). Black soldier fly from pest to 'crown jewel' of the insects as feed industry: an historical perspective. *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(1): 1-4.
- Toral, P. G., Hervás, G., González-Rosales, M. G., Mendoza, A. G., Robles-Jiménez, L. E., & Frutos, P. (2022). Insects as alternative feed for ruminants: comparison of protein evaluation methods. *Journal of animal science and biotechnology*, 13(1), 1-8.
- Van Huis, A. (2019). Manure and flies: biodegradation and/or bioconversion? *Journal of Insects as Food Feed* 5, 55–58.
- Van Huis, A. (2020). Insects as food and feed, a new emerging agricultural sector: a review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(1): 27-44.
- Van Huis, A. (2022). Edible insects: non-food and non-feed industrial applications. *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(5), 447-450.
- Van Huis, A. (2023). Increasing academic interest in edible insects: the Journal of Insects as Food and Feed. *Journal of Insects as Food and Feed*, 9(1), 1-2.
- Van Huis, A., Rumpold, B.A., van der Fels-Klerx, H.J., & Tomberlin, J.K. (2021). Advancing edible insects as food and feed in a circular economy. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 935-948.
- Van Huis, A., Van Itterbeeck, J., Klunder, H., Mertens, E., Halloran, A., Muir, G., & Vantomme, P. (2013). *Edible insects: future prospects for food and feed security* (No. 171). Food and agriculture organization of the United Nations.
- Vandeweyer, D., Smet, J., Van Looveren, N. & Van Campenhout, L. (2021). Biological contaminants in insects as food and feed. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7, 1-16.
- Vogel, H., Müller, A., Heckel, D. G., Gutzzeit, H., & Vilcinskis, A. (2018). Nutritional immunology: diversification and diet-dependent expression of antimicrobial peptides in the black soldier fly *Hermetia illucens*. *Developmental & Comparative Immunology*, 78, 141-148.
- Wade, M., & Hoelle, J. (2020). A review of edible insect industrialization: Scales of production and implications for sustainability. *Environmental Research Letters*, 15(12), 123013.
- Wedwitschka, H., Gallegos Ibanez, D., & Jáquez, D. R. (2023). Biogas production from residues of industrial insect protein production from black soldier fly larvae *Hermetia illucens* (L.): An evaluation of different insect frass samples. *Processes*, 11(2), 362.
- Woodley, N. E. (2009). Family Stratiomyidae. En: *The Diptera of the Seychelles islands*. Pensoft Publishers, Sofia and Moscow; 100-106.
- Wynants, E., Froominx, L., Crauwels, S., Verreth, C., De Smet, J., Sandrock, C., ... & Van Campenhout, L. (2019). Assessing the microbiota of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*)

- reared on organic waste streams on four different locations at laboratory and large scale. *Microbial ecology*, 77, 913-930.
- Xia, J., Ge, C., & Yao, H. (2021). Antimicrobial peptides from black soldier fly (*Hermetia illucens*) as potential antimicrobial factors representing an alternative to antibiotics in livestock farming. *Animals*, 11(7), 1937.
- Żuk-Golaszewska, K., Gałęcki, R., Obremski, K., Smetana, S., Figiel, S., & Golaszewski, J. (2022). Edible Insect Farming in the Context of the EU Regulations and Marketing—An Overview. *Insects*, 13(5), 446.
- 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*, 1, 18-22.