



Abanico Veterinario. Enero-Diciembre 2023; 13:1-24. <http://dx.doi.org/10.21929/abavet2023.11>

Revisión de Literatura. Recibido:08/07/2022. Aceptado:08/05/2023. Publicado:26/05/2023. Clave: e2022-58.

<https://www.youtube.com/watch?v=zaCqnEk8dZU>

Semioquímicos asociados al seguimiento de rastros de hormigas (Hymenoptera: Formicidae): una revisión sistemática

Semiochemicals associated with the monitoring of ant traces (Hymenoptera: Formicidae): a systematic review



Cruz-Labana José*¹ <https://orcid.org/0000-0002-4217-5592>

Vallejo-Pérez Moisés¹ <https://orcid.org/0000-0002-9167-2632>

Flores-Ramírez Rogelio¹ <https://orcid.org/0000-0003-2263-6280>

Tarango-Arámbula Luis² <https://orcid.org/0000-0002-7662-1319>

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y la Tecnología, Laboratorio Nacional, San Luis Potosí, México. ²Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí, Posgrado de Innovación en Manejo de Recursos Naturales, San Luis Potosí, México. *Autor responsable y de correspondencia: Cruz-Labana José. Av. Sierra Leona 550, Lomas 2ª Sección. CP. 78210. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. E-mail: domingo.cruz@uaslp.mx, moises.vallejo@uaslp.mx, rfloresra@conacyt.mx, ltarango@colpos.mx.

RESUMEN

Las hormigas son himenópteros muy diversos y de amplia distribución geográfica. Son insectos sociales y su comunicación se basa en señales químicas. Dentro del grupo de semioquímicos que regulan la búsqueda de alimentos están las feromonas de rastro en los caminos. El propósito de esta revisión es documentar las principales feromonas de seguimiento en los senderos que guían a las hormigas hacia las fuentes de alimentación. Se realizó una revisión sistemática basada en las directrices de la declaratoria PRISMA de las investigaciones encontradas en PubMed, Web of Science y Google Scholar de las feromonas de rastro. Se reportaron 26 compuestos químicos de 14 especies de hormigas, las principales fuentes de obtención fueron extractos de cuerpo completo, abdomen y glándulas. La detección de los semioquímicos fueron respuestas electrofisiológicas de los himenópteros y métodos cromatográficos, registrando compuestos orgánicos de cadena corta y larga (C05-C18). El estudio de compuestos químicos de rastro se ha realizado a un número reducido de especies, este tipo de investigaciones tiene gran potencial para el control de hormigas invasoras, ya que su distribución ha tenido repercusiones negativas en los ecosistemas y daños económicos para el hombre.

Palabras clave: Cromatografía de gases-espectrometría de masas, electroantenografía, glándulas, bioensayo, sendero.

ABSTRACT

Ants are very diverse hymenopterans with a wide geographical distribution. They are social insects and their communication is based on chemical signals. Within the group of semiochemicals that regulate the search for foods are the trail pheromones on the roads. The purpose of this review is to document the main tracking pheromones on the trails that guide ants to feeding sources. A systematic review was carried out based on the guidelines of the PRISMA statement of research found in PubMed, Web of Science and Google Scholar of the pheromones trails. Reported 26 chemical compounds were reported in 14 species of ants, the main sources of obtaining were extracts of the whole body, abdomen and glands. The detection of the semiochemicals were electrophysiological responses of Hymenoptera and chromatographic methods,



recording short and long-chain organic compounds (C05-C18). The study of trial chemical compounds has been carried out on a small number of species, this type of research has great potential for the control of invasive ants, since their distribution has had negative repercussions on ecosystems and economic damage to man.

Keywords: Chromatography-mass spectrometry, electroantennography, glands, bioassay, trail.

INTRODUCCIÓN

Los insectos son los invertebrados terrestres más diversos del planeta, cuentan con alrededor de 30 millones de especies (Stork, 2018). En el orden Hymenoptera los más representativos son las abejas, avispas y hormigas. Las hormigas pertenecen a la familia Formicidae, la más grande del orden Hymenoptera. Son insectos de gran diversidad, ya que se han identificado alrededor de 11,000 a 16,000 especies (26 subfamilias y 428 géneros). Se estima que, por cada 10 kg de insectos, de 3 a 4 kg son hormigas (Azhagu *et al.*, 2017; Huber, 2017; Diamé *et al.*, 2018; Vander Meer & Alonso, 2019; Csősz *et al.*, 2021). Estos invertebrados son de gran relevancia por los servicios ecosistémicos que ofrecen en la mayoría de los ambientes terrestres donde establecen sus colonias, ya que modifican o crean hábitats para otras especies, por lo que se les consideran ingenieros del ecosistema (Leite *et al.*, 2018; Wills & Landis, 2018; De Almeida *et al.*, 2020). Las hormigas son capaces de descomponer y reciclar nutrientes, cambiando la estructura del suelo y el flujo de energía, colectan y transportan semillas favoreciendo la distribución de plantas (Bologna *et al.*, 2017; Eubanks *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019; Swanson *et al.*, 2019; Jílková *et al.*, 2020; Ortiz *et al.*, 2021; Zhong *et al.*, 2021; Ouattara *et al.*, 2021).

Los formícidos son utilizados como bioindicadores para estimar la diversidad de otros taxones, reflejar el estado de conservación o contaminación de los ecosistemas y restauración ecológica (Forbes & Northfield, 2017; Tibcherani *et al.*, 2018; Casimiro *et al.*, 2019; Thurman *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2020; Oberprieler & Andersen, 2020; Okrutniak & Grześ, 2021), Además, son un importante control de plagas (Stüber *et al.*, 2021; Trigos-Peral *et al.*, 2021) e incluso algunas especies son utilizadas para consumo humano en distintas etapas de desarrollo (estados inmaduros y adultos) (Pino Moreno & Blasquez, 2021).

Las hormigas son un grupo dominante y con amplia dispersión a nivel global. A excepción de la Antártida y las regiones con nieves perpetuas, las hormigas están presentes en una gran variedad de hábitats; estas son capaces de colonizar nuevas áreas para sobrevivir a cambios ambientales y encontrar nuevos recursos para garantizar la reproducción y sobrevivencia de sus colonias (Escárraga & Guerrero, 2014; Guénard *et al.*, 2017; Hakala *et al.*, 2019; Lessard, 2019). El éxito de sobrevivencia, desarrollo, reproducción y búsqueda de alimentos de las hormigas, se deben en que son organismos sociales, donde la división del trabajo es colaborativo, basado en castas y con la plasticidad de



cambio de roles por el tamaño corporal y la edad ([Cristín et al., 2020](#); [De Gasperin et al., 2020](#); [Ortiz-Alvarado et al., 2021](#); [O'Shea-Wheller et al., 2021](#)).

La comunicación de las hormigas se basa en rastros químicos, los cuales pueden diferenciar el olor de la colonia y la identificación de sus congéneres (hidrocarburos cuticulares); estos compuestos intervienen en respuestas específicas y son secretadas por glándulas exocrinas ([Kleeberg et al., 2017](#); [Pask et al., 2017](#); [Gordon, 2021](#)). Las hormigas son casi ciegas, pero tienen un sistema olfativo muy agudo en las antenas, las cuales están equipadas con quimiorreceptores especializados para captar moléculas de olor que se transportan por el aire, por lo que la percepción e interpretación de los olores, en los cerebros de las hormigas, es de vital importancia para su supervivencia ([D'Ettoire et al., 2017](#); [Kleeberg et al., 2017](#)). Las feromonas coordinan la defensa de los nidos (sistema de alarmas), el cuidado de la reina y las crías, inmigración de colonias, reproducción, la búsqueda del alimento y reclutamiento ([Wyatt, 2017](#); [Du et al., 2019](#); [Vander Meer & Alonso, 2019](#); [Ge et al., 2020](#)). Las feromonas de rastro es uno de los principales mecanismos de guía hacia las fuentes de alimentación, cuando un recolector encuentra alimento, deposita un rastro de feromonas mientras regresa al nido, incitando al reclutamiento de sus compañeras hacia el mismo recurso. Los recolectores reclutados depositan feromonas de rastro adicional, reforzando el original, entre más abundante y de mayor calidad sea el alimento, la concentración de feromonas sobre el sendero será de mayor intensidad ([Hu et al., 2018](#); [Du et al., 2019](#); [Renyard, 2019](#); [Kolay et al., 2020](#)).

Existen dos tipos de feromonas que permiten la comunicación entre hormigas: cebadoras y liberadoras. Las primeras están asociadas al desarrollo de comportamientos fisiológicos complejos a largo plazo, mientras que las liberadoras tienen una respuesta conductual simple e inmediata ([Vander Meer & Alonso, 2019](#)). El marcado de rastros químicos (olor) en los senderos genera una respuesta, casi inmediata, en el reclutamiento de otras hormigas recolectoras. Las feromonas excretadas son producidas por una glándula (o dos en algunas especies), y dependiendo de la familia o subfamilia en las que se clasifiquen, estas pueden ser tibiales, pigidiales, procoxal, Dufour, Pavan, etc. ([Hölldobler, 2019](#); [Billen et al., 2020](#)). Las feromonas secretadas son una mezcla particular de hidrocarburos cuticulares (HC) o glandulares, son metabolitos que regulan un comportamiento específico. Una de las herramientas más utilizadas para la identificación de metabolitos es la metabolómica con enfoque dirigido y no dirigido. El primero implica el análisis de compuestos químicos conocidos (uso de estándares) y el segundo tiene como objetivo encontrar todos los compuestos posibles ([Ribbenstedt et al., 2018](#)). A través de diferentes técnicas de metabolómica se han identificado feromonas que regulan diversos comportamientos de insectos sociales, incluyendo los químicos asociados al seguimiento de senderos de diferentes familias y subfamilias de hormigas ([Hefetz, 2019](#)), los cuales son utilizados para la creación de versiones sintéticas como



métodos de control de especies invasoras que afectan de forma negativa las relaciones tróficas de ecosistemas, cultivos agrícolas y estructuras arquitectónicas con diferentes usos para el hombre (Angulo *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2020; Tay *et al.*, 2020). En la actualidad, diversos artículos de revisión reportan los compuestos químicos que utilizan las hormigas como sistema de guía hacia las fuentes de alimentación (Morgan, 2009; Cerdá *et al.*, 2014; Fox & Adams, 2022), sin embargo, estas aportaciones no especifican la metodología utilizada en la búsqueda de las fuentes y los criterios de calidad para seleccionarlas e incluirlas en sus investigaciones, por lo que es necesario realizar una revisión de los semioquímicos reportados en hormigas, ya que es información indispensable para el desarrollo de estudios con hormigas de México. Para garantizar que una revisión sea reproducible, precisa y transparente, existe la declaración PRISMA, la cual ha sido aplicada en una gran variedad de disciplinas para realizar revisiones temáticas (Page *et al.*, 2021), pero no se tienen precedentes de ser utilizada para reportar información sobre los semioquímicos reportados con hormigas. La declaración PRISMA es un conjunto de directrices para realizar una revisión sistemática, la cual es una síntesis rigurosa del conocimiento para identificar, cribar, seleccionar y analizar de forma crítica las investigaciones más relevantes de un tema específico e incluirlas en la revisión (Rethlefsen *et al.*, 2021; Sarkis-Onofre *et al.*, 2021). En este sentido, el objetivo de la presente revisión es documentar las principales feromonas de seguimiento de senderos, como sistema de guía hacia las fuentes de alimentación, reportadas en los últimos siete años, e identificar las diferentes técnicas para su síntesis química y los métodos para evaluar su efectividad.

MATERIAL Y MÉTODOS

En esta investigación se ha llevado a cabo una revisión sistemática de literatura científica, utilizando las directrices de la declaración PRISMA (Page *et al.*, 2021), la cual permite sintetizar, a través de un análisis bibliométrico, el estado del conocimiento de las feromonas asociadas al rastreo y búsqueda de alimentos de diferentes especies de hormigas, específicamente las secretadas por glándulas u otra parte del cuerpo. La revisión sistemática se estructuró en cinco pasos: a) preguntas de revisión sistemática, b) búsqueda inicial, c) búsqueda sistemática, d) selección de publicaciones (criterios de inclusión y exclusión), e) análisis de la calidad y evaluación crítica, mismos que se explican a continuación:

a) Preguntas de revisión sistemática. La revisión sistemática tuvo como propósito abordar las siguientes preguntas de investigación:

¿En qué especies de hormigas se han reportado las feromonas de rastro en los últimos siete años?



¿Cuáles son los métodos de extracción de feromonas y que parte del cuerpo han sido analizadas?

¿Qué técnicas se utilizaron para la detección de compuestos químicos como respuesta física de las hormigas?

¿Cuáles son los métodos de preparación de los compuestos químicos y/o feromonales de rastros?

¿Cuáles son los compuestos que han sido identificados en los senderos de las hormigas para la búsqueda de alimentos?

¿Qué diseños de experimentos (bioensayos) se dirigieron para la obtención de los resultados?

b) Búsqueda inicial. Esta consistió en realizar búsquedas iniciales en Web of Science, Scopus, PubMed y Google Scholar en diciembre de 2021, los términos utilizados fueron la combinación de 'Ants' y 'pheromones trails'. Los resultados obtenidos identificaron una gran cantidad de publicaciones, muchas duplicadas, u otras que no eran útiles ya que incluía estudios etológicos en reproductores (reinas), o incluso pertenecían a otras familias de insectos (por ejemplo, termitas, escarabajos y arácnidos). Para delimitar las búsquedas se utilizaron a conveniencia los operadores booleanos OR y AND.

c) Búsqueda sistemática. Esta se llevó a cabo en enero de 2022 incluyendo búsquedas desde el 2017 hasta la actualidad. Los términos y lenguaje utilizados, por tipo de buscador, fueron: i) Web of Science; (TI=(Ants) OR TI=(Hymenoptera: Formicidae)) AND TI=(pheromones trails) AND TI=(trails following). ii) Scopus; TITLE (ants OR "Hymenoptera: Formicidae" AND pheromones AND "trails following"). iii) PubMed y Google Scholar; Ants OR (Hymenoptera: Formicidae) AND (pheromones trails) AND (Trail-Following). Los términos de la búsqueda fueron en inglés, ya que la producción científica más actual, sobre feromonas de rastro de hormigas, son en este idioma. Dicho criterio aumento la visibilidad de artículos indexados en bases de datos internacionales, e identificó los resultados con el mayor número subfamilias de formícidos.

d) Selección de publicaciones.

Criterios de inclusión

Tratarse de investigaciones que reportaran compuestos químicos de seguimiento en los senderos de hormigas obtenidas de extractos glandulares y otras partes del cuerpo (p. ej. cabeza, tórax abdomen, etc.). Además, se identificó aquellas aportaciones que realizaron bioensayos con la aplicación de extractos y/o feromonas sintéticas. Dichos experimentos tenían que usar atrayentes alimenticios o evidenciar el seguimiento de senderos, además de reportar el sesgo y/o efectos del diseño de cada experimento sometiéndolos a una prueba probabilística.



La búsqueda solo incluyó feromonas de rastro, no se tomaron en cuenta investigaciones que reportara feromonas de alarma (presencia de depredadores o colonias rivales) o feromonas que regulen la reproducción de las colonias.

Criterios de exclusión

No se incluyeron publicaciones donde los bioensayos fueran basados en extractos de aceites esenciales. Se priorizó el cribado sobre investigaciones que sintetizaran las feromonas de alguna parte del cuerpo de las hormigas o mezclas comerciales. Otro criterio de exclusión fueron aquellos experimentos diseñados para poner a prueba relaciones biológicas (por ejemplo, mimetismo) con otras familias de insectos que no sean presas de las hormigas. Finalmente, el seguimiento de senderos no se basará en modelos matemáticos.

e) Análisis de calidad y evaluación crítica

Se evaluó la calidad individual de los artículos seleccionados, considerándose la selección de los casos (número de colonias de hormigas), métodos de extracción de feromonas, diseños y repeticiones en los bioensayos. Después de cumplir con estos criterios, se dio lectura completa a cada artículo. Todos ellos se caracterizaron por utilizar diseños experimentales que les permitió realizar pruebas estadísticas y/o diferentes ajustes de modelos probabilísticos; en general, los métodos analíticos (obtención de semioquímicos de rastro y/o feromonas) se pueden adaptar o repetir en otras investigaciones con formícidos.

Análisis de grupos funcionales

Después de aplicar la declaración PRISMA, e identificar los semioquímicos de rastro de las hormigas, se procedió a clasificar la información como a continuación se describe; a) grupos químicos funcionales, b) longitud de cadena (número de carbonos) y c) compuestos químicos. Con esta información y las frecuencias totales de la clasificación, se realizó un análisis descriptivo utilizando Minitab® 18.1.

RESULTADOS

Se identificaron un total de 212 fuentes que contenían las palabras clave de interés, en dos bases de datos y un buscador de internet. Con esta información, se seleccionó 206 publicaciones que fueron artículos científicos de los últimos 7 años. Después de excluir los duplicados y analizar los títulos y resúmenes, se excluyeron 178 registros. A los 25 artículos restantes, se les realizó un cribado con los criterios de inclusión/exclusión, de los cuales siete fueron elegidos para la revisión sistemática, ya que cumplieron los criterios de calidad y evaluación crítica (Tabla 1).



Las investigaciones de Chalissery *et al.* (2021), Chalissery *et al.* (2019) y Renyard *et al.* (2019) se realizaron en Canadá, por la Universidad de Simon Fraser, Burnaby, BC (Departamento de Ciencias Biológicas). En el estudio de Hamilton *et al.* (2018) obtuvieron las muestras (hormigueros) en el Parque Nacional Soberanía, Panamá, bajo la dirección de la Universidad Estatal de Ohio, Columbus, OH, USA (Dpto. de Evolución, Ecología y Biología de Organismos). La investigación de Nakamura *et al.* (2019) se realizó en el Instituto de Tecnología de Kioto, Japón (Laboratorio de Entomología Aplicada). Stringer *et al.* (2017) desarrollaron su estudio en Nueva Zelanda, Instituto de Nueva Zelanda (Instituto de Plantas y Alimentos). Finalmente, Xu *et al.* (2021) obtuvieron el material biológico en las provincias de Guangdong (hormigas) y Hebei (áfidos del algodón) en China, el desarrollo de la investigación fue una colaboración entre la Universidad de Hebei y la Universidad Agrícola del Sur de China (entre otras instituciones).

Tabla 1. Análisis de calidad de los artículos incluidos en los resultados

Referencia	Tamaño de muestra 1=No es claro 2=Presente	Extractos glandulares u otras partes del cuerpo 1=No es claro 2=Presente	Bioensayos 0=No presenta 1=No es claro 2=Es clara	Tratamientos 1=Diferentes tratamientos y un control 2=Diferentes tratamientos con repetición y un control	Variable respuesta 0=Cualitativa (ordinal) 1=Numérica (discreta y/o continua)	Análisis estadísticos 0=No presenta 1=No es claro 2=Presente	Resultados 0=Incompletos 2=Completo	Total
Chalissery <i>et al.</i> (2021)	1	2	2	2	1	2	2	12
Chalissery <i>et al.</i> (2019)	2	2	2	2	1	2	2	13
Hamilton <i>et al.</i> (2018)	2	2	0	1	1	0	2	8
Nakamura <i>et al.</i> (2019)	2	2	2	2	1	2	2	13
Renyard <i>et al.</i> (2019)	2	2	2	2	1	2	2	13
Stringer <i>et al.</i> (2017)	2	2	2	2	1	2	2	13
Xu <i>et al.</i> (2021)	2	2	2	2	1	2	2	13

El resultado de la revisión identificó un total de 26 semioquímicos de rastro de 14 especies de hormigas, pertenecientes a las subfamilias Myrmicinae (diez especies), Formicinae (tres especies), y Dolichoderinae (una especie) (Tabla 2). Las hormigas más estudiadas para dirigir los experimentos fueron *Camponotus modoc* y *Linepithema humile* (Stringer *et al.*, 2017; Chalissery *et al.*, 2019).



Tabla 2. Semioquímicos de rastro y metodologías de análisis en la búsqueda sistemática

Referencia	Especie (s)	Fuente (s) para la obtención de feromonas	Disolvente usado en los extractos	Configuración de caminos y/o estructuras utilizadas en los bioensayos	Análisis de detección de feromonas	Feromonas de rastro identificadas*	Resultados
Chalisser et al. (2021)	<i>Tetramorium immigrans</i>	Glándula venenosa y cuerpo completo (abdómen, tórax y cabeza)	Diclorometano (DCM)	i) Estructura circular ii) Laberinto en forma de "V" iii) Sendero en campo con dos tiras de papel (0° y 180°) En todos los experimentos se utilizó DCM como control	i) Cromatografía de gases-electroantenografía (GC-EAD) para identificar los compuestos con mayor respuesta en las antenas. ii) Cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS) para análisis de feromona(s) candidata(s)	Methyl 2-methoxy-6-methylbenzoate (MMMB) como feromona candidata	Las hormigas siguieron los rastros de extractos (HSRE)
Chalisser et al. (2019)	Distribución simpátrica: i) <i>Camponotus modoc</i> ii) <i>Lasius niger</i> iii) <i>Myrmica rubra</i> Distribución alopátrica iv) <i>Tetramorium caespitum</i> v) <i>Novomessor albisetosus</i> vi) <i>Linepithema humile</i>	Mezcla sintética de seis feromonas de rastro (6-TPB)	Pentano	Estructuras circulares de diferentes diámetros En todos los experimentos se utilizó pentano como control	GC-EAD	i) (2S,4R,5S)-2,4-dimethyl-5-hexanolide ("hexanolide", 6-TPB) y 2,4-dimethyl-5-hexanolide (EAD) ii) 3,4-dihydro-8-hydroxy-3,7-trimethylisocoumarin ("isocoumarin", 6-TPB) y 3,4-dihydro-8-hydroxy-3,5,7-trimethylisocoumarin (EAD). iii) 3-ethyl-2,5-dimethylpyrazine (6-TPB y EAD). iv) 2,5-dimethylpyrazine (6-TPB y EAD) v) 4-methyl-3-heptanone (6-TPB y EAD) vi) (Z)-9-hexadecenal (6-TPB y EAD)	Las hormigas siguieron los rastros de la mezcla sintética (HSRMS)
Hamilton, et al. (2018)	<i>Cyphomyrmex rimosus</i> <i>C. salvini</i> <i>C. costatus</i> <i>C. muelleri</i> <i>C. longiscapus</i>	Cabeza, mesosoma (tórax) y gáster (abdómen)	Metanol	Compuestos químicos comparados con una muestra filogenética	CG-MS	i) 2,5-dimethyl-3-isoamylpyrazine ii) Seis feromonas putativas de rastro: (3Z, 6E)- α -farnesene, α -7-ethylhomofarnesene y α -6-bishomofarnesene en tres especies del	Los compuestos más abundantes fueron (3Z, 6E)- α -7-ethylhomofarnesene y α -6-bishomofarnesene en tres especies del



						(3Z, 6E)- α -7-ethylhomofarnesene, α -6-ethylbishomofarnesene, Bishomofarnesene-2, Bishomofarnesene-1, Trishomofarnesene	grupo <i>C. wheeleri</i> . La región del mesosoma no produjo compuestos volátiles
Nakamura <i>et al.</i> (2019)	<i>Tetramorium tsushimae</i> Emery	Extracto de cuerpo entero, cabeza-mesosoma, gáster, glándula venenosa, glándula de Dufour, intestino superior y residuos de abdómenes	Mezcla de n-hexano y éter dietílico	Líneas rectas de diversas longitudes (10 y 5 cm). En todos los experimentos se utilizó n-hexano y éter dietílico como control	CG, CG preparativa acoplada a un detector de conductividad térmica y GC-MS	Methyl 6-methylsalicylate	HSRE Las hormigas eligieron con mayor frecuencia el extracto marcado con glándula venenosa que cualquiera de los otros (glándula de Dufour, intestino superior y residuos de abdómenes)
Reyard <i>et al.</i> (2019)	<i>Camponotus modoc</i>	Intestino posterior y glándula venenosa	DCM	i) Andamio de metal hacia una estructura circular ii) Laberinto en "V" iii) Laberinto en "Y" En todos los experimentos se utilizó DCM como control	i) GC-EAD para identificar los compuestos con mayor respuesta en las antenas y GC-MS para análisis de feromona(s) candidata(s) ii) GC-MS para cuantificar la cantidad de componentes de feromonas candidatas de intestino superior	i) 2, 2,4-dimethylhexanoic acid ii) 2,4-dimethyl-5-hexanolide iii) Pentadecanoic acid iv) Dodecanoic acid v) 3,4-dihydro-8-hydroxy-3,5,7-trimethylisocoumarin	HSRE Los componentes de la glándula venenosa no provocaron ningún seguimiento de rastro
Stringer <i>et al.</i> (2017)	<i>Linepithema humile</i>	Gáster	Hexano con 50 ng de acetato de dodecilo	i) Hilo de algodón (20 cm x 0.33 mm) ii) Línea recta trazada sobre una hoja de papel iii) Caminos paralelos (1cm) En todos los experimentos se utilizó etanol al 70% como control	GC-MS	(Z)-9-hexadecenal	HSRE El seguimiento de senderos fue más eficaz con señales físicas (hilo). El seguimiento del sendero mejoró ligeramente a altas concentraciones a contra viento



Xu <i>et al.</i> (2021)	<i>Solenopsis invicta</i>	Extracto de cuerpo completo	Hexano	i) Tiras de papel filtro (1 cm) colocadas dentro de una caja Petri (9 cm) ii) Crecimiento de las poblaciones de áfidos sobre el área foliar de plántulas de algodón aplicando extractos de hormigas. En los experimentos se utilizó hexano como control	i) Electroantenograma (EAG) en las antenas de <i>Aphis gossypii</i> Glover. ii) GC-MS para el análisis de extracto crudo de hormigas obreras en seis fracciones	Z,E-a-farnesene E,E-a-farnesene	i) Los pulgones mostraron respuestas a los extractos de todas las fracciones ii) Los semioquímicos de rastro de <i>S. invicta</i> suprimen la dispersión de <i>A. gossypii</i> . iii) La aplicación de los extractos de rastro condujeron a un crecimiento más rápido de la población de áfidos en plántulas de algodón
-------------------------	---------------------------	-----------------------------	--------	--	--	------------------------------------	---

*Para evitar sinonimia de los compuestos químicos de rastro, discrepancias y confusiones con los acrónimos utilizados por los autores, estos se reportaron en el idioma inglés.

El método para la obtención de semioquímicos de rastro fueron por medio de extractos, utilizando disolventes orgánicos de tres grupos químicos; alcano (C_5H_{12} y C_6H_{14}), éster ($C_4H_{10}O$), alcohol (CH_3OH) y un alifático clorado (CH_2Cl_2). Con relación a las partes del cuerpo para la obtención de los semioquímicos, Nakamura *et al.* (2019), Chalissery *et al.* (2021), y Xu *et al.* (2021) emplearon hormigas de cuerpo completo. Chalissery *et al.* (2021) además usaron glándula venenosa, mientras Nakamura *et al.* (2019) obtuvieron extractos de cabeza-mesosoma, abdomen, glándula venenosa, e intestino superior. Así mismo, Stringer *et al.* (2017) y Hamilton *et al.* (2018) diseccionaron gásteres (Tabla 2).

El método de detección y respuesta electrofisiológica utilizado en las hormigas fue GC-EAD en dos publicaciones (Chalissery *et al.*, 2021; Chalissery *et al.*, 2019) y electroantenograma (EAG) en *Aphis gossypii* en una relación mutualista con *Solenopsis invicta* (Xu *et al.*, 2021) (Tabla 2). La preparación, producción y purificación de los semioquímicos de rastro (26 en total), en general, fue por GC-MS. En los artículos recuperados, se analizaron intensidades cromatográficas de gases e identificando moléculas obtenidas de extractos de diferentes partes del cuerpo de hormigas, a excepción de Chalissery *et al.* (2019) quienes utilizaron EAD para especies de distribución simpátrica y alopátrica (Tabla 2).

Se identificó que todos los autores utilizaron diferentes términos para nombrar a los semioquímicos de rastro, incluyendo feromonas candidatas en las aportaciones de Stringer *et al.* (2017), Renyard *et al.* (2019) y Chalissery *et al.* (2021); a diferencia de Hamilton *et al.* (2018) que emplearon feromonas putativas derivadas de los extractos del género *Cyphomyrmex* (Tabla 2).



La dirección de los bioensayos fue con estructuras físicas de diversas formas y dimensiones, a las cuales se les aplicaban compuestos químicos de concentraciones únicas o diferentes (extractos e incluso feromonas sintéticas) para simular el seguimiento de rastros en caminos con o sin recompensa. Por ejemplo, Chalisserly *et al.* (2019) emplearon estructuras circulares, Chalisserly *et al.* (2021) laberintos en forma de “V”, Renyard *et al.* (2019) estructura circular y laberintos en “V” y “Y”. Los otros diseños fueron en andamios o pasarelas en línea recta como el de Nakamura *et al.* (2019), e incluso algunos diseños híbridos; como el caso de Stringer *et al.* (2017) con hilo de algodón en línea recta y Xu *et al.* (2021) quienes usaron caminos rectos colocados sobre cajas Petri (Tabla 2). La revisión identificó que las hormigas respondieron a los compuestos químicos de rastro de sus propias feromonas, pero también al de otras especies (Chalisserly *et al.*, 2019). En las metodologías de identificación de volátiles de rastro, Chalisserly *et al.* (2019), Nakamura *et al.* (2019) y Stringer *et al.* (2017) utilizaron estándares comerciales, lo que representa el 19% del total de los compuestos químicos caracterizados (Tabla 3). Las investigaciones de Renyard *et al.* (2019), Chalisserly *et al.* (2021) y Xu *et al.* (2021) sintetizaron sus propios estándares. Mientras que otros autores los obtuvieron de forma externa de otros investigadores, oh bien, utilizaron estándares comerciales, pero no dan especificaciones de las marcas comerciales o patentes (Tabla 3).

Tabla 3. Estándares utilizados para la síntesis de compuestos químicos de rastro

Referencia	Semioquímicos identificados	Estándar
Chalisserly <i>et al.</i> (2021)	MMMB	Estándar interno sintetizado por los autores
Chalisserly <i>et al.</i> (2019)	i) "Hexanolide" ii) "Isocoumarin" iii) 3-ethyl-2,5-dimethylpyrazine iv) 2,5-dimethylpyrazine v) 4-methyl-3-heptanone vi) (Z)-9-hexadecenal	i,ii) Síntesis de extractos de intestino posterior de <i>Camponotus modoc</i> (Renyard <i>et al.</i> , 2019) iii) Acros Organics, New Jersey, USA iv) Aldrich Chem Co. Milwau, USA v) Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA vi) Sigma-Aldrich
Hamilton <i>et al.</i> (2018)	i) 2,5-dimethyl-3-isoamylpyrazine Feromonas punitivas de rastro: ii) (3Z, 6E)- α -farnesene iii) (3Z, 6E)- α -7-ethylhomofarnesene iv) α -6-ethyl-bishomofarnesene v) Bishomofarnesene-2 vi) Bishomofarnesene-1 vii) Trishomofarnesene	Comparación directa con productos comerciales*
Nakamura <i>et al.</i> (2019)	Methyl 6-methylsalicylate	Estándar externo proporcionado Shigeru Matsuyama. Universidad de Tsukuba, Tsukuba, Japón
Renyard <i>et al.</i> (2019)	i) 2,4-dimethylhexanoic acid ii) 2,4-dimethyl-5-hexanolide (3,5,6-Trimethyloxan-2-one) iii) Pentadecane iv) Dodecanoic acid v) 3,4-dihydro-8-hydroxy-3,5,7-trimethylisocoumarin	Estándares internos sintetizados por los autores
Stringer <i>et al.</i> (2017)	(Z)-9-hexadecenal	Bedoukian Research, Danbury, CT, USA.
Xu <i>et al.</i> (2021)	Z,E-a-farnesene E,E-a-farnesene	Estándares internos sintetizados por los autores.

* No especifican, sin embargo, mencionan que las comparaciones iniciales se realizaron con la base de datos NIST Mass Spectral Data base, V.2 y espectros de literatura publicada.



La feromona 3-ethyl-2,5-dimethylpyrazine del grupo funcional amina fue el de cadena más corta (C05), utilizada en los experimentos con *Myrmica rubra* (Chalissery *et al.*, 2019). En contraste, el hidrocarburo de cadena más larga fue Trishomofarnesene en los bioensayos con *Cyphomyrmex rimosus* y *Cyphomyrmex salvini* (C18) (Hamilton *et al.*, 2018) (Figura 1). Los compuestos orgánicos más utilizados fueron hidrocarburos con cadenas de C12, C15, C16, C17 y C18 representando el 34.8%, seguido de ésteres cíclicos y cetonas (C06, C08 y C07, C10) con el 13% (Figura 1).

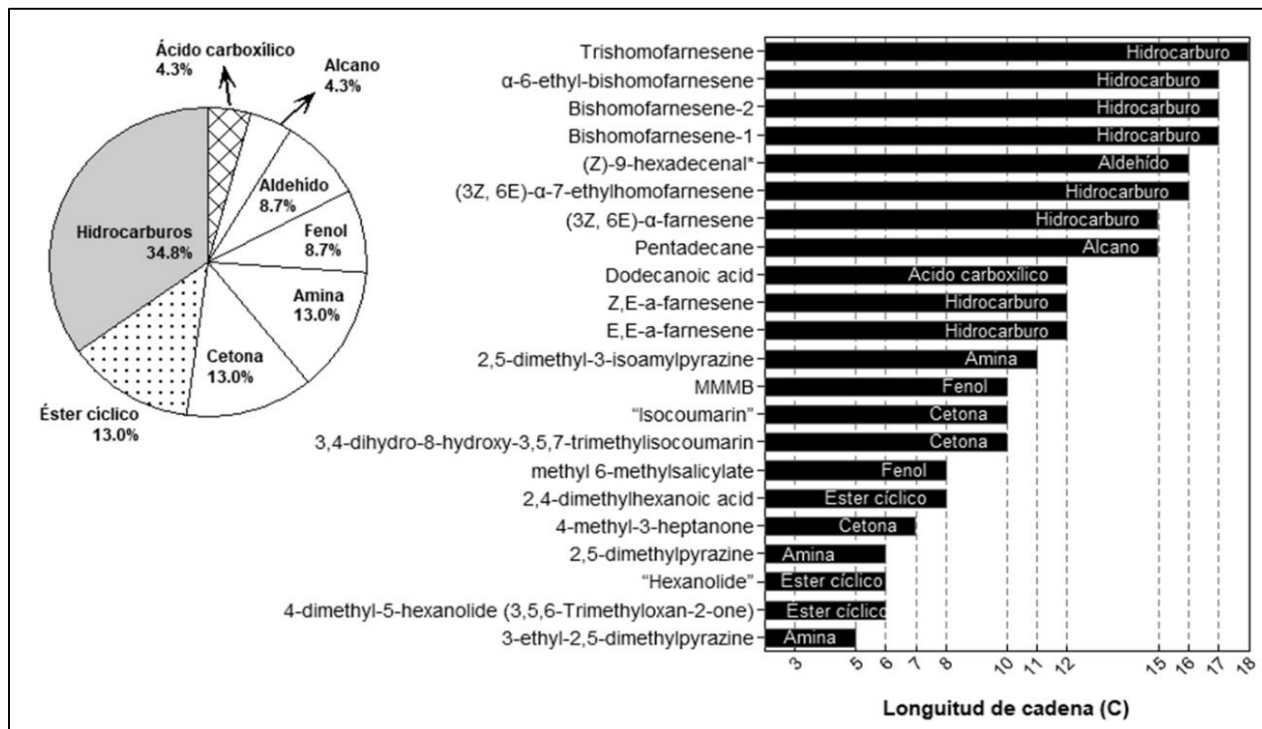


Figura 1. Identificación de los grupos funcionales de los compuestos químicos de rastro
 Fuente: Elaboración propia con los datos obtenidos de los artículos analizados con la declaración PRISMA.

Para *Camponotus modoc* se reportó "hexanolide" (Chalissery *et al.*, 2019; Renyard *et al.*, 2019), compuesto que, posiblemente, nunca antes ha sido reportado para la especie. Sin embargo, este semioquímico se ha identificado en otras especies de hormigas del mismo género (*Camponotus socius*, *C. pennsylvanicus* y *C. vagus*) en la configuración quiral (2S,4R,5S)-2,4-Dimethyl-5-hexanolide en experimentos de biosíntesis de feromonas de rastro, utilizando pruebas electrofisiológicas y de comportamiento (Bestmann *et al.*, 1999).



DISCUSIÓN

En la actualidad, es posible, que no existan revisiones sistemáticas que hayan utilizado la declaración PRISMA para reportar los semioquímicos de rastro de hormigas como el desarrollado en este estudio, por lo que resulta importante esta síntesis del conocimiento sobre diferentes características de los semioquímicos reportados en diversas publicaciones. Las 14 especies de formícidos que se han estudiado tienen diversas categorías de distribución geográfica (nativas, exóticas, introducidas, etc.) (Janicki *et al.*, 2016), destacando: *Linepithema humile* y *Solenopsis invicta* como hormigas introducidas y/o exóticas; las cuales han invadido casi todos los continentes, provocado daños en ecosistemas y pérdidas económicas para el hombre (Angulo *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2020; Seko *et al.*, 2021).

Una alternativa en el control de hormigas plaga es el uso de feromonas, mencionado en cinco investigaciones. Tres a través del uso de cebos letales (Chalissery *et al.*, 2019; Renyard *et al.*, 2019; Chalissery *et al.*, 2021), y dos con la interrupción de la comunicación de los rastros incrementando la concentración de feromonas (Stringer *et al.*, 2017; Nakamura *et al.*, 2019). El control de especies invasoras con cebos y feromonas es una práctica reciente, por ejemplo, Welzel & Choe (2016) utilizan hidrogel adicionando (Z)-9-hexadecenal e insecticidas para el control de la hormiga argentina, estrategia que parece ser más eficaz con cebos asistidos con feromonas vs. a otros de contacto residual como sprays, granulados y otros líquidos (Suiter *et al.*, 2021). Esta táctica también ha sido utilizada con la hormiga invasora de fuego *Myrmica rubra*, causando una mortalidad significativa al llevar y compartir el alimento adicionado con insecticida al interior de la colonia (Hoefele *et al.*, 2021).

No todas las investigaciones mencionaron el control de hormigas a través de semioquímicos como un método directo. Por ejemplo, Xu *et al.* (2021) analizaron una relación ecológica, a través de un bioensayo, para verificar si el rastro de feromonas de *Solenopsis invicta* puede impactar en la dinámica poblacional de *Aphis gossypii*. Ponen en evidencia una relación mutualista positiva entre estos dos insectos de amplia distribución geográfica, y como la hormiga roja de fuego ejerce control en la reproducción y dispersión de los hemípteros ápteros. Este tipo de relaciones ecológicas ha sido investigado entre el piojo harinoso *Planoccocus citri* atendido por la hormiga *Lasius grandis*, al introducir una alimentación alterna de azúcar, disminuyeron los cuidados del insecto presa y en consecuencia aumentó la infestación del piojo en un huerto de cítricos (naranjos del cultivar Navel Powell) (Pérez-Rodríguez *et al.*, 2021).

Las hormigas son ampliamente utilizadas para el control biológico de otros insectos plaga en cultivos agrícolas o forestales. Tal es el caso de *Wasmannia auropunctata* en un sistema agroforestal de café, la cual redujo la supervivencia de *Hypothenemus hampei*



en el interior de los frutos, y con un efecto poco significativo *Solenopsis invicta* depredó brocas adultas de *H. hampei* fuera de los frutos (Newson *et al.*, 2021). La etología y comunicación química de los formícidos permitió desarrollar un control biológico de la mosca de la fruta *Bacterocera zonata* que ataca mangos de la variedad Chaunsa, esto a través de la exposición de los frutos a las señales químicas de una colonia de hormigas, logrando disuadir la oviposición de *B. zonata* (Rimsha *et al.*, 2019). En otra aportación, con siete especies hormigas (cinco géneros; *Camponotus*, *Pheidole*, *Oecophylla*, *Brachyponera*, y *Megaponer*), investigaron la depredación de las larvas del gusano cogollero *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) en cultivos de maíz, en campos sin tratamiento de insecticidas, resultando ser un método de control de *S. frugiperda* de uso potencial (Dassou *et al.*, 2021). En la actualidad son relativamente pocas las feromonas reportadas de rastro en los senderos de hormigas (Czaczkes, 2018). En esta investigación se identificó a (Z)-9-hexadecenal en dos contribuciones (Chalissery *et al.*, 2019; Stringer *et al.*, 2017), este compuesto y sus análogos feromonales son de particular interés en el manejo integrado de insectos de diferentes ordenes, particularmente en la interrupción del apareamiento (Rizvi *et al.*, 2021).

En la revisión desarrollada en este trabajo, se observó una gran similitud en la elección de metodologías para la detección, identificación y producción de semioquímicos de rastro, sin embargo, se presentó una gran variabilidad de resultados. Esta tendencia puede deberse a la biología y ecología de las especies de hormigas estudiadas, fuentes de extracción de feromonas (partes del cuerpo) y distintos métodos en los bioensayos. El uso de GC-MS utilizado en la síntesis de compuestos químicos, a pesar de haber sido la metodología más recurrente, tuvo diferencias en los solventes utilizados para la elaboración de extractos, características de las columnas (afinidad polar) y el uso de metabolómica dirigida y no dirigida. La identificación de grupos funcionales útiles en los artículos analizados, y su derivatización (síntesis) a iones moleculares significativos (Attygalle *et al.*, 1998), al parecer, dependió del diagnóstico del pico cromatográfico (m/z), pero también en las fuentes de emisión de los semioquímicos, los cuales fueron a través de extractos de diversas partes del cuerpo de los artrópodos.

En México se ha identificado a cuatro especies de hormigas invasoras de alto riesgo (*Linepithema humile*, *Nylanderia fulva*, *Solenopsis invicta* y *Pheidole megacephala*) (Rosas-Mejía & Milan, 2017). Los resultados de esta revisión pueden utilizarse para la creación de compuestos feromonales sintéticos y marcar caminos artificiales que guíen a las hormigas a cebos letales o funcionar como disruptivo de este comportamiento. Estos volátiles se pueden extraer de varias partes del cuerpo de las hormigas (glándulas, gáster, cabeza, tórax, etc.), y ser caracterizados con técnicas cromatográficas o electroantenografía (incluso combinando ambas tecnologías), y comprobar su efectividad a través de bioensayos. Lo anterior expuesto, fortalece el conocimiento de los



semioquímicos de rastro de hormigas, y apoyar en la toma de decisiones para el control y/o erradicación de especies consideradas plaga.

CONCLUSIONES

En todos los artículos analizados, se demostró que la síntesis de feromonas a través de extractos resulta ser eficaz en las familias Myrmicinae, Formicinae y Dolichoderinae, el grupo funcional más sobresaliente fueron hidrocarburos de cadena larga (C12: C18), en todos los bioensayos las hormigas respondieron a los compuestos químicos marcados en los senderos. La identificación y síntesis de semioquímicos de rastro siguen siendo a través de respuestas electrofisiológicas de los himenópteros y la cromatografía de gases combinando la espectrometría de masas. Para dirigir los experimentos de seguimiento de senderos se destacó el uso de laberintos tradicionales, sin embargo, se está optando por diseños cada vez más novedosos y el uso de la tecnología, como cámaras y softwares de conteo de hormigas, para evitar que la decisión de tomar o no un camino por los formícidos provoque sesgos en los resultados.

La visión general del uso de semioquímicos de rastro tiene gran potencial para control de especies de hormigas invasoras, ya que estas no solo son capaces de seguir sus propios rastros, sino también de otras especies de formícidos. Las hormigas son un grupo muy diverso, aún falta descubrir muchos de los compuestos químicos que regulan sus comportamientos y como estos se pueden utilizar en otros grupos taxonómicos.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar la estancia posdoctoral en la Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y la Tecnología (CIACyT), Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

LITERATURA CITADA

ANGULO E, Hoffmann BD, Ballesteros-Mejia L, Taheri A, Balzani P, Bang A, Renault D, Cordonnier M, Bellard C, Diagne C, Ahmed DA, Watari Y, Courchamp F. 2022. Economic costs of invasive alien ants worldwide. *Biological Invasions*. ISSN: 1387-3547. <https://doi.org/10.1007/s10530-022-02791-w>

ATTYGALLE AB, Mutti A, Rohe W, Maschwitz U, Garbe W, Bestmann HJ. 1998. Trail Pheromone from the Pavan Gland of the Ant *Dolichoderus thoracicus* (Smith) Pheromones. *Naturwissenschaften*. 85: 275-277. ISSN: 1432-1904. <https://doi.org/10.1007/s001140050498>



AZHAGU RR, Sathish R, Prakasam A, Krishnamoorthy D, Balachandar M. 2017. Diversity and distribution of Ant species (Hymenoptera: Formicidae), in Pachaiyappa's College, Kanchipuram, Tamil Nadu, India. *J Entomol Zool Stud.* 5(1): 459-464. ISSN: 2320-7078. <https://www.entomoljournal.com/archives/?year=2017&vol=5&issue=1&ArticleId=1501>

BESTMANN HJ, Liepold B, Kress A, Hofmann A. 1999, (2S,4R,5S)-2,4-Dimethyl-5-hexanolide: Ants of Different Species *Camponotus* Can Distinguish the Absolute Configuration of Their Trail Pheromone. *Chemistry A European Journal.* 5: 2984-2989. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3765\(19991001\)5:10<2984::AID-CHEM2984>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3765(19991001)5:10<2984::AID-CHEM2984>3.0.CO;2-8)

BILLEN J, Chung-Chi L, Esteves FA. 2020. Novel exocrine glands in the foreleg coxae of *Discothyrea* ants. *Arthropod Structure & Development.* 59: 165-174. ISSN 1467-8039. <https://doi.org/10.1016/j.asd.2020.100981>

BOLOGNA A, Toffin E, Detrain C, Campo A. 2017. An automated method for large-scale monitoring of seed dispersal by ants. *Scientific Reports.* 7(1):1-12. ISSN: 2045-2322. <https://doi.org/10.1038/srep40143>

CARVALHO RL, Andersen AN, Anjos DV, Pacheco R, Chagas L, Vasconcelos HL. 2020. Understanding what bioindicators are actually indicating: Linking disturbance responses to ecological traits of dung beetles and ants. *Ecological Indicators.* 108: 105764. ISSN: 1470-160X. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105764>

CASIMIRO MS, Sansevero JBB, Queiroz JM. 2019. What can ants tell us about ecological restoration? A global meta-analysis. *Ecological Indicators.* 102: 593-598. ISSN: 1470160X. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.018>

CERDÁ X, Oudenhove VL, Bernstein C, Boulay RR. 2014. A list of and some comments about the trail pheromones of ants. *Natural Product Communications.* 9(8): 1115-1122. ISSN: 1555-9475. <https://doi.org/10.1177/1934578X1400900813>

CHALISSERY JM, Gries R, Alamsetti SK, Ardiel MJ, Gries G. 2021. Identification of the Trail Pheromone of the Pavement Ant *Tetramorium immigrans* (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Chemical Ecology.* 48(3): 302-311. ISSN: 0098-0331. <https://doi.org/10.1007/s10886-021-01317-3>

CHALISSERY JM, Renyard A, Gries R, Hoefele D, Alamsetti SK, Gries G. 2019. Ants Sense, and Follow, Trail Pheromones of Ant Community Members. *Insects.* 10(11): 1-11. ISSN: 2075-4450. <https://doi.org/10.3390/insects10110383>



CHEN S, Ding F, Hao M, Jiang D. 2020. Mapping the Potential Global Distribution of Red Imported Fire Ant (*Solenopsis invicta* Buren) Based on a Machine Learning Method. *Sustainability*. 12(23): 1-13. ISSN: 2071-1050. <https://doi.org/10.3390/su122310182>

CRISTÍN J, Bartumeus F, Méndez V, Campos D. 2020. Occupancy patterns in superorganisms: a spin-glass approach to ant exploration. *Royal Society Open Science*. 7(12): 1-16. ISSN: 2054-5703. <https://doi.org/10.1098/rsos.201250>

CSŐSZ S, Báthori F, Gallé L, Lőrinczi G, Maák I, Tartally A, Kovács É, Somogyi AA, Markó B. 2021. The Myrmecofauna (Hymenoptera: Formicidae) of Hungary: Survey of Ant Species with an Annotated Synonymic Inventory. *Insects*. 12(1): 1-14. ISSN: 2075-4450. <https://doi.org/10.3390/insects12010078>

CZACZKES TJ. 2018. Using T- and Y-mazes in myrmecology and elsewhere: a practical guide. *Insectes Sociaux*. 65(2):213-224. ISSN: 0020-1812. <https://doi.org/10.1007/s00040-018-0621-z>

D'ETTORRE P, Deisig N, Sandoz JC. 2017. Decoding ants' olfactory system sheds light on the evolution of social communication. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 114(34):8911-8913. ISSN: 0027-8424. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711075114>

DASSOU AG, Idohou R, Azandémè-Hounmalon GY, Sabi-Sabi A, Houndété J, Silvie P, Dansi A. 2021. Fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) in maize cropping systems in Benin: abundance, damage, predatory ants and potential control. *International Journal of Tropical Insect Science*. 41(4): 2627-2636. ISSN: 1742-7592. <https://doi.org/10.1007/s42690-021-00443-5>

DE ALMEIDA T, Mesléard F, Santonja M, Gros R, Dutoit T, Blight, O. 2020. Above- and below-ground effects of an ecosystem engineer ant in Mediterranean dry grasslands. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 287(1935): 1-10. ISSN: 0962-8452. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.1840>

DE GASPERIN O, Blacher P, Grasso G, Chapuisat M. 2020. Winter is coming: harsh environments limit independent reproduction of cooperative-breeding queens in a socially polymorphic ant. *Biology Letters*. 16(1): 1-5. ISSN: 1744-9561. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2019.0730>



DIAMÉ L, Rey JY, Vayssières, JF, Grechi I, Chailleux A, Diarra K. 2018. Ants: Major Functional Elements in Fruit Agro-Ecosystems and Biological Control Agents. *Sustainability*. 10(2): 1-18. ISSN: 2071-1050. <https://doi.org/10.3390/su10010023>

DU Y, Grodowitz MJ, Chen J. 2019. Electrophysiological Responses of Eighteen Species of Insects to Fire Ant Alarm Pheromone. *Insects*. 10(11): 1-15. ISSN: 2075-4450. <https://doi.org/10.3390/insects10110403>

ESCÁRRAGA M, Guerrero R. (2014). Hormigas. Un mundo de Meñiques gigantes. *INFOZOA. Boletín de Zoología*. 4: 1–16. ISSN: 2346-1837. <https://revistas.unimagdalena.edu.co/index.php/infozoa/issue/view/205>

EUBANKS MD, Lin C, Tarone AM. 2019. The role of ants in vertebrate carrion decomposition. *Food Webs*. 18: e00109 ISSN: 2352-2496. <https://doi.org/10.1016/j.fooweb.2018.e00109>

FORBES SJ, Northfield TD. 2017. *Oecophylla smaragdina* ants provide pest control in Australian cacao. *Biotropica*. 49(3): 328–336. ISSN: 00063606. <https://doi.org/10.1111/btp.12405>

FOX EGP, Adams RMM. 2022. On the Biological Diversity of Ant Alkaloids. *Annual Review of Entomology*. 67(1):367-385. ISSN: 1545-4487. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-072821-063525>

GE J, Ge Z, Zhu D, Wang X. 2020. Pheromonal Regulation of the Reproductive Division of Labor in Social Insects. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*. 8: 1-9. ISSN: 2296-634X. <https://doi.org/10.3389/fcell.2020.00837>

GORDON DM. 2021. Movement, Encounter Rate, and Collective Behavior in Ant Colonies. *Annals of the Entomological Society of America*. 114(5): 541-546. ISSN: 0013-8746. <https://doi.org/10.1093/aesa/saaa036>

GUÉNARD B, Weiser MD, Gómez K, Narula N, Economo EP. 2017. The Global Ant Biodiversity Informatics (GABI) database: synthesizing data on the geographic distribution of ant species (Hymenoptera: Formicidae). *Myrmecological News*. 24: 83-89. ISSN: 1994-4136. https://doi.org/10.25849/myrmecol.news_024:083



HAKALA SM, Seppä P, Helanterä H. 2019. Evolution of dispersal in ants (Hymenoptera: Formicidae): a review on the dispersal strategies of sessile superorganisms. *Myrmecological News*. 29: 35-55. ISSN: 1997-3500.

https://doi.org/10.25849/myrmecol.news_029:035

HAMILTON N, Jones TH, Shik JZ, Wall B, Schultz TR, Blair H.A, Adams RMM. 2018. Context is everything: mapping Cyphomyrmex-derived compounds to the fungus-growing ant phylogeny. *Chemoecology*. 28(4-5): 137-144. ISSN: 0937-7409.

<https://doi.org/10.1007/s00049-018-0265-5>

HEFETZ A. 2019. The critical role of primer pheromones in maintaining insect sociality. *Zeitschrift Für Naturforschung C*. 74(9-10): 221-231. ISSN: 1865-7125.

<https://doi.org/10.1515/znc-2018-0224>

HOEFELE D, Chalissery JM, Renyard A, Gries G. 2021. Experimentally guided development of a food bait for European fire ants. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 169(9): 780-791. ISSN: 0013-8703. <https://doi.org/10.1111/eea.13053>

HÖLLDOBLER B. 2019. "Chemical Communication in Ants: New Exocrine Glands and Their Behavioral Function". In: M. D. Breed, C. D. Michener, E. Evans, *The Biology of Social Insects*. New York, United States of America: Taylor & Francis Group. ISBN: 9780429309113. <https://doi.org/10.1201/9780429309113>

HU L, Balusu RR, Zhang WQ, Ajayi OS, Lu YY, Zeng RS, ... Chen L. 2018. Intra- and inter-specific variation in alarm pheromone produced by *Solenopsis* fire ants. *Bulletin of Entomological Research*. 108(5): 667-673. ISSN: 0007-4853.

<https://doi.org/10.1017/S0007485317001201>

HUBER JT. 2017. Biodiversity of Hymenoptera. In: Footitt RG, Adler PH, *Insect Biodiversity*. Pp. 419-461. John Wiley & Sons. ISBN:9781118945568.

<https://doi.org/10.1002/9781118945568.ch12>

JANICKI J, Narula N, Ziegler M, Guénard B, Economo E.P. 2016. Visualizing and interacting with large-volume biodiversity data using client-server web-mapping applications: The design and implementation of antmaps.org. *Ecological Informatics*. 32: 185-193. ISSN: 15749541. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.02.006>

JÍLKOVÁ V, Jandová K, Vacířová A, Kukla J. 2020. Gradients of labile carbon inputs into the soil surrounding wood ant nests in a temperate forest. *Biology and Fertility of Soils*. 56(1): 69-79. ISSN: 0178-2762. <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01402-6>



KLEEBERG I, Menzel F, Foitzik S. 2017. The influence of slavemaking lifestyle, caste and sex on chemical profiles in *Temnothorax* ants: insights into the evolution of cuticular hydrocarbons. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 284(1850), 20162249. ISSN: 0962-8452. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.2249>

KOLAY S, Boulay R, D'Ettorre P. 2020. Regulation of Ant Foraging: A Review of the Role of Information Use and Personality. *Frontiers in Psychology*. 11: 1-7. ISSN: 1664-1078. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00734>

LEITE PAM, Carvalho MC, Wilcox BP. 2018. Good ant, bad ant? Soil engineering by ants in the Brazilian Caatinga differs by species. *Geoderma*. 323: 65-73. ISSN: 00167061. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.040>

LESSARD JP. 2019. Ant community response to disturbance: A global synthesis. *Journal of Animal Ecology*. 88(3): 346-349. ISSN: 00218790. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12958>

LI TC, Shao MA, Jia YH, Jia XX, Huang LM, Gan M. 2019. Small-scale observation on the effects of burrowing activities of ants on soil hydraulic processes. *European Journal of Soil Science*. 70(2): 236-244. ISSN: 1351-0754: <https://doi.org/10.1111/ejss.12748>

MORGAN ED. 2009. Trail pheromones of ants. *Physiological Entomology*. 34(1):1-17. ISSN: 1365-3032. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.2008.00658.x>

NAKAMURA T, Harada K, Akino T. 2019. Identification of methyl 6-methylsalicylate as the trail pheromone of the Japanese pavement ant *Tetramorium tsushimae* (Hymenoptera: Formicidae). *Applied Entomology and Zoology*. 54(3): 297-305. ISSN: 0003-6862. <https://doi.org/10.1007/s13355-019-00626-0>

NEWSON J, Vandermeer J, Perfecto I. 2021. Differential effects of ants as biological control of the coffee berry borer in Puerto Rico. *Biological Control*. 160: 104666. ISSN: 10499644. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104666>

OBERPRIELER SK, Andersen AN. 2020. The importance of sampling intensity when assessing ecosystem restoration: ants as bioindicators in northern Australia. *Restoration Ecology*. 28(4): 737-741. ISSN: 1061-2971. <https://doi.org/10.1111/rec.13172>

OKRUTNIAK M, Grześ IM. 2021. Accumulation of metals in *Lasius niger*. Implications for using ants as bioindicators. *Environmental Pollution*. 268, e115824. ISSN: 02697491. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115824>



ORTIZ DP, Elizalde L, Pirk GI. 2021. Role of ants as dispersers of native and exotic seeds in an understudied dryland. *Ecological Entomology*. 46(3): 626-636. ISSN: 0307-6946. <https://doi.org/10.1111/een.13010>

ORTIZ-ALVARADO Y, Fernández-Casas R, Ortiz-Alvarado CA, Diaz-Iglesias E, Rivera-Marchand B. 2021. Behavioral flexibility in *Wasmannia auropunctata* (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Insect Science*. 21(4): 1-8 ISSN: 1536-2442. <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieab059>

O'SHEA-WHELLER TA, Hunt ER, Sasaki T. 2021. Functional Heterogeneity in Superorganisms: Emerging Trends and Concepts. *Annals of the Entomological Society of America*. 114(5): 562-574. ISSN: 0013-8746. <https://doi.org/10.1093/aesa/saaa039>

OUATTARA K, Yeo K, Kouakou LMM, Kone M, Dekoninck W, Konate, S. 2021. Influence of ant-grass association on soil microbial activity through organic matter decomposition dynamics in Lamto savannah (Côte d'Ivoire). *African Journal of Ecology*. 59(4): 1023-1032. ISSN: 0141-6707. <https://doi.org/10.1111/aje.12894>

PAGE MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R, Glanville J, Grimshaw JM, Hróbjartsson A, Lalu MM, Li T, Loder EW, Mayo-Wilson E, McDonald E, McGuinness LA, Stewart LA, Thomas J, Tricco AC, Welch VA, Whiting P, Moher D. 2021. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 71: 1-9. ISSN: 1756-1833. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

PASK GM, Slone JD, Millar JG, Das P, Moreira JA, Zhou X, Bello J, Berger SL, Bonasio R, Desplan C, Reinberg D, Liebig J, Zwiebel LJ, Ray A. 2017. Specialized odorant receptors in social insects that detect cuticular hydrocarbon cues and candidate pheromones. *Nature Communications*. 8(1):297. ISSN: 2041-1723. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00099-1>

PÉREZ-RODRÍGUEZ J, Pekas A, Tena A, Wäckers FL. 2021. Sugar provisioning for ants enhances biological control of mealybugs in citrus. *Biological Control*. 157: 1-8. ISSN: 10499644. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104573>

PINO MORENO JM, Blasquez JR-E. 2021. Taxonomic Analysis of Some Edible Insects From the State of Michoacán, Mexico. *Frontiers in Veterinary Science*. 8: 1-10. ISSN: 2297-1769. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.629194>



RENYARD A, Alamsetti SK, Gries R, Munoz A, Gries G. 2019. Identification of the Trail Pheromone of the Carpenter Ant *Camponotus modoc*. *Journal of Chemical Ecology*. 45(11-12): 901-913. ISSN: 0098-0331. <https://doi.org/10.1007/s10886-019-01114-z>

RETHLEFSEN ML, Kirtley S, Waffenschmidt S, Ayala AP, Moher D, Page MJ, Koffel JB. 2021. PRISMA-S: an extension to the PRISMA Statement for Reporting Literature Searches in Systematic Reviews. *Systematic Reviews*. 10(1): 1-19. ISSN: 2046-4053. <https://doi.org/10.1186/s13643-020-01542-z>

RIBBENSTEDT A, Ziarrusta H, Benskin JP. 2018. Development, characterization and comparisons of targeted and non-targeted metabolomics methods. *PLOS ONE*. 13(11): 1-18. ISSN: 1932-6203. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207082>

RIMSHA T, Zarnab F, Mirza AQ, Shafqat S, Muqarrab A. 2019. Oviposition Deterrence of Fruit fly in Treated Mangoes with Ant cues and Fungus *B. bassiana*. *Agric. Sci. J.* 1(1):48-57. ISSN: 2707-9724. <https://asj.mnsuam.edu.pk/index.php/asj/article/view/27>

RIZVI SAH, George J, Reddy GVP, Zeng X, Guerrero A. 2021. Latest Developments in Insect Sex Pheromone Research and Its Application in Agricultural Pest Management. *Insects*. 12(6): 1-26. ISSN: 2075-4450. <https://doi.org/10.3390/insects12060484>

ROSAS-MEJÍA M, Janda M. 2017. Informe y análisis de riesgo para las hormigas: argentina (*Linepithema humile*), loca (*Paratrechina fulva*), roja de fuego (*Solenopsis invicta*) y cabezona (*Pheidole megacephala*) y protocolo de Análisis de riesgo para hormigas exóticas para México. Informe entregado a la CONABIO y al PNUD en el marco del proyecto GEF 083999. <https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/Invasoras/proyecto/resultados-componente-I>

SARKIS-ONOFRE R, Catalá-López F, Aromataris E, Lockwood C. 2021. How to properly use the PRISMA Statement. *Systematic Reviews*. 10(1): 1-3. ISSN: 2046-4053. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01671-z>

SEKO Y, Hashimoto K, Koba K, Hayasaka D, Sawahata T. 2021. Intraspecific differences in the invasion success of the Argentine ant *Linepithema humile* Mayr are associated with diet breadth. *Scientific Reports*. 11(1): 1-10. ISSN: 2045-2322. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82464-1>

STORK NE. 2018. How Many Species of Insects and Other Terrestrial Arthropods Are There on Earth? *Annual Review of Entomology*. 63(1): 31-45. ISSN: 0066-4170. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043348>



STRINGER LD, Corn JE, Sik RH, Jiménez-Pérez A, Manning LA M, Harper AR, Suckling DM. 2017. Thigmotaxis Mediates Trail Odour Disruption. *Scientific Reports*. 7(1): 1-8. ISSN: 2045-2322. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01958-z>

STÜBER M, Tack AJM, Zewdie B, Mendesil E, Shimaes T, Ayalew B, ... Hylander K. 2021. Multi-scale mosaics in top-down pest control by ants from natural coffee forests to plantations. *Ecology*. 102(7): 1-8. ISSN: 0012-9658. <https://doi.org/10.1002/ecy.3376>

SUITER DR, Gochnour BM, Holloway JB, Vail KM. 2021. Alternative Methods of Ant (Hymenoptera: Formicidae) Control with Emphasis on the Argentine Ant, *Linepithema humile*. *Insects*. 12(6): 1-13. ISSN: 2075-4450. <https://doi.org/10.3390/insects12060487>

SWANSON AC, Schwendenmann L, Allen MF, Aronson EL, Artavia-León A, Dierick D, Fernández-Bo AS, Harmon TS, Murillo-Cruz C, Oberbauer SF, Pinto-Tomás AA, Rundel PW, Zelikova TJ. 2019. Welcome to the Atta world: A framework for understanding the effects of leaf-cutter ants on ecosystem functions. *Functional Ecology*. 33(8): 1386-1399. ISSN: 0269-8463. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13319>

TAY JW, Choe DH, Mulchandani A, Rust MK. 2020. Hydrogels: From Controlled Release to a New Bait Delivery for Insect Pest Management. *Journal of Economic Entomology*. 113(5): 2061-2068. ISSN: 0022-0493. <https://doi.org/10.1093/jee/toaa183>

THURMAN JH, Northfield T D, Snyder WE. 2019. Weaver Ants Provide Ecosystem Services to Tropical Tree Crops. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 7: 1-9. ISSN: 2296-701X. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00120>

TIBCHERANI M, Nacagava VAF, Aranda R, Mello RL. 2018. Review of Ants (Hymenoptera: Formicidae) as bioindicators in the Brazilian Savanna. *Sociobiology*. 65(2): 112-129. ISSN: 2447-8067. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v65i2.2048>

TRIGOS-PERAL G, Juhász O, Kiss PJ, Módra G, Tenyér A, Maák I 2021. Wood ants as biological control of the forest pest beetles Ips spp. *Scientific Reports*. 11(1): 1-10. ISSN: 2045-2322. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96990-5>

VANDER MEER RK, Alonso LE. 2019. "Pheromone Directed Behavior in Ants". In: Vander Meer RK, Breed MD, Espelie KE, Winston ML, *Pheromone Communication in Social Insects*. New York, United States of America: Taylor & Francis Group. Pp. 158-192. ISBN: 9780429301575. <https://doi.org/10.1201/9780429301575>



WELZEL KF, Choe DH. 2016. Development of a Pheromone-Assisted Baiting Technique for Argentine Ants (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*. 109(3): 1303-1309. ISSN: 0022-0493. <https://doi.org/10.1093/jee/tow015>

WILLS BD, Landis DA. 2018. The role of ants in north temperate grasslands: a review. *Oecologia*. 186(2): 323-338. ISSN: 0029-8549.
<https://doi.org/10.1007/s00442-017-4007-0>

WYATT TD. 2017. Pheromones. *Current Biology*. 27(15): 739-743. ISSN: 09609822.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.06.039>

XU T, Xu M, Lu Y, Zhang W, Sun J, Zeng R, Ted CJ, Chen L. 2021. A trail pheromone mediates the mutualism between ants and aphids. *Current Biology*. 31(21): 4738-4747. ISSN: 09609822. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.08.032>

ZHONG Z, Li X, Sanders D, Liu Y, Wang L, Ortega YK, ... Wang D. 2021. Soil engineering by ants facilitates plant compensation for large herbivore removal of aboveground biomass. *Ecology*. 102(5): 1-11. ISSN: 0012-9658. <https://doi.org/10.1002/ecy.3312>

[Errata Erratum](#)

<https://abanicoacademico.mx/revistasabanico-version-nueva/index.php/abanico-veterinario/errata>