



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

“FRANCISCO GARCÍA SALINAS”



UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DE LA LUZ Y LA MATERIA

“Estudio sobre los efectos de la
aplicación de estímulos sonoros y luz
UV sobre muestras de ácaro varroa
destructor mediante la aplicación de
técnicas ópticas.”

T E S I S

para obtener el grado de Maestro en Ciencias

PRESENTA:

Daniel Gaytán Saldaña

DIRECTORES DE TESIS:

Dr. Tonatiuh Saucedo Anaya

Dr. José Luis Silva Acosta

Zacatecas, Zac., México

Octubre 2024

Declaración de autenticidad

Manifiesto que el presente trabajo de tesis de Maestría es original y no ha sido presentado total o parcialmente para obtener otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo dentro de la Maestría en Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia y no contiene plagio o copia de ninguna naturaleza, dando el crédito correspondiente a otros documentos de investigación o similares tales como tesis, artículos o publicaciones de otros grupos o personas, reportando de manera puntual y adecuada las respectivas fuentes bibliográficas. Asimismo, declaro que soy plenamente consciente de que el incumplimiento de la presente declaración de autenticidad, dará lugar a sanciones universitarias y legales conforme a la normativa vigente.

Daniel Gaytán Saldaña

Zacatecas, Zac., mes año

Comité de seguimiento y evaluación

SINODALES:

Dr. Tonatiuh Saucedo Anaya

Dr. José Luis Silva Acosta

Dr. Rogelio Rodríguez González

Dr. Cruz Octavio Robles Roveló

Dr. Iván Moreno Hernández

Dedicatoria

“El hombre es mortal por sus temores e inmortal por sus deseos.”

– -Pitágoras

A mi hija Daniela, motor de mi vida, quién con su alegría y su sonrisa me impulsa
siempre a ser mejor profesionista y padre para ella.

A mis padres, quienes me han apoyado en cada unos de mis proyectos de vida, quienes
han depositado en mi su confianza, su amor y sus esfuerzos para que yo consiguiera
siempre cada objetivo en mi vida.

A mi esposa, quien me ha apoyado siempre en mi camino hacia mis metas, mi
compañera de vida y de carrera que me ha impulsado conseguir mis objetivos.

A mis hermanas, Juanis, Norma, Liz, Mayte y Diana, quienes siempre me han animado
a ser mejor, a desarrollarme como persona, hermano y profesionista.

Daniel Gaytán Saldaña

Agradecimientos

Mi agradecimiento más sincero al Dr. Tonatiuh Saucedo Anaya por fungir como mi asesor, por su guía y su conocimiento. Al Dr José Luis Silva Acosta, por fungir como mi co-asesor, por compartir sus conocimientos y ser un gran apoyo durante toda la realización de mi proyecto de tesis Al Dr. Rogelio Rodríguez González, el Dr. Cruz Octavio Robles Roveló y el Dr. Iván Moreno Hernández por aceptar ser mis sinodales y revisores, gracias por sus acertadas observaciones que ayudaron a mejorar el presente trabajo de investigación.

A mis profesores durante la maestría, El Dr. Isaac Rodríguez Vargas, el Dr Samuel Pérez Huerta, El Dr. Jaime Suárez López, y el Dr Agustín Enciso, quienes me proveyeron de las bases del conocimiento necesarias para poder egresar con éxito de esta maestría.

Resumen

La Interferometría Holográfica Digital (o IHD por sus siglas) es una técnica que consiste en la comparación interferométrica de dos o más frentes de onda. Esta técnica posee una alta precisión para medición de propiedades físicas. Es por ello que para el desarrollo del presente trabajo se utiliza un arreglo cuya base es la IHD con el cual se obtuvo como resultado la detección de cambios en muestras de ácaro varroa al aplicarles ultrasonido. Esto con la finalidad de establecer sus efectos sobre estas muestras y conocer si es posible su desprendimiento de sus hospederos mas habituales: las abejas.

Por otra parte, la luz ultravioleta posee diferentes propiedades, que la provee de características singulares que se manifiestan como efectos diferentes al ser aplicada en objetos, tejidos o muestras de insectos. A partir de esto, se presentan los efectos observados al aplicar luz ultravioleta sobre muestras de ácaro varroa, así como sus efectos sobre su morfología, los cuales son medidos mediante el uso de la IHD, con el propósito de establecer si este tipo de luz puede ser utilizada para el combate de este ácaro; principal plaga de las colmenas de abejas.

PALABRAS CLAVE: Interferometría Digital, Ácaro varroa, Abejas, Luz Ultravioleta.

Abstract

Digital Holographic Interferometry is a technique that involves the interferometric comparison of two or more wavefronts. This technique has high precision for measuring physical properties. For this reason, in the development of the present work, an arrangement based on DHI was used, which resulted in the detection of changes in Varroa mite samples when applying ultrasound to them. This was done to determine its effects on these samples and to see if it is possible to detach them from their most common hosts: bees.

On the other hand, ultraviolet light possesses different properties, providing it with unique characteristics that manifest as different effects when applied to objects, tissues, or insect samples. Based on this, the observed effects of applying ultraviolet light to Varroa mite samples are presented, as well as its effects on their morphology, which are measured using DHI, with the aim of determining whether this type of light can be used to combat this mite, the main pest of bee colonies.

KEYWORDS: Digital Holographic Interferometry, Varroa mite, Bees, UV Light

Índice general

	Página
Declaración de autenticidad	II
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	VI
Abstract	VII
Índice de figuras	XII
Índice de tablas	XVI
1 Problematización	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Hipótesis	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Alcances y limitaciones	4
1.4 Justificación	5

2	Antecedentes	7
2.1	Estudio exploratorio de apis mellifera	7
2.2	Ciclo de vida y reproducción	8
2.3	Principales enfermedades	11
2.4	Varroasis	12
2.4.1	Diagnóstico	13
2.4.2	Tratamiento	13
2.5	Escarabajo de la colmena(<i>Aethina tumida</i>)	14
2.6	Loque Americana	15
2.7	Impacto de la varroasis y otras enfermedades de las abejas en la industria apicultora	16
2.8	Estudio exploratorio de la morfología del Ácaro Varroa	18
2.8.1	Taxonomía	19
2.8.2	Morfología y biología	19
3	Holografía Digital	23
3.1	Principios básicos de Interferometría óptica	23
3.2	Tipos de interferómetros	25
3.3	Diferencia de fase óptica	29
3.4	Interferometría Holográfica Digital	30
3.4.1	Principio matemático	30
3.5	Interferometría Holográfica Digital de promedio temporal	33
3.5.1	Principio matemático	33
4	Principios físicos de la aplicación de ultrasonido y radiación de luz ultravioleta como control de plagas	37
4.1	Vibraciones	38

4.2	Modos vibracionales	39
4.3	Teoría de placas y láminas	40
4.4	Análisis de las hipótesis	41
4.4.1	a) Desplazamiento transversal pequeño: $w \ll h$	41
4.4.2	b) El plano medio no cambia de longitud: $u_0, v_0 \approx 0$	41
4.4.3	c) No hay distorsión fuera del plano: $\gamma_{xz}, \gamma_{yz}, \epsilon_z \approx 0$	42
4.4.4	d) Tensiones fuera del plano son pequeñas	42
4.5	Conclusiones importantes	42
4.5.1	Ecuaciones cinemáticas y constitutivas	43
4.5.2	Solicitaciones	44
4.5.3	Signos y equilibrio	47
4.6	Luz ultravioleta: principales características	49
4.6.1	Principios físicos de la radiación	50
5	Análisis vibracional del ácaro varroa destructor	51
5.1	Modelado	51
5.2	Arreglo Experimental y Adquisición de hologramas	56
6	Estudio de los efectos de la aplicación de luz ultravioleta en el ácaro varroa	68
6.1	Procedimiento experimental	68
6.1.1	Arreglo experimental y adquisición de hologramas	69
6.1.2	Colecta de muestra de ácaro Varroa	71
6.1.3	Procesamiento de Hologramas	72
6.1.4	Resultados y discusión	73
7	Conclusiones	79

Bibliografía

81

Índice de figuras

1.1	Comparación de morfología entre a) Una abeja[1], b) Ácaro varroa.	2
2.1	A) Varroa jacobsoni Oud. hembra. Vista ventral: 1) Aparato bucal (gnatosoma). Arterios de las patas: 2) coxa; 3) trocanter; 4) fémur; 5) rodilla; 6) tibia; 7) tarso; 8) ambulacro con garras y ventosas. Escudos: 9) esternal; 10) ventral; 11) metapodal; 12) peritremal; 13) anal, con el orificio anal; 14) borde del escudo dorsal, encorvado hacia la parte ventral; 15) estigma con el tubo peritremal (aparato traqueal). B): Varroa jacobsoni Oud. macho. Vista ventral: 1) escudo esternal; 2) orificio genital; 3) aparato traqueal; 4) queliceros (ganchos) modificados[12]	20
2.2	Sincronización del ciclo de desarrollo de Varroa jacobsoni Oud. con el ciclo de desarrollo de la abeja. En el lado derecho se presenta el desarrollo de la abeja obrera y de lado izquierdo el del zángano. El pequeño punto blanco representa a la varroa desde que es insertada durante la operculación de la celda.[12]	22
3.1	Representación gráfica de las partes de una onda unidimensional[7].	24
3.2	Diagrama esquemático que muestra el principio de superposición en el experimento de Young[20]	26

3.3	Representación esquemática en dos dimensiones del valor absoluto de la ecuación (3.32). b) Representación esquemática de un perfil diagonal por el centro de los lóbulos de la Figura a). c) Imagen real del valor absoluto de la ecuación (3.32).[22]	32
4.1	Representación esquemática de un espectrograma de una vibración.[25] . . .	39
4.2	Representación de los modos vibracionales en un cuerpo rígido.[25]	40
4.3	Vista lateral de placa bajo carga uniforme q : equivalencia de tensiones y momentos flectores en borde de coordenada $n(x$ o $y)$ mayor.	45
4.4	Signos de esfuerzos: fuerzas y momentos por unidad de profundidad para un elemento diferencial de placa en coordenadas cartesianas. Figura no a escala.	48
5.1	Representación gráfica del cuerpo de la varroa.	52
5.2	Gráfica de la solución a la ecuación diferencial propuesta. Se muestran las dos frecuencias de resonancia en 59 y 228 kHz aproximadamente.	54
5.3	Representación de la simulación del primer modo de resonancia obtenido de la aproximación numérica de la Ec. (5.1).	55
5.4	(a) Vista superior del arreglo interferométrico por reflexión. (b) Vista lateral del arreglo interferométrico por reflexión.	56
5.5	Ácaro varroa observado mediante el arreglo interferométrico de la Figura 5.4.	57
5.6	Interferograma del Ácaro varroa durante la aplicación de estímulo sonoro aleatorio	58
5.7	Ácaro varroa durante la aplicación de: a) 125Hz, b) 130 Hz, c) 135 Hz y d) 140 Hz. se pueden observar las franjas de interferencia generadas por el estímulo sonoro aplicado	59

5.8	Ácaro varroa observado durante la aplicación de: a) 145Hz, b) 150 Hz, c) 155 Hz y d) 160 Hz. Se aprecia una franja.	59
5.9	Ácaro varroa observado durante la aplicación de: a) 200Hz, b) 210 Hz y c) 220 Hz.	60
5.10	Ácaro varroa observado durante la aplicación de: a) 230Hz, b) 235 Hz y c) 240 Hz.	60
5.11	Ácaro varroa observado durante la aplicación de: a) 245Hz, b) 250 Hz y c) 255 Hz.	61
5.12	Ácaro varroa observado durante la aplicación de: a) 260Hz, b) 265 Hz y c) 270 Hz.	61
5.13	Ácaro varroa observado durante la aplicación de: a) 290Hz y b) 295 Hz . . .	62
5.14	Ácaro varroa observado durante la aplicación de 310 Hz.	62
5.15	Gráfica de la función $\text{sinc}^2(x)$	65
5.16	Levitador ultrasónico armado para el análisis del ácaro sin necesidad de un portaobjetos.	66
6.1	Representación del arreglo experimental para irradiación luz UV.	69
6.2	Vista superior del arreglo experimental para irradiación luz UV armado. . .	70
6.3	Muestra de ácaro varroa colectada.	71
6.4	Representación gráfica del procesamiento de los hologramas	72
6.5	Reconstrucción de la amplitud de cuatro especímenes de Varroa destructor. Los hologramas fueron registrados con un láser UVA a $\lambda = 355$ nm.	74

6.6	Mapas de diferencia de fase extraídos de una serie de hologramas registrados con un láser UVA a $\lambda = 355$ nm. Cada mapa de diferencia de fase fue obtenido entre dos hologramas consecutivos. (a) Diferencia de fase a los 1.6 minutos. (b) Diferencia de fase a los 3.2 minutos. (c) Diferencia de fase a los 4.8 minutos. (d) Diferencia de fase a los 6.4 minutos. (e) Diferencia de fase a los 8.0 minutos. (f) Diferencia de fase a los 9.6 minutos. (g) Diferencia de fase a los 11.2 minutos. (h) Diferencia de fase a los 12.8 minutos. (i) Diferencia de fase a los 14.4 minutos.	75
6.7	(a) Mapa de desplazamiento extraído de la Figura 4b, (b) mapas de desplazamiento extraídos de la Figura 6.5.	76
6.8	Valor promedio de desplazamiento a lo largo del tiempo	77

Índice de tablas

2.1	Ciclo evolutivo de la apis mellífera en días [10].	9
2.2	Descripción de las fases de desarrollo de las abejas.	9
2.3	Relación entre el nivel de infestación y disminución de la producción, donde el “% de Varroas” se refiere al porcentaje de la colmena infestado [4].	17
2.4	Descripción morfológica de las cinco fases del ciclo biológico para los individuos de ambos sexos del ácaro Varroa. [12].	21
6.1	Parámetros de la ecuación (6.2) para el mejor ajuste de los datos experi- mentales	77

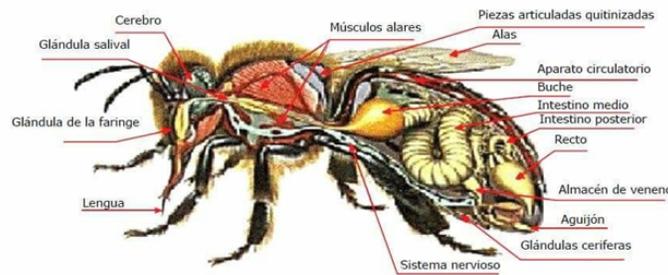
Capítulo 1

Problematización

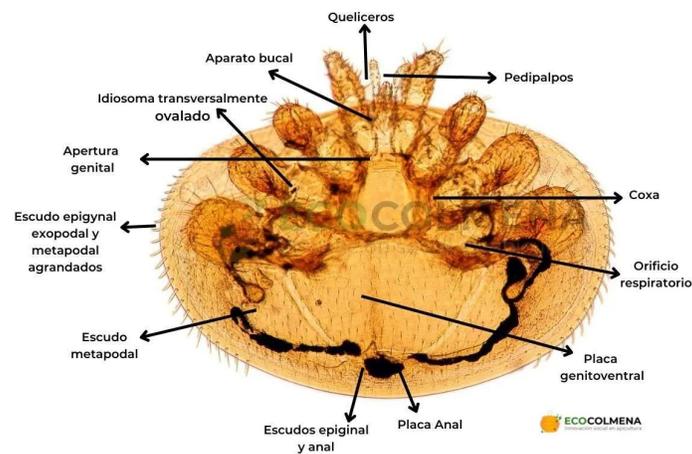
1.1. Planteamiento del problema

Las abejas son los polinizadores más importantes de las plantas con flores o magnoliófitas. Se calcula que la tercera parte de los alimentos humanos son polinizados por insectos, fundamentalmente abejas. La fauna polinizadora tiene un papel importante dentro del ciclo de vida de las especies vegetales en la tierra. En el caso específico de la *Apis mellifera* se trata además de una fuente de producción de miel y por tanto de ingresos económicos para el ser humano. Se conoce como abejas a un grupo de familias del orden Himenóptera conocido como “Apiformes” o “Anthophila” que se diferencian de otros insectos del mismo orden por tener: 1) pelos ramificados o plumosos en alguna parte de su cuerpo (Fig. 1), y 2) porque el basitarso de la pata posterior es más ancho que los tarsos que le siguen (Fig. 2). Muchas de ellas son más robustas y peludas que las avispas y pueden diferenciarse fácilmente de éstas, sin embargo, algunas abejas parásitas son esbeltas y carecen de pelos. Desde el punto de vista comportamental, las abejas difieren de otros Himenóptera porque dependen del polen como fuente de proteína para alimentar a sus crías, así que se podrá encontrar una avispa o una hormiga alimentándose de néctar de una flor, pero no de su

polen[1].



(a) Morfología básica de una abeja.



(b) Representación esquemática de la morfología básica del Ácaro varroa.

Figura 1.1: Comparación de morfología entre a) Una abeja[1], b) Ácaro varroa.

La actual problemática en torno a la *Apis mellifera* es su infestación por parte del ácaro varroa destructor, el cual se deposita en los especímenes y va en detrimento de su salud y desempeño vital. El ácaro varroa vive a una temperatura correspondiente a la del nido de abejas melíferas, que es de aproximadamente 34 a 35 °C. Los bioensayos de laboratorio indicaron que muestra una clara preferencia por temperaturas de aproximadamente 32 °C ± 2,9 °C [2] y que las preferencias de temperatura difieren entre los ácaros de invierno y los jóvenes de verano [3]. El ácaro puede discriminar diferencias de temperatura tan bajas como aproximadamente 1 °C [3]. El ácaro varroa destructor ostensiblemente experimenta

temperaturas más bajas cuando viaja en abejas recolectoras fuera de la colmena, como lo demuestran los muchos ácaros importados a las colonias de abejas melíferas no infestadas por las abejas en busca de alimento que regresan de robar colonias infestadas (42) o que van a la deriva entre colonias adyacentes[2]. El ácaro varroa destructor, es un ácaro parásito externo que ataca y se alimenta de las abejas. Actualmente se utilizan diversos productos químicos para el control de este ácaro, pero todos cuentan con desventajas que comprometen la integridad de las abejas y la Colmena. Por este motivo, en el presente proyecto se propone realizar un estudio vibracional y de irradiación a este ácaro, mediante técnicas ópticas no destructivas. La caracterización morfológica implica el análisis de la estructura del ácaro varroa destructor. Esto incluye aspectos físicos de la apariencia externa, así como aspectos de la estructura interna. Por otra parte, el estudio vibracional implica la determinación de las frecuencias de resonancia del ácaro mediante la aplicación de estímulos vibraciones. Estas frecuencias de resonancia están relacionadas a propiedades físicas y mecánicas del ácaro que podrían ser ayuda en el control o eliminación del ácaro.

1.2. Hipótesis

La aplicación de ultrasonido y luz ultravioleta sobre muestras de ácaro varroa destructor pueden generar efectos adversos sobre el ácaro y su morfología, que ayuden a su eliminación en la colmena, estos efectos pueden ser monitoreados y medidos utilizando técnicas de interferometría holográfica digital.

1.2.1. Objetivo general

Medir mediante Interferometría Holográfica Digital (IHD) los efectos de la aplicación de estímulos ultrasónicos y de exposición a luz ultravioleta sobre el ácaro “varroa destructor” para contribuir al conocimiento científico sobre estas propiedades, abriendo futuras

líneas de investigación y contribuir al desarrollo de métodos más eficientes y sin impactos negativos para el control o eliminación de este ácaro.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Documentar e investigar sobre el ciclo de vida, dinámica poblacional y signos clínicos del ácaro varroa destructor y de la metrología óptica
2. Documentar e investigar sobre las actuales técnicas de diagnóstico y tratamiento de la infestación por ácaro varroa destructor
3. Armar un arreglo óptico interferométrico para el análisis del ácaro
4. Realizar estudios vibracionales y ópticos del ácaro varroa destructor
5. Determinar si las frecuencias de resonancia tienen efectos en el desprendimiento del ácaro sobre la abeja portadora.
6. Determinar si la aplicación de irradiación de luz ultravioleta genera efectos sobre el ácaro varroa.
7. Medir los efectos observados de la luz ultravioleta sobre el ácaro varroa.

1.3. Alcances y limitaciones

Los alcances establecidos para el presente trabajo se delimitan en la zona apiaria del estado de Zacatecas, con posibilidades de extenderse a zonas con razas similares tanto de ácaro como de abeja. Asimismo, las limitaciones sobre las muestras estudiadas se delimitan hacia muestras in vitro y sin vida.

1.4. Justificación

Los organismos polinizadores desempeñan un rol fundamental en la agricultura y consecuentemente en la seguridad alimentaria[4]. Las abejas son insectos que por excelencia participan en esta tarea, por lo que representan un papel fundamental en la economía y ecología de diversos ecosistemas. Una gran parte de los alimentos que hoy en día se consumen y comercializan masivamente dependen directa o indirectamente de la polinización que estas llevan a cabo, en los Estados Unidos de América son responsables de originar casi 3 billones de dólares en frutas y vegetales producidas anualmente[5]. Sin embargo, la presencia de múltiples factores limitantes puede incidir sobre la productividad de la abeja; las parasitosis externas, lo que disminuye notable y drásticamente su rendimiento; la varroasis que es una enfermedad de las más temidas por los apicultores en todo el mundo, y se trata de una parasitosis externa y contagiosa causada por el ácaro varroa destructor (anteriormente conocido como varroa jacobsoni), que afecta tanto a las abejas adultas, así como a sus crías. Se encuentra en todo el mundo salvo en Australia y la isla sur de Nueva Zelanda.

La varroasis, también llamada varroatosis, se considera actualmente la mayor amenaza para la apicultura a nivel mundial. Tradicionalmente, esta enfermedad se ha definido como la infestación de las abejas melíferas por varroa spp. Sin embargo, debido al creciente conocimiento de los virus vectorizados por este ácaro y su importante papel confirmado en los colapsos de colonias inducidos por varroa, esta definición ya no es representativa del proceso completo de la enfermedad[6]. Hay más de 20 virus conocidos identificados en las abejas melíferas, y se ha demostrado que el ácaro varroa destructor puede actuar como vector del virus del ala deformada (DWV), el virus de la parálisis aguda de las abejas (ABPV), el virus de la abeja de Cachemira (KBV) y el virus de la parálisis aguda israelí (IAPV), entre otros[7]. La mayoría de estos virus de las abejas melíferas son de ARN

dextrógiro y pertenecen al orden Picornavirales (virus tipo picorna). Debido a la importancia de las abejas y a todos los problemas ocasionados por el ácaro varroa destructor, es deseable un estudio de sus propiedades físicas y mecánicas para ayudar al desarrollo de métodos eficientes y sin impactos negativos para el control o eliminación de este ácaro.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Estudio exploratorio de apis mellifera

Las abejas melíferas son uno de los insectos más estudiados, principalmente debido a su papel crucial en la agricultura y el ecosistema, así como a su alto valor económico. En vista de la preocupación por la disminución global de las abejas experimentada en muchas regiones del mundo, y teniendo en cuenta su importancia económica, la financiación ha estado fácilmente disponible para la investigación. La abeja melífera es un modelo de investigación fascinante, su percepción positiva en general y su eusocialidad e importancia para la seguridad alimentaria y los servicios del ecosistema la convierten en un organismo modelo de elección[8]. Por lo tanto, no es sorprendente que se hayan empleado una gran variedad de métodos de investigación, evaluando e investigando diferentes aspectos de este organismo, por ejemplo, sus interacciones con parásitos y plagas, la ecología conductual y química de este super organismo, así como aspectos de la cría y la dinámica poblacional, por nombrar algunos. Dado que el interés en las abejas melíferas abarca desde la investigación aplicada hasta la fundamental, se utilizan numerosas técnicas básicas en todas las disciplinas[8].

En una revisión de la encuesta nacional agropecuaria del INEGI en 2016, se encontró que hay 7,080 apiarios en México que tienen al menos una colmena, y se estima que hay alrededor de 613,090.22 hectáreas de terrenos con apiarios. Sin embargo, la cantidad de colmenas por apiario y el área de pastoreo de las abejas no están claros. Aunque se sabe el número de colmenas y una aproximación del número de apiarios, aún es necesario integrar información geográfica sobre su ubicación, tanto de aquellos que se mueven para aprovechar diferentes floraciones como de aquellos con manejo sedentario[9].

Si se divide la superficie estimada por el número de colmenas reportado, se sugiere que hay entre 3 y 3.5 colmenas por hectárea a nivel nacional, lo cual es bajo. Sin embargo, México tiene cinco regiones apícolas principales (Altiplano, Costa del Pacífico, Norte, Golfo y Península de Yucatán) que no tienen la misma representación nacional en la producción de miel. Por lo tanto, es necesario integrar mejor los datos sobre el número de colmenas por territorio (región, estado, municipio) y el área de pastoreo de las abejas. Además, la saturación de colmenas está influenciada por los tipos de floración, ya sea natural o de cultivos. Por ejemplo, la miel de naranjo o azahar que se produce en las zonas cítricas o la miel mantequilla proveniente del altiplano mexicano presenta un mayor número de colonias asociadas[9].

2.2. Ciclo de vida y reproducción

Las abejas presentan 3 castas de individuos: reina, obreras y zánganos. Todas estas castas pasan por fases de desarrollo, que van desde el huevo, pasando por la larva y la pupa, hasta alcanzar la forma adulta o campeona. Este período de desarrollo se define como ciclo evolutivo o ciclo de vida si se incluyen las fases de reproducción y puesta de huevos. Este ciclo se puede observar en la tabla 2.1 y su duración en la tabla 2.2.

Tabla 2.1: Ciclo evolutivo de la apis mellífera en días [10].

Fases	Duración en días		
	Reina	Obrera	Zángano
Huevo	3.0	3.0	3.0
Larva	5.0	6.0	6.5
Pupa y pre pupa	7.0	12.0	14.5
Total	15.0	21.0	24.0

Tabla 2.2: Descripción de las fases de desarrollo de las abejas. [11]

TIEMPO	OBRERA	REINA	ZÁNGANO
1º a 3º día	Huevo	Huevo	Huevo
3º	Eclosión de huevo	Eclosión de huevo	Eclosión de huevo
3º a 8º día	Larva	Larva	Larva
8º	Larva	Célula operculada	Larva
8º a 9º día	La celda está tapada; la larva teje el capullo	A larva teje capullo	La celda está tapada; la larva teje el capullo
10º a 10º 1/2 día	Pre-pupa	Pre-pupa	Tejido de capullo
11º día	Pre-pupa	Pupa	Pre-pupa
12º día	Pupa	Pupa	Pre-pupa
16º día	Pupa	Insecto Adulto	Pupa
21º día	Insecto Adulto	-	-
24º día	-	-	Insecto Adulto

Continúa en la siguiente página

Tabla 2.2 – Continuación de la página anterior

TIEMPO	OBRERA	REINA	ZÁNGANO
1º a 3º día	Incubación y limpieza	Reina Joven	Vive solo para la colmena
4º día	Comienza a alimentar a las larvas	Reina Joven	Inicio de vuelos
5º día	Alimenta las larvas	Vuelo nupcial	Busca reina para fecundar
5º a 6º día	Alimenta larvas jóvenes, produce jalea real, hace los primeros vuelos	La reina es alimentada	Busca reina para fecundar
8º a 12º día	Alimenta larvas jóvenes, produce jalea real, hace los primeros vuelos	La reina empieza a engordar	Si se aparea, muere
13º a 19º día	Trabajo de campo	Inicia la postura	Si se aparea, muere
21º a 30º día	Forma campeona	Puesta de huevos	Si se aparea, muere
31º día	Forma campeona	Puesta de huevos	Muere

Continúa en la siguiente página

Tabla 2.2 – Continuación de la página anterior

TIEMPO	OBRERA	REINA	ZÁNGANO
31 ^o a 45 ^o día	Colecta polen y néctar	Puesta de huevos	-
55 ^o día	Muere	Puesta de huevos	-
720 ^o - 1450	-	Puede volar con todas sus abejas más viejas hacia otro destino. Posteriormente muere	-

2.3. Principales enfermedades

La actividad apícola sufre graves pérdidas económicas debido a las enfermedades y parásitos que afectan a las abejas melíferas. Estos problemas pueden causar desde una disminución en la producción de miel hasta la destrucción completa de la colmena. Además, las medidas preventivas y de control utilizadas para manejar esta problemática resultan costosas y disminuyen la rentabilidad de la actividad. Entre las principales enfermedades que pueden presentar las abejas de una colmena se encuentran la Varroasis, la infestación por escarabajo de la colmena, la Loque americana y europea, Nosemosis y la cría de cal. Dichos padecimientos se detallan en los párrafos siguientes. Para los propósitos del presente trabajo, se hará un enfoque particularmente más extenso en la varroasis.

2.4. Varroasis

Este parásito fue descubierto por E. Jacobson en 1904 sobre la especie *Apis cerana* en la isla de Java, en el archipiélago de Indonesia. Su descripción y clasificación se realizan ese mismo año por el investigador holandés Oudemans. En 1918 H. Buttel Reepen estudió el desarrollo del ácaro sobre ninfas de zánganos en la isla de Sumatra. En las tres décadas siguientes no se realizaron investigaciones sobre este parásito, pero a partir de 1948 comenzó a aparecer la varroasis fuera de Indonesia, primero en Tailandia y la Unión Soviética. Y, por primera vez, en 1958, en China sobre la abeja común *Apis mellífera*[12]. La Varroasis es considerada como el principal problema sanitario en la apicultura a nivel mundial, y es responsable de la pérdida total de colonias si no se trata adecuadamente. Las abejas afectadas tienen una vida útil un 50 % menor que las no afectadas, lo que contribuye a su elevada mortalidad. En el estado de Yucatán, México, los apicultores han reportado pérdidas de entre el 30 % y el 70 % de las colonias infestadas con el ácaro *Varroa destructor*. La producción de miel se reduce hasta en un 65 %, dependiendo del grado de infestación, la fortaleza de la colmena y las condiciones ambientales[13]. El *V. destructor* es un ácaro ectoparásito de tamaño similar al de la cabeza de un alfiler, que mide aproximadamente 1,6 mm y es de color castaño rojizo. Los machos son un poco más pequeños y de color blanco. Su ciclo de vida dura entre 90 y 100 días, aunque esto puede variar según las condiciones ambientales[13]. La *Varroa* daña a las abejas al alimentarse de la hemolinfa de las larvas y los adultos, y tiene una preferencia por las crías de los zánganos. Además, actúa como vector de virus y otros patógenos, ya que los daños físicos que causa al alimentarse son una fuente de entrada para hongos y bacterias en las abejas adultas y larvas[13].

2.4.1. Diagnóstico

Para determinar los porcentajes de infestación de varroasis de acuerdo con la NOM-001-ZOO-1994, la prueba de elección es la descrita por David De Jong, también conocida como lavado de abejas que tiene como finalidad desprender los ácaros del cuerpo de las abejas, los cuales se contabilizan al igual que las abejas lavadas y con una fórmula matemática se determina el índice de infestación de cada colmena muestreada y según el resultado se expide por parte del médico veterinario aprobado la Constancia de Niveles de Infestación de Varroasis[14]. De esta forma, los técnicos junto con el apicultor deben realizar un muestreo al azar del 15% de las colonias del apiario por lo menos cada seis meses teniendo la precaución de tomar muestras del centro y extremos de cada colmena, teniendo cuidado con la abeja reina, para conocer el porcentaje de infestación. Es decir, de un apiario de 30 colmenas, se va realizar la prueba a 4 colmenas solamente y nos dará un porcentaje de infestación del apiario[14].

2.4.2. Tratamiento

Como medidas de prevención y control de la Varroasis la enfermedad causada por *V. destructor*, los apicultores utilizan diferentes métodos dependiendo de la cantidad de las colmenas a su disposición, disponibilidad de recursos económicos y de la calidad de los productos que cosechan, regularmente los acaricidas de origen químico son un problema por los residuos y vapores que desprenden llegan a contaminar los productos de las colmenas y den paso a la resistencia de los linajes de los ácaros, por otro lado los tratamientos con ácidos orgánicos son efectivos y no dejan residuos ni contaminación alguna. Se utilizan varios tratamientos químicos para controlar el ácaro de la varroasis, como el amitraz, cimiazol, coumafós, fluvalinato y malatión. Estos tratamientos tienen niveles de tolerancia para residuos limitados en la miel. Según una evaluación, coumafós

y amitraz tienen altas tasas de efectividad (entre el 99% y el 89%), mientras que el fluvalinato es menos efectivo. Sin embargo, el uso continuo de estos productos puede generar resistencia en el ácaro. Los tratamientos alternativos, como el ácido fórmico, láctico, oxálico, timol y rotenona, son más baratos y no contaminan la miel, pero pueden tener efectos secundarios negativos en las abejas, como pillaje, diarrea o la interrupción de la postura de la reina. Un estudio mostró que la aplicación de timol en gel, en una o dos aplicaciones a intervalos de 15 días, fue efectiva en un 52.9% y un 91.9%, respectivamente, para reducir la natalidad de adultos de *V. destructor*[13]. En la actualidad el *V. destructor* está presentando una resistencia frente a los acaricidas principalmente a los fluvalinato y cumafos, los únicos que aun muestran eficiencia es el Amitraz[15]. aunque de cierta forma el tratamiento de la varroasis con productos de origen químico son demasiados tóxicos aun en la actualidad se siguen utilizando debido a su alta eficacia. En lo antes descrito se han realizado estudios experimentales que sustenten la eficacia de métodos más sostenibles, menos tóxicos para las abejas y sobre todo que no generan resistencia.

2.5. Escarabajo de la colmena (*Aethina tumida*)

En junio de 1998, en Florida, Estados Unidos, se encontró que el pequeño escarabajo estaba afectando las colmenas de abejas melíferas de origen europeo, lo que lo convirtió en una plaga para estas abejas. Desde entonces, este escarabajo se ha propagado ampliamente y ha sido detectado en varios países de todo el mundo, incluyendo Australia, Canadá, México, Cuba, Brasil e Italia, entre otros. Esta especie invasora es conocida por causar graves problemas en la apicultura y se estima que causa pérdidas económicas anuales de aproximadamente US\$3 millones en la industria apícola en Florida, Estados Unidos. Varios estudios científicos han documentado los impactos negativos de este escarabajo en la apicultura[16]. Los escarabajos adultos y las larvas causan daños en las colmenas

de abejas, ya que ambos se alimentan de miel, polen, cría de abejas y abejas muertas. No obstante, las larvas son las que causan el mayor daño en la colonia, ya que crean galerías en los panales y provocan la fermentación de la miel debido a levaduras específicas asociadas con el escarabajo, como *Kodamea ohmeri*. Además, se ha reportado la presencia de diferentes agentes patógenos, como bacterias, hongos, tripanosomas y virus en los escarabajos adultos[16].

2.6. Loque Americana

La Loque americana es una enfermedad bacteriana que afecta a las larvas y pupas de abejas obreras, zánganos y reinas, y es causada por el *Paenibacillus larvae larvae*. Descubierta en los Estados Unidos en 1907, esta enfermedad se considera una de las que ha causado más pérdidas económicas en la apicultura mundial, estimándose pérdidas anuales de cinco millones de dólares o más solo en los Estados Unidos. La Loque americana tiene la capacidad de producir esporas, lo que la hace altamente contagiosa tanto para colonias del mismo apiario como para apiarios vecinos. Además, la enfermedad puede mantenerse viable indefinidamente en fómites del apicultor[17]. La bacteria tiene flagelos en su forma vegetativa para moverse en el cuerpo de la larva infectada, y produce exotoxinas que son las causantes de la muerte de las crías infectadas. Las larvas de abejas melíferas son los huéspedes de la bacteria. Las larvas son menos susceptibles a la enfermedad a medida que envejecen, ya que la bacteria no puede infectar larvas con más de 53 horas de edad. Una spora es suficiente para infectar una larva de un día después de la eclosión. Las esporas de *Paenibacillus larvae larvae* pueden sobrevivir en alimento larval, suelo y escamas de larvas muertas deshidratadas durante muchos años. Según Haseman en 1961, las esporas pueden sobrevivir y causar enfermedades después de 35 años si llegan a las larvas de una colonia de alguna manera[17].

2.7. Impacto de la varroosis y otras enfermedades de las abejas en la industria apicultora

La presencia de Varroa en una colmena tiene efectos negativos tanto a nivel individual como a nivel grupal. En el nivel individual, las larvas y pupas son particularmente sensibles a la infestación, lo que puede llevar a una pérdida de peso corporal significativa y alteraciones en su desarrollo. Los adultos también pueden presentar síntomas, como una reducción en su peso corporal. Además, la Varroa actúa como vector para transmitir hasta 8 virus diferentes, lo que puede afectar la capacidad reproductiva de la colonia y aumentar la transmisión de enfermedades. El grado de pérdida de peso está relacionado con el número de ácaros que infestan la celda y su actividad reproductiva. En algunos casos, la infestación puede ser tan severa que las abejas afectadas no pueden eclosionar. Cuando una colmena está infestada por Varroa y otras infecciones, se pueden presentar síntomas evidentes de enfermedad que afectan tanto a nivel individual como grupal. A nivel individual, las abejas pueden mostrar una distribución dispareja de las celdas de cría, nerviosismo, disminución de actividades vitales y una rápida pérdida de la población. Estos efectos son producidos por la infección viral y parasitaria, no únicamente por la infestación del ácaro. A nivel grupal, la capacidad reproductiva y la capacidad para mantenerse como un "superorganismo" se reduce, afectando la producción de miel en diferentes tasas de infestación. Cuando la infestación es moderada, los zánganos parasitados tienen una probabilidad significativamente menor de aparearse y pueden presentar síntomas como alas deformadas. Desde una perspectiva económica, la infestación puede ser difícil de detectar en bajas tasas y afectar la tasa de crecimiento de la población de abejas.

Niveles de infestación	% de varroas	Estado de la producción	Diagnóstico
Baja	≤ 10	Normal	Tolerantes
Media	11 a 20	Disminución notable	Baja Tolerancia
Media Alta	21 a 30	Mínima	Medianamente tolerantes – Posible cambio de reina
Alta	≤ 30	Nula	Cambio de reina

Tabla 2.3: Relación entre el nivel de infestación y disminución de la producción, donde el “% de Varroas” se refiere al porcentaje de la colmena infestado [4].

A nivel nacional en México la Varroasis sigue siendo un importante problema desde su primera detección en 1992 ha disminuido la productividad en miel en un 35 % las colmenas que tienen una infestación mayor del 6 % tienen una producción del 65 % [18]. En cuanto a la presencia de la población de ácaros respecto a la de abejas en las colmenas, un estudio realizado por Martínez, J., Medina, L., y Catzin, G. (2010) encontró una media para las colmenas en México de 1.70 ± 0.26 (ácaros/100 abejas), y en los enjambres silvestres de 1.96 ± 0.44 (ácaros/100 abejas). En una consulta al Atlas de las Abejas de la Secretaría de Agricultura y desarrollo Rural (SADER), se reportan un total de 2,172,107 colmenas en todo el país [16]. A partir de estos datos y tomando en cuenta que la población media por colmena es de hasta 60 mil abejas, podemos hacer un cálculo para deducir la presencia aproximada de ácaros en las colmenas de nuestro país. Con lo que se tiene que:

$$\begin{aligned}
 \text{N}^\circ \text{ aprox. abejas} &= (2,172,107 \text{ colmenas}) \times (60,000 \text{ abejas/colmena}) \\
 &= 130,326,420,000 \text{ abejas} \\
 \text{N}^\circ \text{ aprox. ácaros} &= (1.7 \text{ ácaros}/(100 \text{ abejas})) \times (130,326,420,000 \text{ abejas}) \\
 &= 2,215,549,140 \text{ ácaros}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

La decadencia de los acaricidas y su desventaja ha permitido que desarrollen nuevas técnicas más sostenibles, por ello se han hecho estudios que comprueben las eficacias de extractos de plantas forman parte clave de la apicultura orgánica y metabolitos con capacidad de matar un número significativo de ácaros en las colmenas. La región del altiplano y norte de México es una de las zonas más afectadas por la resistencia de los ácaros a tratamientos químicos con una pérdida anual del 33% [19]. Por otro lado, un estudio realizado en Jalisco, México evidencia que las condiciones climáticas y las diferentes alturas sobre el nivel del mar no influyen significativamente respecto a la prevalencia y nivel de parasitismo por *V. destructor* rebasando el mayor de 35% de infestación cuando la SAGARPA acepta solo el 5% [19].

2.8. Estudio exploratorio de la morfología del Ácaro *Varroa*

El ácaro *Varroa destructor* (anteriormente identificado como *Varroa jacobsoni*) es un parásito de las abejas melíferas. Se alimenta de las etapas preimaginales del hospedador dentro de las celdas de cría selladas y penetra la piel intersegmentaria entre la esclerótica abdominal de las abejas adultas para ingerir la hemolinfa y los tejidos grasos del cuerpo. Mientras se alimenta, *V. destructor* puede transmitir distintos virus: el virus de las alas deformadas, el virus de la parálisis aguda de las abejas, el virus de la parálisis aguda israelí y el virus de Cachemira, entre otros. Sin un tratamiento de la colonia de abejas melíferas, el número de parásitos aumenta constantemente con el crecimiento de la población de abejas y su creciente actividad de cría, lo que lleva al colapso de la colonia en 1–4 años. Los signos clínicos de infestación, que ocurren principalmente al final de la temporada, son un efecto de las infecciones por virus más que del parasitismo directo por el propio ácaro. La esperanza de vida del ácaro depende de la temperatura y la humedad, pero, en

la práctica, puede sobrevivir desde unos días hasta unos meses.

2.8.1. Taxonomía

En la base de sus caracteres morfológicos, el género *Varroa* fue incluido por Oudemans (1904) en la subfamilia Laelaptinae. Baker y Warton (1952) incluyen a este género en la subfamilia Hypoaspidinae (familia Laelaptidae). Sostiene también este punto de vista Ehara (1968); sin embargo, en 1974 Delfinado y Baker describen una nueva especie de ácaro: *Euvarroa sinhai*, parásito de *Apis florea* en la India, con los mismos caracteres morfológicos que *varroa*, y con esta base forman una nueva familia: Varroidae, citado por Grobov (1977). En estos momentos existen varias especies descritas dentro del género. *E. sinhai* ha sido encontrada parasitando también a *A. mellifera*. Este ácaro se distingue de *V. jacobsoni* porque el cuerpo de la hembra es redondeado y en el margen posterior las setas son rígidas y en forma de abanico. El escudo ventrianal es más largo y los escleritos metapodales son rudimentarios. En el trocanter palpal hay dos setas en deutoninfas y adultos, mientras que en *V. jacobsoni* hay una sola [17]. Diagnósis: Dígito móvil del chelicero con tres dientes en el medio apical. En la parte baja del gnatosoma la seta hyp. 2 ausente. Setas dorsales simples, su disposición inicial desaparece en una gran politriquia. Algunas setas dorsomarginales robustas. Escudo dorsal no dividido. Escudo esternal y metaesternal fusionado, cuatro setas esternales y dos pares metaesternales, dos pares de poros esternales y tres pares metaesternales. Escudo genitoventral largo y fuertemente cubierto por setas. Peritremas en posición transversa. Machos con cheliceros sin dígitos, solamente un corto espermatodáctilo. Género tipo: *Varroa* Oudemans [10].

2.8.2. Morfología y biología

La especie de ácaro *V. jacobsoni* presenta un marcado dimorfismo sexual. Las características morfológicas han sido referidas a la hembra adulta por la mayoría de los autores

debido a que es el único estado observado en la práctica (Figura. 2.1).

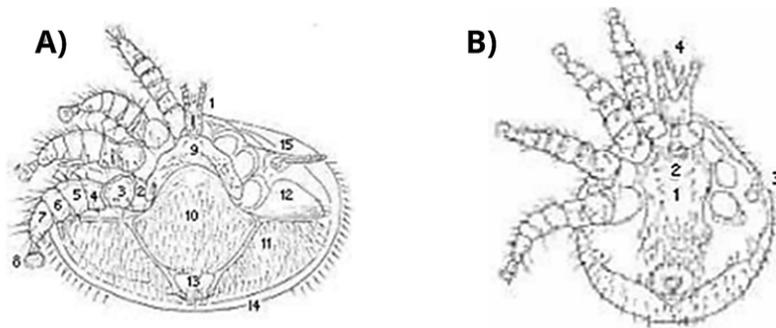


Figura 2.1: A) *Varroa jacobsoni* Oud. hembra. Vista ventral: 1) Aparato bucal (gnatosoma). Artejos de las patas: 2) coxa; 3) trocanter; 4) fémur; 5) rodilla; 6) tibia; 7) tarso; 8) ambulacro con garras y ventosas. Escudos: 9) esternal; 10) ventral; 11) metapodal; 12) peritremal; 13) anal, con el orificio anal; 14) borde del escudo dorsal, encorvado hacia la parte ventral; 15) estigma con el tubo peritremal (aparato traqueal). B): *Varroa jacobsoni* Oud. macho. Vista ventral: 1) escudo esternal; 2) orificio genital; 3) aparato traqueal; 4) queliceros (ganchos) modificados[12]

Todo indica que las hembras son las únicas directamente dañinas. Las ventosas en que terminan sus patas y la forma de su cuerpo encorvado encajan perfectamente entre los pliegues abdominales del cuerpo de la abeja, mecanismo que las lleva dentro de la colmena y de una colonia a otra [18]. En la Tabla 2.4 se describen morfológicamente las cinco fases del ciclo biológico para los individuos de ambos sexos.

Tabla 2.4: Descripción morfológica de las cinco fases del ciclo biológico para los individuos de ambos sexos del ácaro *Varroa*. [12].

Fase	Hembra	Macho
Huevo	Mide 0,60-0,67 x 0,3-0,4 mm. Es ovalado y blanco, con una fina membrana translúcida que permite ver el embrión	
Larva	La embriogénesis dura 48 horas. Durante las primeras 24 horas se forma dentro del huevo una larva hexápoda de 0,6 x 0,5 mm que se transforma en protoninfa antes de la eclosión	
Protoninfa	Octópoda de 0,6 x 0,8 mm, forma redondeada, color blanco vítreo y tiempo de duración de tres a cuatro días	Octópodo de 0,6 x 0,6 mm, color blanco, forma redondeada y tiempo de duración de dos a tres días
Deutoninfa	Es ovalada, corta y ancha (0,94-1,10 x 1,20-1,60 mm), de color pardo y tiempo de duración de uno a dos días	De forma más redondeada (0,8 x 0,7 mm), color blanco grisáceo y tiempo de duración de uno a dos días
Adulto	De forma parecida a una castaña o cangrejo. Posee dimensiones que fluctúan entre 1,00-1,77 x 1,50-1,99 mm. Su color varía de rojizo a café intenso y su consistencia es coriácea. El borde corporal está armado de cerdas. El gnatosoma, adaptado para picar y chupar, posee un par de pedipalpos con cerdas táctiles y quimiorreceptores	Es más pequeño que la hembra, alcanzando solo la mitad de su volumen corporal (0,75-0,98 x 0,70-0,93 mm). Es de forma redonda y color grisáceo o a veces blanco amarillento a plumizo con las patas ligeramente más oscuras. Los quelíceros están modificados para la transferencia de espermios

El ciclo del ácaro (Figura. 3) está sincronizado con el de su hospedero. La hembra del ácaro ya fertilizada es la que llega a parasitar a las larvas de mayor edad. A través de las cerdas quimiorreceptoras de sus palpos detecta una sustancia llamada hormona juvenil III, que se presenta en mayor cuantía en larvas de zánganos. Esto ocurre antes de la operculación (séptimo u octavo días de obreras). Después de unas horas ingiere hemolinfa de larva, fenómeno estrictamente necesario para inducir la puesta, dado que las hormonas presentes en la hemolinfa larval estimulan la actividad de sus ovarios[1].

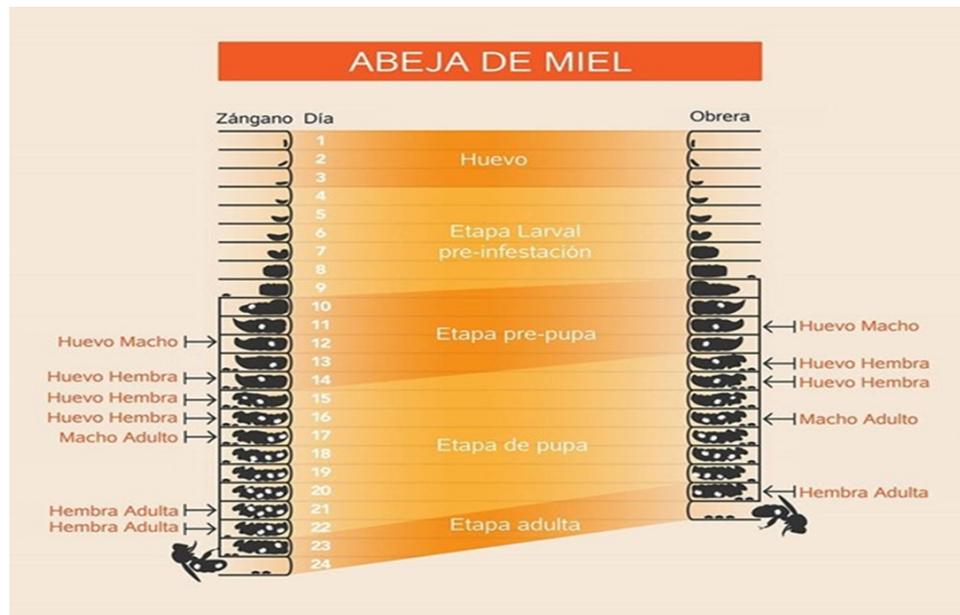


Figura 2.2: Sincronización del ciclo de desarrollo de *Varroa jacobsoni* Oud. con el ciclo de desarrollo de la abeja. En el lado derecho se presenta el desarrollo de la abeja obrera y de lado izquierdo el del zángano. El pequeño punto blanco representa a la varroa desde que es insertada durante la operculación de la celda.[12]

En los estudios más recientes realizados por Vandame (2000) se plantea que esta atraktividad química de la cría parece ser el factor esencial que provoca la infestación, y se inclina hacia la posibilidad de que los ésteres de ácidos grasos (como el palmitato de metilo), emitidos naturalmente por las larvas de abejas con el fin de provocar el sellado de las celdas por las nodrizas, sean los promotores de dicha atracción, dándole solidez a la hipótesis de que las varroas foréticas se guían por las feromonas emitidas por la larva; sin embargo, el autor no descarta del todo el papel que pueden desempeñar otros factores mecánicos como el tamaño de las celdas, así como su prominencia o la distancia entre la larva y el borde de la celda. Estos elementos podrían explicar en parte la infestación más elevada de la cría de zánganos [18].

Capítulo 3

Holografía Digital

3.1. Principios básicos de Interferometría óptica

La interferencia es un fenómeno de superposición de ondas, ya sea constructiva cuando están en fase o destructiva cuando están en desfase. A continuación, se tiene las partes de una onda para una mejor comprensión. En la figura 3.1 se representa una onda sinusoidal y sus elementos que son:

1. **Nodo:** El punto donde la onda cruza la línea de equilibrio o eje horizontal. Es el punto en el que el desplazamiento es nulo.
2. **Cresta:** El punto más alto de la onda, donde alcanza su valor máximo positivo con respecto a la línea de equilibrio.
3. **Valle:** El punto más bajo de la onda, donde alcanza su valor máximo negativo con respecto a la línea de equilibrio.
4. **Amplitud:** La distancia entre la línea de equilibrio y una cresta o un valle. Representa la magnitud del desplazamiento de la onda.

5. **Longitud de onda (λ)**: La distancia entre dos crestas consecutivas o dos valles consecutivos. Es una medida de la periodicidad espacial de la onda.
6. **Período (T)**: El tiempo que tarda una onda en completar un ciclo completo. Aunque en la imagen no está explícitamente relacionado con el eje del tiempo, es una variable importante en la descripción del comportamiento de las ondas.

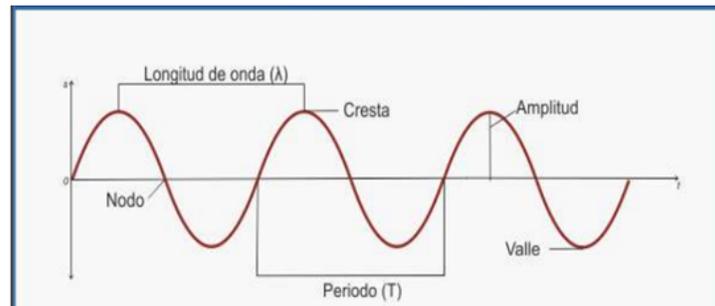


Figura 3.1: Representación gráfica de las partes de una onda unidimensional[7].

A su vez, existen dos tipos de interferencia generados por el tipo y características de las ondas que intervienen en dicho fenómeno.

- a) **Interferencia Constructiva**: La interferencia constructiva se manifiesta cuando dos ondas idénticas, encontrándose en fase, se superponen en algún punto del espacio, coincidiendo sus crestas y valles. En consecuencia, la amplitud resultante de la onda será el doble de la amplitud de las ondas originales.
- b) **Interferencia Destructiva**: La interferencia destructiva tiene lugar cuando dos ondas idénticas, desfasadas en π , se superponen en algún punto del espacio, coincidiendo la cresta de una onda con el valle de la otra, y así sucesivamente. Este proceso conduce a la anulación de la onda resultante.

3.2. Tipos de interferómetros

Un interferómetro en general, es aquel instrumento que utiliza la interferencia de las ondas luminosas para lograr una medición muy precisa de las longitudes de onda de dichas ondas. El análisis que se muestra a continuación correspondiente a la perturbación o interferencia óptica, el cual es muy sencillo de interpretar desde el punto de vista de dos ondas linealmente polarizadas de la siguiente forma [20]. Existen diversos tipos de interferómetros, no obstante la gran mayoría a su vez éstos se clasifican por:

1. Interferómetros de División de Frente de Onda, entre los cuales se encuentra:

- a) el experimento de Young
- b) el espejo doble y el prisma doble de Fresnel
- c) el espejo de Lloyd

2. Interferómetros de División de Amplitud, entre los cuales destacan:

- a) el tipo Mach–Zehnder
- b) el Michelson
- c) el Fabry–Perot

Sin embargo, a todos ellos tienen en común el patrón de interferencia óptica; es decir, a grandes rasgos, el principio de un interferómetro consiste en un par de haces luminosos, los cuales toman dos rutas distintas en su recorrido, estas trayectorias son determinadas por un arreglo de espejos, los cuales desembocan en un patrón de interferencia. El fenómeno de interferencia resulta simple de analizar en el caso de la superposición de dos ondas armónicas que se propagan en un medio lineal (no dispersivo). Supongamos dos ondas armónicas, de idéntica frecuencia y longitud de onda, pero desfasadas entre sí en una

cantidad δ . Como el medio lo hemos supuesto lineal, la onda resultante de la superposición de ambas ondas se obtiene simplemente sumándolas. El resultado de la suma de dos ondas armónicas, de igual frecuencia, es otra onda armónica, de la misma frecuencia, cuya amplitud depende de la diferencia de fase δ , entre las ondas originales. Tomemos como ejemplo el experimento de Young, que dio lugar al interferómetro que lleva el mismo nombre. Para facilidad de análisis, conviene considerar el caso en el experimento de Young (campo lejano). Es el caso en el cual las ondas circulares o esféricas se convierten en ondas planas. Tal conversión puede conseguirse experimentalmente para valores finitos de d usando una lente de longitud focal positiva, como se esquematiza en la figura siguiente.

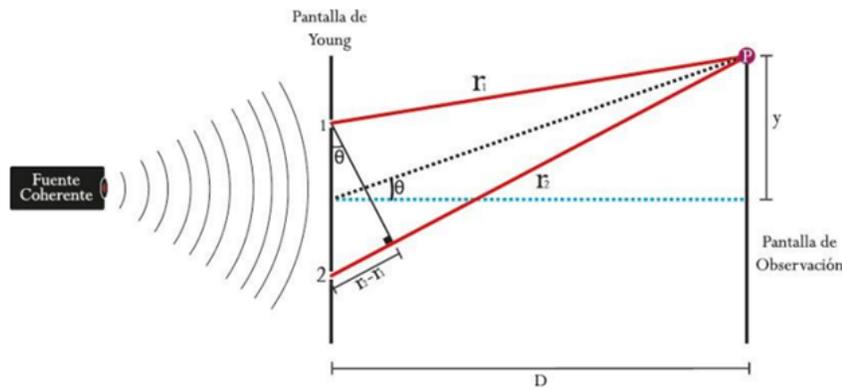


Figura 3.2: Diagrama esquemático que muestra el principio de superposición en el experimento de Young[20]

Las distancias de las rendijas 1 y 2 al punto P son diferentes, por lo que el valor de la diferencia de camino óptico depende de la posición de este punto P sobre la pantalla. El patrón de interferencia que se obtiene es una serie de franjas paralelas, de la figura 1 podemos inferir lo siguiente:

$$\tan \theta = \frac{y}{D}, \quad \sin \theta = \frac{|\bar{r}_2 - \bar{r}_1|}{a} \quad (3.1)$$

Donde “a” es la distancia entre ambas rendijas, por aproximación paraxial se obtiene:

$$\tan \theta \approx \sin \theta \approx \theta \quad (3.2)$$

Por lo tanto

$$\frac{y}{D} = \frac{|\bar{r}_2 - \bar{r}_1|}{a} \quad (3.3)$$

$$|\bar{r}_2 - \bar{r}_1| = \frac{y * a}{D} \quad (3.4)$$

De la teoría de interferencia se sabe que la intensidad total en el punto P sobre el patrón de interferencia es calculado como:

$$I_{\text{total}} = I_1 + I_2 + 2\bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2 E_1 E_2 \cos(\bar{k}_1 \cdot \bar{r}_1 - \bar{k}_2 \cdot \bar{r}_2 + (\omega_1 - \omega_2)t + (\alpha_1 - \alpha_2)) \quad (3.5)$$

El interferómetro de Young tiene dentro de sus bases teóricas las siguientes condiciones:

$$\bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2 = a_1 a_2 \quad (3.6)$$

$$\bar{k}_1 = \bar{k}_2 = \bar{k} \quad (3.7)$$

$$\omega_1 = \omega_2; \quad \alpha_1 = \alpha_2 \quad (3.8)$$

$$I_1 \propto |\bar{E}^2|; \quad \bar{E} = \sqrt{a}E \quad (3.9)$$

Donde E es el campo eléctrico, k es el número de onda y r es el camino óptico, por lo

que nuestra ecuación se reduce:

$$I_1 = I_0 + I_r + 2\sqrt{I_0 I_r} \cos(\bar{k} \cdot (\bar{r}_1 - \bar{r}_2)) \quad (3.10)$$

$$\text{con } I_1 = I_2 = I \quad \text{y} \quad \cos(\theta) = \cos(-\theta) : \quad (3.11)$$

$$I_{\text{total}} = 2I + 2I \cos(\bar{k} \cdot (\bar{r}_1 - \bar{r}_2)) \quad (3.12)$$

Sustituyendo la expresión (4) en (11) y con

$$\bar{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.13)$$

Tenemos entonces:

$$I_{\text{total}} = 2I + 2I \cos\left(\frac{2\pi ya}{\lambda D}\right) \quad (3.14)$$

$$\text{cuando } \cos\left(\frac{2\pi ya}{\lambda D}\right) = -1 \quad \Rightarrow \quad I_{\text{total}} = 0 \quad (3.15)$$

$$\text{cuando } \cos\left(\frac{2\pi ya}{\lambda D}\right) = 1 \quad \Rightarrow \quad I_{\text{total}} = 4I \quad (3.16)$$

Por lo tanto la interferencia constructiva se presenta cuando:

$$\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{ya}{D}\right) = 2m\pi \quad (3.17)$$

Entonces tenemos que:

$$y = m\lambda \frac{D}{a} \quad (3.18)$$

$$\Delta y = \left((m+1)\lambda \frac{D}{a}\right) - m\lambda \frac{D}{a} = \lambda \frac{D}{a} \quad (3.19)$$

Y por tanto la distancia "2a" entre las rendijas del experimento de Young quedaría como:

$$a = \frac{\lambda D}{\Delta y} \quad (3.20)$$

De esta forma, la interferencia constructiva y las diferencias existentes entre los patrones de interferencia que se generan a partir de hacer incidir luz monocromática a través de una rendija o un medio, son la base del funcionamiento de la gran mayoría de los interferómetros.

3.3. Diferencia de fase óptica

Un interferómetro es sensible a una componente espacial del vector desplazamiento en cualquier punto en el espacio del objeto. La dirección de sensibilidad puede ser definida por un vector unitario \mathbf{n} llamado vector de sensibilidad. Este vector está dado por $\mathbf{n} = n_i \hat{e}_i$, donde \hat{e}_i y \hat{e}_o son los vectores unitarios en la dirección de iluminación y observación, respectivamente. Si el vector desplazamiento de cada punto del objeto es $d(x, y, z)$, entonces el interferómetro será sensible a la componente d_n a lo largo del vector sensibilidad:

$$\mathbf{d}_n = \mathbf{n} * \mathbf{d} \quad (3.21)$$

El cambio de fase óptica por unidad de desplazamiento es determinado por el número de onda

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.22)$$

(donde λ es la longitud de onda de la luz de iluminación). El cambio de fase en el plano imagen debido al cambio de fase unitario en el espacio objeto puede definirse como un factor de sensibilidad de franja, Γ , que determina cuántas franjas corresponden a un

desplazamiento de la superficie dado. Γ también es una función del tipo de iluminación y el desplazamiento de la superficie, entonces:

$$\Phi = k \cdot \Gamma \cdot \mathbf{d}_n \quad (3.23)$$

3.4. Interferometría Holográfica Digital

La Interferometría Holográfica Digital es una técnica óptica no destructiva bien documentada, utilizada con éxito en el estudio de deformaciones mecánicas y en una amplia variedad de aplicaciones. En esta sección se desarrolla el principio matemático de la Interferometría Holográfica Digital usando doble exposición. La mayoría de los arreglos actuales cuya base es la IHD, hacen uso de cámaras que cuentan con dispositivos de carga acoplada o CCD, por sus siglas en inglés (charge coupled device), los cuales son dispositivos integrados que contienen elementos sensibles a la luz, organizados en una matriz de filas y columnas. Cada uno de estos elementos es un píxel, el cual genera una carga eléctrica en función de la cantidad de luz que recibe. Cuanto mayor es la intensidad luminosa, mayor es la carga generada. Cada fila de píxeles corresponde a una línea de video. Estas cargas eléctricas se transfieren a un sistema de memoria, donde son leídas de forma sincronizada, fila por fila. Una vez que el CCD ha enviado sus cargas a la memoria, se puede generar una nueva imagen, repitiendo este proceso cuadro a cuadro.

3.4.1. Principio matemático

Supongamos un objeto iluminado como se muestra en la Figura 3.2. La luz esparcida por el objeto pasa por una lente para formar una imagen del mismo en el sensor CCD, usualmente llamada haz objeto. El otro haz, llamado haz de referencia, se coloca a un pequeño ángulo con respecto al haz objeto para introducir una frecuencia portadora.

Para el caso de una onda monocromática que se propaga en un medio isotrópico, homogéneo, lineal, no dispersivo y no magnético, matemáticamente, el haz de referencia puede expresarse como[21]:

$$E_r(x, y) = A_r(x, y)e^{-2\pi i(f_x x + f_y y)} \quad (3.24)$$

donde A_r es su amplitud compleja y (f_x, f_y) es la frecuencia portadora. Por otro lado, el haz objeto puede ser expresado como:

$$E_0(x, y, t) = A_0(x, y)e^{i\phi(x, y)} \quad (3.25)$$

donde A_0 es su amplitud compleja y ϕ es la fase óptica. La superposición de los dos haces, E_T , y la intensidad en el plano del sensor CCD, I , pueden expresarse como:

$$E_T(x, y, t) = A_0e^{i\phi(x, y)} + A_re^{-2\pi i(f_x x + f_y y)} \quad (3.26)$$

$$I(x, y) = |A_0|^2 + |A_r|^2 + A_0A_r^*e^{-2\pi i(f_x x + f_y y) - i\phi(x, y)} + A_0^*A_re^{2\pi i(f_x x + f_y y) + i\phi(x, y)} \quad (3.27)$$

donde * denota el complejo conjugado de A_0 y A_r . Por simplicidad, es posible reescribir la última ecuación de la forma:

$$I(x, y, t) = a(x, y) + c^*(x, y)e^{-2\pi i(f_x x + f_y y)} + c(x, y)e^{2\pi i(f_x x + f_y y)} \quad (3.28)$$

donde los términos a y c están dados por:

$$a(x, y) = |A_0|^2 + |A_r|^2 \quad (3.29)$$

$$c(x, y) = A_0A_r^*e^{i\phi(x, y)} \quad (3.30)$$

Teniendo en cuenta que la transformada integral de Fourier en dos dimensiones está definida por:

$$H(k, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) e^{-2\pi i(kx + \omega y)} dx dy \quad (3.31)$$

cuando se aplica esta transformada a la ecuación (3.28), se obtiene:

$$F\{I(x, y)\} = A(f_{0x}, f_{0y}) + C^*(f_{0x} - f_x, f_{0y} - f_y) + C(f_{0x} + f_x, f_{0y} + f_y) \quad (3.32)$$

donde A y C son las transformadas de Fourier de $a(x, y)$ y $c(x, y)$, respectivamente. Los términos a la derecha de la ecuación (3.28) están representados gráficamente en dos dimensiones en la Figura 3.3a). La Figura 3.3b) representa un perfil diagonal de la Figura 3.3a), justo por el centro de los lóbulos. La Figura 3.3c) es una imagen real del valor absoluto de la ecuación (3.28). El primer término a la derecha de la ecuación (3.28), A, es el denominado orden cero de difracción. El tercer término, C, contiene toda la información del haz objeto y es de especial interés en el uso de esta técnica. El segundo término, C^* , contiene la información del complejo conjugado del haz objeto. Los términos C y C^* contienen la misma información de fase, pero con signo contrario.

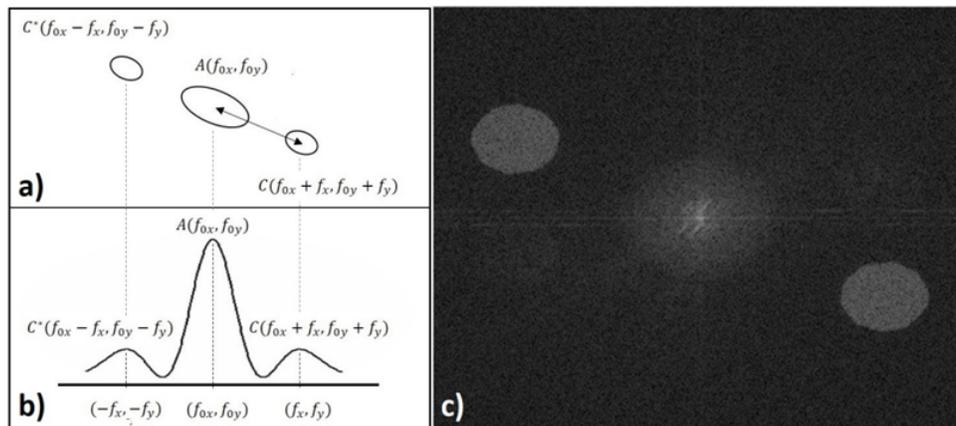


Figura 3.3: Representación esquemática en dos dimensiones del valor absoluto de la ecuación (3.32). b) Representación esquemática de un perfil diagonal por el centro de los lóbulos de la Figura a). c) Imagen real del valor absoluto de la ecuación (3.32). [22]

Con el objetivo de adquirir la información de fase del haz objeto, resulta necesario el operar sobre la ecuación representada por la Figura 3.3 para extraer la función C y centrarla en el espectro de frecuencias. Esto se puede expresar matemáticamente de la siguiente forma:

$$B(f_x, f_y) \otimes F\{I(x, y)\} = C(f_{0x}, f_{0y}) \quad (3.33)$$

3.5. Interferometría Holográfica Digital de promedio temporal

La Interferometría Holográfica Digital de tiempo promedio se distingue de la Interferometría Holográfica Digital en que registra hologramas con una exposición prolongada mientras el objeto está en un proceso dinámico. A diferencia de la Interferometría Holográfica Digital, esta técnica no proporciona directamente la fase, sino un patrón de franjas que está altamente influenciado por la dinámica de los desplazamientos. Esta característica ha sido aprovechada en numerosas investigaciones destinadas a identificar patrones vibratorios en diversos materiales que van desde membranas hasta láminas delgadas. La siguiente sección aborda el principio matemático en el que se fundamenta esta técnica.

3.5.1. Principio matemático

De la misma manera que en la Interferometría Holográfica Digital, esta técnica comienza con la definición del haz de referencia. Para el caso de una onda monocromática que se propaga en un medio isotrópico, homogéneo, lineal, no dispersivo y no magnético, el haz de referencia está dado por la ecuación:

$$E_r(x, y) = A_r(x, y)e^{-2\pi i(f_x x + f_y y)} \quad (3.34)$$

Por otra parte el haz objeto estaría dada por:

$$E_0(x, y, t) = A_0(x, y)e^{i\phi(x, y)} \quad (3.35)$$

A diferencia de la definición anterior, en esta última ecuación los desplazamientos dependen del tiempo, t . Para cualquier instante de tiempo, la superposición de los dos haces estaría definida como:

$$E_T(x, y, t) = A_0e^{i\phi(x, y)} + A_re^{-2\pi i(f_x x + f_y y)} \quad (3.36)$$

En tanto que la intensidad, de igual manera en cada instante de tiempo, puede escribirse matemáticamente como:

$$I(x, y) = |A_0|^2 + |A_r|^2 + A_0A_r^*e^{-2\pi i(f_x x + f_y y) - i\phi(x, y)} + A_0^*A_re^{2\pi i(f_x x + f_y y) + i\phi(x, y)} \quad (3.37)$$

Sin embargo, el proceso de grabado en esta técnica se realiza con un tiempo de exposición prolongado, τ , en comparación con la duración de un ciclo de vibración.

De esta forma, la intensidad capturada en el sensor es el promedio temporal, y matemáticamente puede expresarse como:

$$I_T(x, y) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau I(x, y, t) dt = a(x, y) + c(x, y)e^{2\pi i(f_x x + f_y y)} + c^*(x, y)e^{-2\pi i(f_x x + f_y y)} \quad (3.38)$$

en donde las funciones $a(x, y)$ y $c(x, y)$ están dadas por

$$a(x, y) = A_o^2 + A_r^2 \quad (3.39)$$

$$c(x, y) = A_o A_r \frac{1}{\tau} \int_0^\tau e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{U}(x, y, t)} dt \quad (3.40)$$

Esta ecuación representa un holograma digital promedio en el tiempo. Al aplicar una transformada de Fourier, se obtendrán tres lóbulos separados, como se ilustró anteriormente en la Figura 3.3, de acuerdo con la expresión:

$$F\{I_T(x, y)\} = A(f_{0x}, f_{0y}) + C(f_{0x} + f_x, f_{0y} + f_y) + C^*(f_{0x} - f_x, f_{0y} - f_y) \quad (3.41)$$

La información relevante está contenida en la función C , por lo que es necesario aplicar una operación para extraer y centrar esta información en el espectro de frecuencias. Para lograrlo, se utiliza un filtro $B(f_x, f_y)$, de tal forma que:

$$B(f_x, f_y) \otimes F\{I_T(x, y)\} = C(f_{0x}, f_{0y}) \quad (3.42)$$

y aplicando una transformada inversa de Fourier el resultado será

$$F^{-1}\{B(f_x, f_y) \otimes F\{I_T(x, y)\}\} = c(x, y) \quad (3.43)$$

Como se puede observar en la ecuación anterior, la función $c(x, y)$ está compuesta por dos partes: las amplitudes, A_o y A_r , de los haces utilizados para la iluminación del objeto y el haz de referencia, y por una función que suele definirse como

$$\mathcal{M}(x, y) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{U}(x, y, t)} dt \quad (3.44)$$

Las amplitudes de los haces objeto y referencia le dan un cambio de contraste a la función $\mathcal{M}(x, y)$, y normalmente se suele tomar un holograma de referencia para eliminar estos términos. Esta última ecuación es conocida como función característica y representa

el patrón de franjas obtenido como una matriz de píxeles.

Capítulo 4

Principios físicos de la aplicación de ultrasonido y radiación de luz ultravioleta como control de plagas

En la actualidad y bajo la motivación de encontrar alternativas amigables con el ambiente y los ecosistemas, se han desarrollado diversas opciones para el combate de plagas en organismos de importancia biológica, alimenticias y económica. Entre estas nuevas opciones se encuentra la aplicación de luz ultravioleta la cual se ha difundido como una alternativa de desinfección, limpieza y control de plagas. por otra parte, las vibraciones se han presentado como opción ante plagas cuyo principal mecanismo de hospedaje es la forésis o habilidad forética, donde el hospedero es utilizado como medio de transporte de la plaga. A continuación se muestran los principios físicos sobre los cuales yacen estas alternativas, las cuales se pretenden aplicar en el caso particular del ácaro varroa para estudiar sus efectos.

4.1. Vibraciones

Las vibraciones son oscilaciones mecánicas en torno a una posición de referencia. Consiste en la variación, generalmente en el tiempo, de la magnitud de una cantidad con respecto a una referencia específica, cuando dicha magnitud se vuelve alternativamente más grande y más pequeña que la referencia. Es el resultado de fuerzas dinámicas en máquinas o estructuras que tienen partes en movimiento o sometidas a acciones variables. Las diferentes partes de una máquina vibrarán con distintas frecuencias y amplitudes, pudiendo causar molestias y fatiga, e incluso ser la causa última de la "muerte" de la máquina [23]. La mayoría de los problemas de ruido y vibración están relacionados con el fenómeno de la resonancia, y siempre habrá algún nivel presente en procesos dinámicos. Las medidas de ruido pueden compararse con estándares internacionales para determinar si están dentro de límites aceptables, mientras que las de vibraciones pueden compararse con especificaciones del fabricante de la máquina. No obstante, las vibraciones no siempre son nocivas o indeseadas, ya que en ocasiones pueden ser muy útiles. Por ejemplo, se pueden utilizar para realizar un trabajo específico, para detectar fisuras en tubos, maquinarias, o para detectar imperfecciones u objetos a través de una pared o frontera física. Las vibraciones pueden presentar una sola componente con una única frecuencia o varias componentes a diferentes frecuencias actuando al mismo tiempo. En la práctica, las señales de vibración están compuestas por múltiples frecuencias. El proceso de descomponer estas señales en sus componentes individuales de frecuencia se conoce como análisis en frecuencia [24]. El espectrograma es el gráfico que muestra el nivel de vibración en función de la frecuencia. En la Figura 4.1 se ilustra un espectrograma con cuatro picos (A), (B), (C) y (D). Observando la amplitud de la aceleración en el dominio del tiempo de un punto, no es posible determinar cuántas componentes hay ni a qué frecuencias se encuentran. Sin embargo, al transformar al dominio de la frecuencia, se obtiene el espectro de aceleraciones, que suele

presentar ciertas características indicativas de que la energía se concentra alrededor de unas pocas frecuencias. El análisis en el dominio de la frecuencia puede proporcionar, en muchos casos, información detallada sobre las fuentes que generan la señal [24].

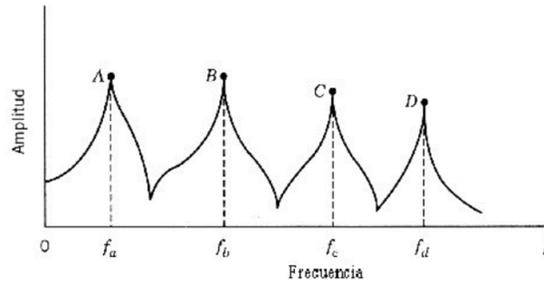


Figura 4.1: Representación esquemática de un espectrograma de una vibración.[25]

4.2. Modos vibracionales

Un modo de vibración, o modo normal, describe la manera en que un cuerpo vibra y está vinculado a una frecuencia específica. Estas frecuencias, también conocidas como naturales, son aquellas que, al ser excitadas, producen resonancia en el sistema, generando un movimiento con una forma particular correspondiente al modo de vibración. La forma de estos modos sirve para distinguirlos y clasificarlos, ya que diferentes frecuencias harán que el sistema vibre de manera distinta, asociada a su vez con diferentes esfuerzos, como modos de tracción-compresión, torsión, flexión, etc. Los modos de vibración para sistemas simples pueden calcularse de forma analítica, pero en general, se miden mediante sensores piezoeléctricos y una excitación en forma de impulso, generando una respuesta temporal que, al ser analizada y trasladada al dominio de frecuencias mediante una transformada de Fourier, muestra picos en las frecuencias naturales. Un ejemplo de esto son las diferentes formas de vibración que puede tener un edificio, cuyo modelo se ilustra en la figura 9 Cada uno de estos modos de vibración tiene asociada una frecuencia única, llamada frecuencia natural.



Figura 4.2: Representación de los modos vibracionales en un cuerpo rígido.[25]

4.3. Teoría de placas y láminas

La teoría clásica de placas establece un campo de desplazamiento basado en las hipótesis de Kirchhoff descritas a continuación; una coma antes del subíndice de un eje coordenado indica derivación respecto a él. Al igual que en la teoría de vigas, los desplazamientos de la placa en las direcciones de los tres ejes coordenados se denotan por u , v , w .

- a) Los desplazamientos de la placa en la dirección transversal z son mucho menores que el espesor, $w \ll h$, de modo que $w, x < 1$, $(w, x)^2 \ll 1$.
- b) Bajo flexión, el plano medio de la placa no cambia su longitud: $u_0, v_0 \approx 0$.
- c) No hay distorsión de elementos diferenciales rectangulares asociados con deformaciones fuera del plano: $\gamma_{xz}, \gamma_{yz}, \epsilon_z \approx 0$.
- d) Se asume que las tensiones en el plano $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ son mucho mayores que las tensiones fuera del plano $\sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}$.

donde i, j pueden ser cualquier dirección coordenada, ϵ_i, σ_i son las componentes diagonales y γ_{ij}, τ_{ij} son las componentes fuera de la diagonal de los tensores de deformación y tensión, respectivamente.

Si la “flecha” w es grande, las condiciones a) y b) no se cumplen; si la placa es gruesa, las condiciones c) y d) no se cumplen. La hipótesis d) no implica que las tensiones fuera del plano sean completamente nulas, sino simplemente pequeñas en comparación con las otras.

4.4. Análisis de las hipótesis

Notación: La notación con coma indica derivada parcial respecto al eje dado. Por ejemplo, w, x significa $\frac{\partial w}{\partial x}$, es decir, la tasa de cambio del desplazamiento transversal w en la dirección x .

4.4.1. a) Desplazamiento transversal pequeño: $w \ll h$

Se supone que la flecha o desplazamiento transversal w es pequeño en comparación con el espesor h de la placa. Esto se expresa como:

$$w \ll h \quad \text{y} \quad (w, x)^2 \ll 1.$$

Esto implica que la deformación es pequeña y la curvatura de la placa también es limitada. Si w es demasiado grande, la teoría clásica ya no es aplicable.

4.4.2. b) El plano medio no cambia de longitud: $u_0, v_0 \approx 0$

El *plano medio* es el plano que divide la placa en dos mitades iguales. La hipótesis establece que bajo flexión, este plano no se alarga ni se comprime:

$$u_0 \approx 0, \quad v_0 \approx 0.$$

Es decir, los desplazamientos u_0 y v_0 en los ejes x e y son casi nulos en dicho plano.

Esto significa que la placa se deforma por flexión sin cambios de longitud en el plano medio.

4.4.3. c) No hay distorsión fuera del plano: $\gamma_{xz}, \gamma_{yz}, \epsilon_z \approx 0$

Las deformaciones fuera del plano son insignificantes:

$$\gamma_{xz} \approx 0, \quad \gamma_{yz} \approx 0, \quad \epsilon_z \approx 0.$$

Aquí, γ_{ij} son esfuerzos cortantes (relacionados con deformaciones fuera del plano), y ϵ_z es la deformación normal en la dirección z . Esta hipótesis es válida solo para placas delgadas; si la placa es gruesa, esta suposición no se cumple.

4.4.4. d) Tensiones fuera del plano son pequeñas

Las tensiones en el plano de la placa ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$) son mucho mayores que las tensiones fuera del plano ($\sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}$):

$$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy} \gg \sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}.$$

Esta hipótesis no implica que las tensiones fuera del plano sean nulas, sino que son pequeñas en comparación con las tensiones en el plano. Si la placa fuera gruesa, esta suposición también dejaría de ser válida.

4.5. Conclusiones importantes

- Si la flecha w es demasiado grande, las hipótesis a) y b) dejan de ser aplicables.
- Si la placa es gruesa, las hipótesis c) y d) ya no se cumplen porque los efectos fuera del plano se vuelven significativos.

- La hipótesis d) no implica que las tensiones fuera del plano sean nulas, solo que son pequeñas en comparación con las tensiones en el plano.

4.5.1. Ecuaciones cinemáticas y constitutivas

En cualquier sólido sometido a flexión y bajo la hipótesis de pequeñas deformaciones, las ecuaciones cinemáticas (de movimiento) en 3D se pueden expresar como:

$$\epsilon_x := u_{,x} = -zw_{,xx} \quad (4.1)$$

$$\epsilon_y := v_{,y} = -zw_{,yy} \quad (4.2)$$

$$\gamma_{xy} := u_{,y} + v_{,x} = -2zw_{,xy} \quad (4.3)$$

$$\epsilon_z := w_{,z} \approx 0 \quad (4.4)$$

$$\gamma_{xz} := u_{,z} + w_{,x} \approx 0 \quad (4.5)$$

$$\gamma_{yz} := v_{,z} + w_{,y} \approx 0 \quad (4.6)$$

Debido a $\epsilon_z \approx 0$, se deduce que la flecha es constante en el espesor de la placa, es decir, $w(x, y)$. Las igualdades a cero en la columna de la derecha se deben a la hipótesis c) de Kirchhoff. Las segundas ecuaciones en la columna izquierda se obtienen integrando las ecuaciones de deformaciones cortantes teniendo en cuenta b) (donde $u_0 = v_0 = 0$ son movimientos en el origen y las constantes de integración) y considerando que w no

depende de z .

Las segundas derivadas de w se redefinen como curvaturas κ , de las cuales hay dos *directas* y una *cruzada*.

Si el material de la placa es isótropo y sigue la elasticidad lineal, las ecuaciones constitutivas en 2D para las componentes del tensor de tensión en el plano son:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_x + \nu\epsilon_y) = -\frac{Ez}{1-\nu^2}(w_{,xx} + \nu w_{,yy}) \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_y + \nu\epsilon_x) = -\frac{Ez}{1-\nu^2}(w_{,yy} + \nu w_{,xx}) \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= G\gamma_{xy} = -\frac{Ez}{1+\nu}w_{,xy}\end{aligned}\tag{4.7}$$

donde se han aplicado las ecuaciones de la columna derecha de las ecuaciones (4.1)-(4.6). Todas las relaciones son lineales en z , lo cual es un aspecto importante en los desarrollos posteriores.

Si para un cierto material $\nu = 0$ o si $\epsilon_y \ll 0$, se recuperan las ecuaciones de viga en una dimensión (1D), recordando la ley de Navier y de la ecuación (4.8):

$$\sigma_x = -Ezw_{,xx} \equiv M\frac{Iz}{z}\tag{4.8}$$

4.5.2. Solicitaciones

Los tensores de tensión y deformación no son los únicos parámetros útiles para estudiar problemas dominados por la flexión. Para complementarlos, se definen los “esfuerzos” (también conocidos como “solicitaciones”), que son equivalentes a las tensiones σ_n y constantes en z (aunque no en x e y), similar a la teoría de vigas pero en 2D.

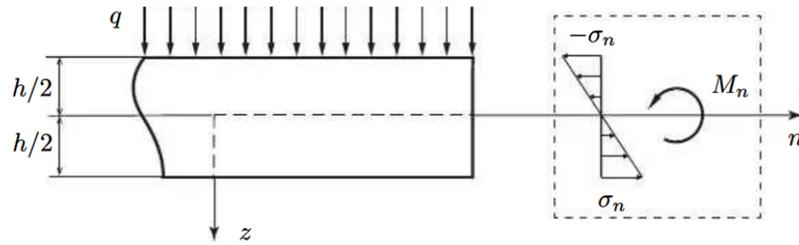


Figura 4.3: Vista lateral de placa bajo carga uniforme q : equivalencia de tensiones y momentos flectores en borde de coordenada $n(x$ o $y)$ mayor.

En la Figura 4.3 se observa que la distribución de σ_n es lineal en z y está en equilibrio horizontal en n , pero genera un momento antihorario M_n . El subíndice de estos momentos no se relaciona con el eje perpendicular a su giro (como en la teoría de vigas), sino con la coordenada constante del borde donde se aplica. La equivalencia entre tensión y momento, por ejemplo en el borde x , es:

$$\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz = M_x \tag{4.9}$$

El integrando $\sigma_x dy dz$ representa la fuerza equivalente de un elemento diferencial de la distribución de σ_x , aproximado a un rectángulo (en realidad tiene un lado pequeño inclinado), y z es su brazo con respecto al plano medio. Un aspecto muy importante en la teoría de placas es que el M_x final está multiplicado por un diferencial de longitud transversal, por lo que todas las sollicitaciones (axiales, cortantes, flectoras, torsoras) se definen por unidad de “profundidad”, es decir, con unidades $[N/m]$ o $[N \cdot m/m]$.

De manera similar se define M_y en los planos $y - z$ de la placa y una nueva sollicitación M_{xy} , relacionada con la tensión cortante. Eliminando dy de ambos lados de las ecuaciones (4.7), sustituyendo las ecuaciones (4.6) y considerando que las curvaturas no varían en z , se obtiene:

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} z dz = -\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \begin{pmatrix} w_{,xx} + \nu w_{,yy} \\ w_{,yy} + \nu w_{,xx} \\ (1-\nu)w_{,xy} \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

donde D es la “rigidez a flexión” de la placa. Para placas de material compuesto o cuando se consideran los refuerzos (costillas, largueros, etc.), la estructura no es isótropa y la integral debe dividirse en capas; la constante D se convierte en una matriz. Estas ecuaciones se llaman relaciones momento-curvatura. El momento M_{xy} y su equilibrante M_{yx} se denominan “torsores” por analogía con el momento torsor aplicado en las secciones extremas de un eje de motor o máquina.

Como se ha mencionado, si el coeficiente de Poisson es muy bajo y/o la placa es muy estrecha, $a \ll b$, $\nu \approx 0$, se recupera la rigidez de una viga por unidad de anchura $Eh^3/12 := EI$ (ver la ecuación (2.3) para sección rectangular).

También se definen las solicitaciones cortantes de la placa como equivalentes a las tensiones cortantes τ_{xz}, τ_{yz} fuera del plano y aplicadas en los bordes:

$$\begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \end{pmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{pmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} dz = -D \begin{pmatrix} w_{,xxx} + w_{,xyy} \\ w_{,xxy} + w_{,yyy} \end{pmatrix} = -D \begin{pmatrix} (\nabla^2 w)_{,x} \\ (\nabla^2 w)_{,y} \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

donde el operador de Laplace se define como $\nabla^2 := \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$. La primera igualdad es conceptual y del mismo tipo que las equivalencias momento-tensión de las primeras ecuaciones (4.10). La tercera igualdad se puede calcular directamente (sin hacer la integral) a partir de las dos ecuaciones inferiores (4.18). Nótese que de las ecuaciones (4.10) y (4.11) se deduce que tanto en la dirección x como en la y los momentos son proporcionales a la segunda derivada de la flecha y las solicitaciones cortantes a la tercera.

Aunque τ_{xz}, τ_{yz} son pequeños debido a la hipótesis de Kirchhoff d), Q_x, Q_y pueden ser de la misma magnitud que los momentos.

Los tres momentos y las tres curvaturas forman un tensor, con todas sus propiedades matemáticas como las rotaciones en cierta dirección definidas por el ángulo θ del tensor (4.12) y valores y direcciones principales en (4.13):

$$\begin{aligned} M'_x &= \frac{M_x + M_y}{2} + \frac{M_x - M_y}{2} \cos 2\theta + M_{xy} \sin 2\theta \\ M'_y &= \frac{M_x + M_y}{2} - \frac{M_x - M_y}{2} \cos 2\theta + M_{xy} \sin 2\theta \\ M'_{xy} &= -\frac{M_x - M_y}{2} \sin 2\theta + M_{xy} \cos 2\theta \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{pmatrix} M_I \\ M_{II} \end{pmatrix} = \frac{M_x + M_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{M_x - M_y}{2}\right)^2 + M_{xy}^2}; \tan 2\theta_p = \frac{2M_{xy}}{M_x - M_y} \quad (4.13)$$

Estos valores principales representan los máximos y mínimos de los momentos y, consecuentemente, de las tensiones, los cuales son útiles para dimensionar la placa. Así, los tensores simétricos con $M_{xy} = M_{yx}$ y $w_{xy} = w_{yx}$ son:

$$M = \begin{pmatrix} M_x & M_{xy} \\ M_{yx} & M_y \end{pmatrix} ; \quad \kappa = \begin{pmatrix} \kappa_x & \kappa_{xy} \\ \kappa_{yx} & \kappa_y \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

4.5.3. Signos y equilibrio

Es necesario tener especial cuidado con los signos de las sollicitaciones. Debido a la equivalencia entre estos esfuerzos y las componentes de tensión, los signos de los primeros siguen los criterios tensoriales de las segundas. Se postula que una componente será positiva si, estando aplicada en un borde de coordenada mayor, sigue el sentido de la coordenada perpendicular a ese borde. De manera contraria, y para conservar el equilibrio diferencial de fuerzas, en el borde de coordenada menor siguen el sentido negativo de la coordenada mencionada. Así, los cortantes Q_x, Q_y siguen directamente el criterio de

signos de τ_{xz} , τ_{yz} , y los momentos el de los productos $\sigma \cdot z$ o $\tau \cdot z$.

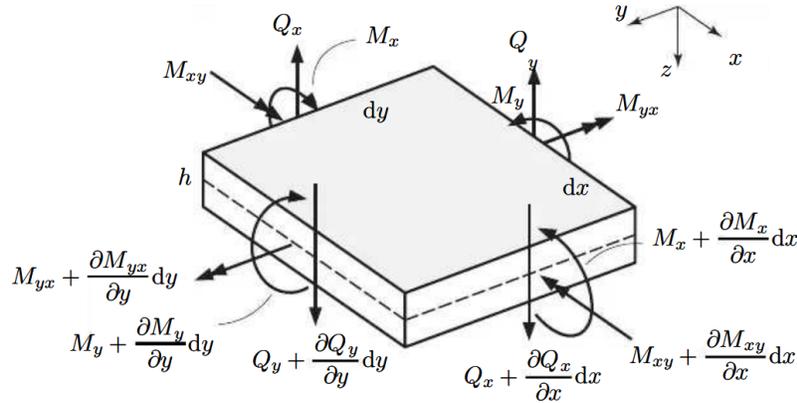


Figura 4.4: Signos de esfuerzos: fuerzas y momentos por unidad de profundidad para un elemento diferencial de placa en coordenadas cartesianas. Figura no a escala.

Es imposible definir signos de las solicitaciones con una sola, se necesitan un par en equilibrio. El equilibrio en la dirección vertical z se calcula en un paralelepípedo diferencial de lados dx , dy y altura h con cargas verticales q , ver Fig. 4.4; esta figura no está a escala ya que h debería ser mucho mayor que dx , dy . Los términos en derivada parcial son los primeros (lineales) de las series de Taylor.

Además, se debe asegurar el equilibrio de momentos en este paralelepípedo con respecto a los dos ejes x , y , resultando en tres ecuaciones adicionales:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + q = 0 \\ \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x = 0 \\ \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} - Q_y = 0 \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

Las dos solicitaciones cortantes se pueden eliminar de las ecuaciones (4.20), y con las ecuaciones (4.12):

$$w_{,xxxx} + 2w_{,xxyy} + w_{,yyyy} = \frac{q}{D} \Rightarrow \nabla^2(\nabla^2 w) = \frac{q}{D} \Rightarrow \nabla^4 w = \frac{q}{D} \quad (4.16)$$

Esta última ecuación diferencial (4.16) es la que servirá de base para el desarrollo de la sección relacionada con el estudio de vibraciones sobre el ácaro varroa.

4.6. Luz ultravioleta: principales características

La radiación ultravioleta (UV) es una forma de radiación electromagnética con longitudes de onda entre los 10 nm y los 400 nm. Se clasifica en dos tipos principales, UVA y UVB, que difieren en el rango de longitudes de onda y en sus efectos biológicos. La UVC, por otro lado, se divide en UVC-L (207-222 nm) y UVC-G (254-265 nm). La principal fuente de radiación UVA y UVB que llega a la superficie terrestre es la luz solar. Aunque el 95 % de los rayos solares que alcanzan la Tierra son UVA, la UVB es responsable del 80 % de los efectos dañinos en la piel y los ojos humanos. Sin embargo, la capacidad germicida de UVA y UVB es limitada debido a la adaptación de virus y bacterias a lo largo del tiempo. La UVC, por otro lado, es producida artificialmente ya que gran parte de la radiación solar UVC es absorbida por el oxígeno atmosférico. La UVC ha demostrado ser muy efectiva contra bacterias y virus. Las fuentes principales de radiación UVC son las lámparas de vapor de mercurio de baja presión (LPUV) y las de xenón-mercurio de media presión (MPUV). Las LPUV emiten radiación UVC a 254 nm, utilizada para la descontaminación, y a 185 nm, para procesos avanzados de oxidación. Las MPUV, por otro lado, son policromáticas y tienen intensidades superiores a las de las LPUV. Las lámparas excimer, que consisten en un tubo coaxial con electrodos y un cuerpo de vidrio de cuarzo, son importantes para la desinfección. Las lámparas excimer más relevantes para este fin son las de XeBr y KrCl, que emiten a 222 nm y 282 nm respectivamente.

Estas lámparas no requieren calentarse para funcionar y tienen una temperatura superficial inferior a 100°C. Las LPUV de amalgama y las MPUV tienen un historial de uso en la desinfección de aguas residuales, eliminando bacilos y bacterias intestinales.

4.6.1. Principios físicos de la radiación

Una fuente de radiación suele caracterizarse por su dosis (o fluencia), su potencia o su densidad de potencia (también conocida como irradiancia o intensidad). La dosis (D) se refiere a la cantidad de energía entregada (E_{en}) por unidad de área del material irradiado o tejido (S), es decir [26],

$$D = \frac{E_{en}}{S} \tag{4.17}$$

Cuya unidad en el Sistema Internacional es el [J/m^2]. Mientras que la potencia, es decir la cantidad de energía entregada por unidad de tiempo se encuentra dada por:

$$P = \frac{E_{en}}{t} \tag{4.18}$$

Cuya unidad en el SI es el [J/s] o [W] Watt. Por otra parte, la intensidad hace referencia a dosis entregada en la unidad de tiempo, es decir,

$$I = \frac{D}{t} \quad \text{o} \quad I = \frac{P}{S} \tag{4.19}$$

cuya unidad en el SI es el [W/m^2]. A partir de esta ecuación es posible determinar el tiempo de irradiación si I y D son previamente conocidas. Las ecuaciones (4.1), (4.2) y (4.3) aplican para una fuente de radiación ultravioleta cuya energía entregada es constante en el tiempo y monocromática.

Capítulo 5

Análisis vibracional del ácaro varroa destructor

5.1. Modelado

Una vez que se han expuesto las aplicaciones de frecuencias como método de eliminación de ácaro varroa, se pretende estudiar los efectos de estos estímulos en el ácaro y su fisonomía. Para dicho propósito se procedió generar un modelado en Mathematica para conocer primero de forma simulada qué se esperaría observar. El modelado consiste en considerar el caparazón del ácaro como una lámina rígida con una forma como la que se muestra a continuación

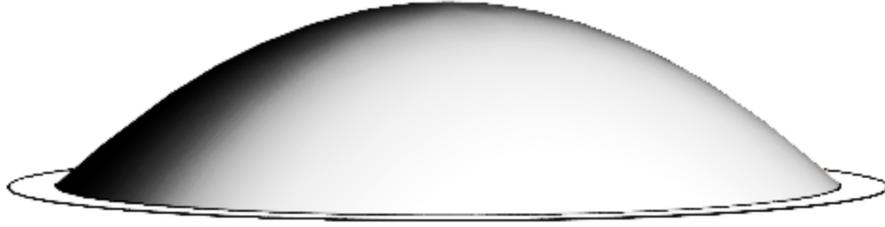


Figura 5.1: Representación gráfica del cuerpo de la varroa.

Dicha forma se utilizó en términos de simplificar la generación de la forma del ácaro, considerando que las dimensiones del caparazón del ácaro son mucho más grandes que el resto de su exoesqueleto. Asimismo, para realizar la aproximación numérica de las frecuencias (ω_0) se propuso la siguiente ecuación diferencial:

$$D\nabla^4 u = P(x, y, t) - \rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \gamma h \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5.1)$$

Donde:

- $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ es la rigidez flexional del caparazón (quitina), donde:
 - E es el módulo de elasticidad del caparazón del ácaro.
 - h es el espesor del caparazón del ácaro.
 - ν es el coeficiente de Poisson.
- $\nabla^4 u$ es el operador bilaplaciano aplicado al desplazamiento u , que describe la curvatura del caparazón del ácaro.

- $P(x, y, t)$ es la carga aplicada sobre el caparazón del ácaro en función de las coordenadas espaciales x, y y del tiempo t .
- ρ es la densidad de la quitina (masa por unidad de volumen).
- h es el espesor del caparazón del ácaro.
- $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ es la aceleración temporal del desplazamiento u .
- γ es el coeficiente de amortiguamiento que describe la disipación de energía.
- $\frac{\partial u}{\partial t}$ es la velocidad temporal del desplazamiento u .

Bajo las siguientes condiciones iniciales:

$$u(x, y, t) = u(r, t); \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \leq R \quad (5.2)$$

Donde:

- $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ es la distancia radial desde el centro del caparazón del ácaro.
- R es el radio máximo del caparazón del ácaro.

$$u(r, t = 0) = A \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (5.3)$$

Donde:

- A es una constante que define la magnitud inicial del desplazamiento.

$$u(r = R) = 0 \quad (5.4)$$

Donde la condición 5.4 indica que el desplazamiento en el borde del caparazón del ácaro es nulo. Por otra parte se tiene que:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R} = 0 \quad (5.5)$$

Lo que impone que la pendiente del desplazamiento radial en el borde es cero, indicando una falta de inclinación en el borde del ácaro. Al realizar la aproximación numérica de la solución a la ecuación diferencial propuesta, esta indicó que las frecuencias de resonancia se encuentran aproximadamente en 59 kHz y 228 kHz, tal como se muestra en la siguiente gráfica.

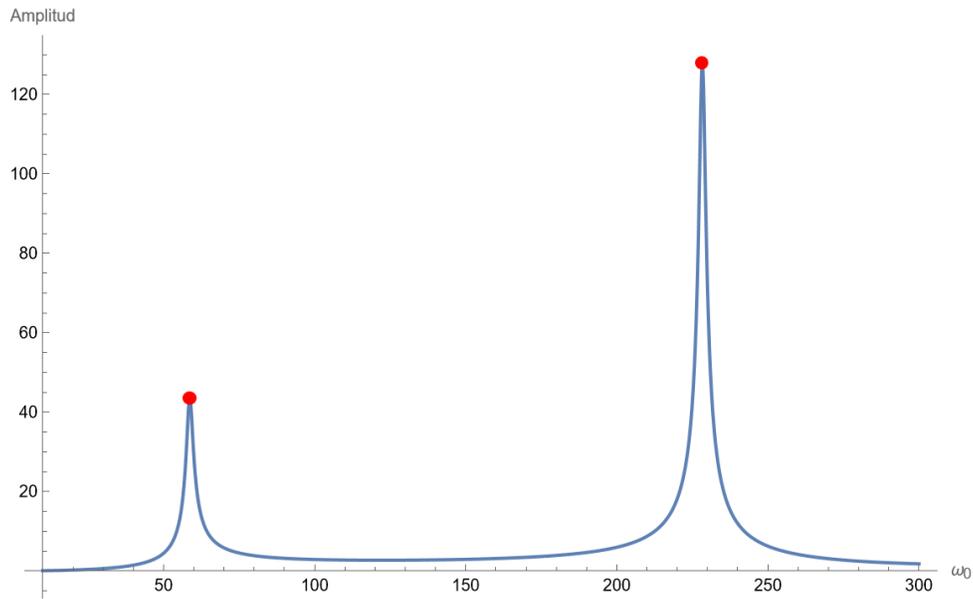


Figura 5.2: Gráfica de la solución a la ecuación diferencial propuesta. Se muestran las dos frecuencias de resonancia en 59 y 228 kHz aproximadamente.

Una vez que se encontraron los modos de resonancia se procedió a la simulación de los mismos recurriendo a las consideraciones anteriores sobre el caparazón del ácaro varroa. De esta forma, la aproximación numérica de la solución de la ecuación diferencial se sustituye por $u(x, y, t)$ en la siguiente ecuación:

$$\mathcal{M} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} e^{iku(x,y,t)} dt \quad (5.6)$$

Esta ecuación representa las franjas de interferencia en el holograma como una matriz de píxeles, y es clave para analizar las propiedades dinámicas del objeto. El objetivo final de la ecuación es recuperar la información contenida en las franjas de interferencia, que son las que codifican la información de la estructura del objeto y su movimiento. Al realizar la sustitución y operar sobre el modelo del ácaro se obtuvo la visualización gráfica que se muestra a continuación. Dicha visualización es la que se espera obtener y capturar experimentalmente.

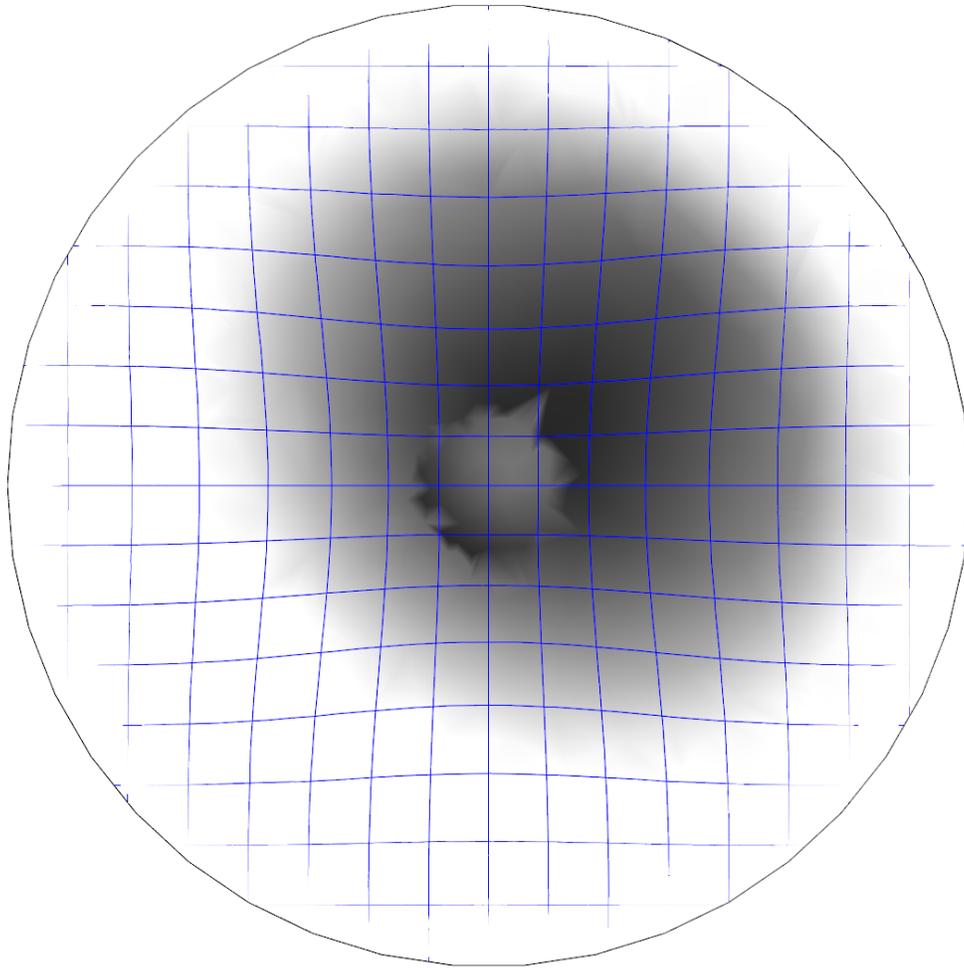


Figura 5.3: Representación de la simulación del primer modo de resonancia obtenido de la aproximación numérica de la Ec. (5.1).

5.2. Arreglo Experimental y Adquisición de hologramas

En la figura 5.4 se representa esquemáticamente el arreglo experimental utilizado para el desarrollo del presente trabajo. Para dicho arreglo se empleó un haz láser con una longitud de onda de 532 nm y una potencia máxima de salida de 1.5 W. Mediante un divisor (D) este láser se distribuyó en dos haces, objeto y referencia. El haz objeto se redirigió con tres espejos hasta hacerlo incidir en un divisor 50/50, dicho divisor hacía llegar el haz objeto hacía un objetivo de microscopio iluminando la muestra de ácaro, y al mismo tiempo redirigiendo la luz reflejada por la muestra. Por otra parte, del divisor BS1 se acopló una fibra óptica para redirigir el haz de referencia hacia un tercer divisor BS3 en donde se encontraba con el haz proveniente de la reflexión generada por el ácaro. Esta interferencia entre el haz reflejado y el haz de referencia se capturó por medio de una cámara CCD PCO.Edge de dimensiones 1024x1200 píxeles.

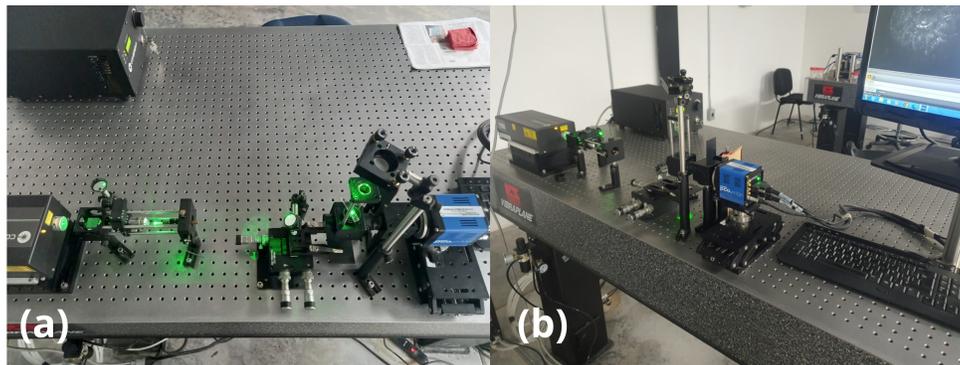


Figura 5.4: (a) Vista superior del arreglo interferométrico por reflexión. (b) Vista lateral del arreglo interferométrico por reflexión.

Una vez montado este arreglo, se acopló un dispositivo emisor de frecuencias sonoras con un rango de frecuencias de 0 a 20 kHz, este rango de frecuencias es el que se analizó, dado que la capacidad de generación de sonido del dispositivo se encontraba en ese rango.

Dicho dispositivo se colocó en la parte inferior del portaobjetos donde se colocó el ácaro. este dispositivo emisor generaba las frecuencias a través de una aplicación instalada en un dispositivo móvil. Inicialmente se procedió a determinar si era posible obtener la visualización de un holograma del ácaro tal como se observa en la figura 5.5. para posteriormente proceder a la aplicación del estímulo sonoro.

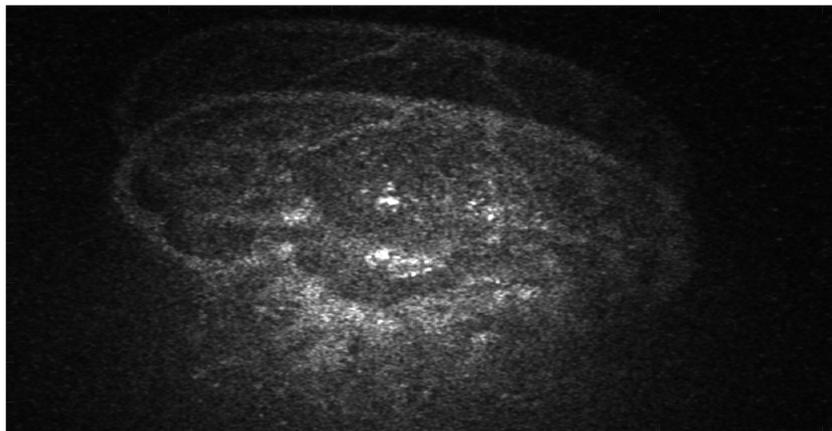


Figura 5.5: Ácaro varroa observado mediante el arreglo interferométrico de la Figura 5.4.

Posteriormente al constatar que era posible obtener un holograma del ácaro mediante el arreglo, se procedió a la aplicación de un estímulo sonoro para determinar si mediante este mismo arreglo se podía obtener un inteferograma que correspondiera a cambios en la muestra de ácaro.

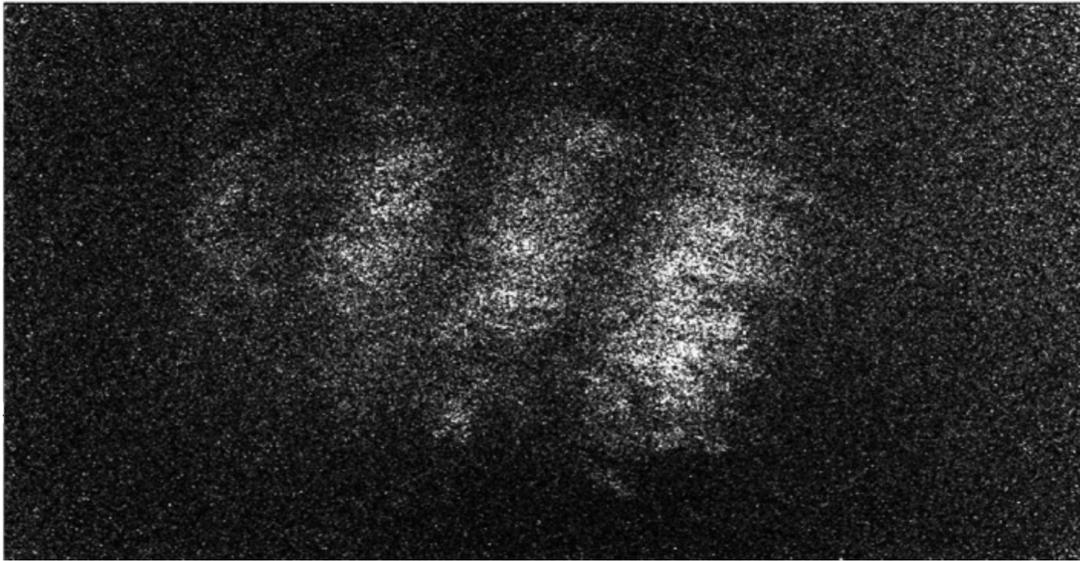


Figura 5.6: Interferograma del Ácaro varroa durante la aplicación de estímulo sonoro aleatorio

Una vez que se consiguió visualizar el interferograma del ácaro bajo los efectos de un estímulo sonoro aleatorio, se procedió a realizar este mismo procedimiento de forma más metódica por medio de un barrido de frecuencias, siempre considerando el comportamiento esperado según el modelado del ácaro. Todas las imágenes mostradas a continuación fueron obtenidas utilizando la cámara CCD mencionada anteriormente.

En la serie de interferogramas capturados durante el barrido de frecuencias se puede apreciar desde la Figura 5.7 hasta la Figura 5.13 como se forman franjas, esto como consecuencia de las diferentes frecuencias aplicadas. Dichas franjas van cambiando su dirección y forma acorde a cada frecuencia. Sin embargo no se observa el comportamiento esperado según la simulación realizada en el apartado anterior y mostrada en la figura 5.3. Este resultado al no satisfacer la visualización esperada, conllevó a un replanteamiento de la metodología experimental tomando en cuenta que las franjas observadas son consecuencia de la vibración conjunta del sistema portaobjeto-ácaro. Por lo que se dedujo que probablemente el medio donde se encontraba depositado el ácaro podría estar interfiriendo en su comportamiento ante los estímulos sonoros aplicados. De esta forma, se consideró que

era necesario separar al ácaro del medio.

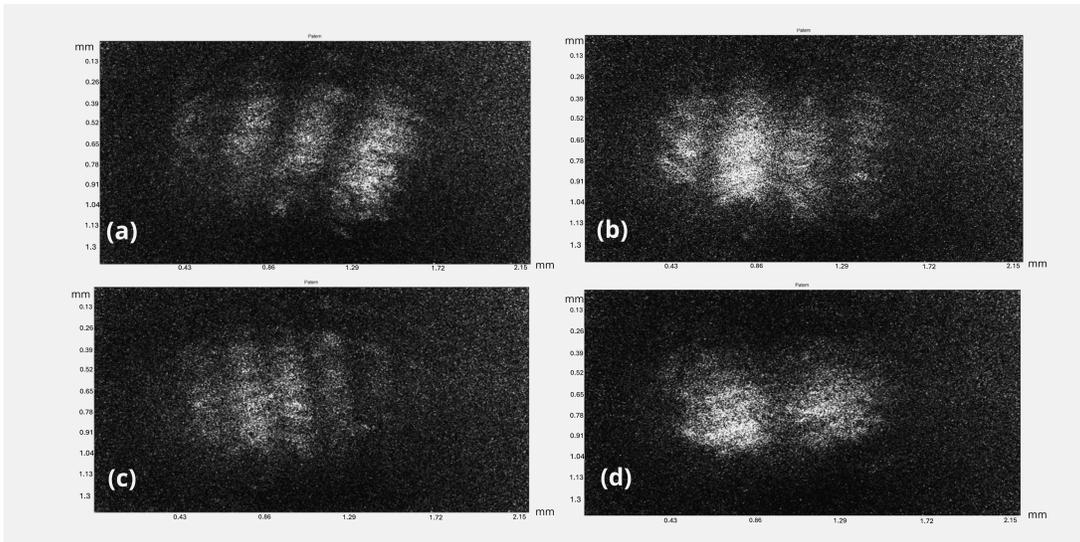


Figura 5.7: Ácaro varroa durante la aplicación de: a) 125Hz, b) 130 Hz, c) 135 Hz y d) 140 Hz. se pueden observar las franjas de interferencia generadas por el estímulo sonoro aplicado

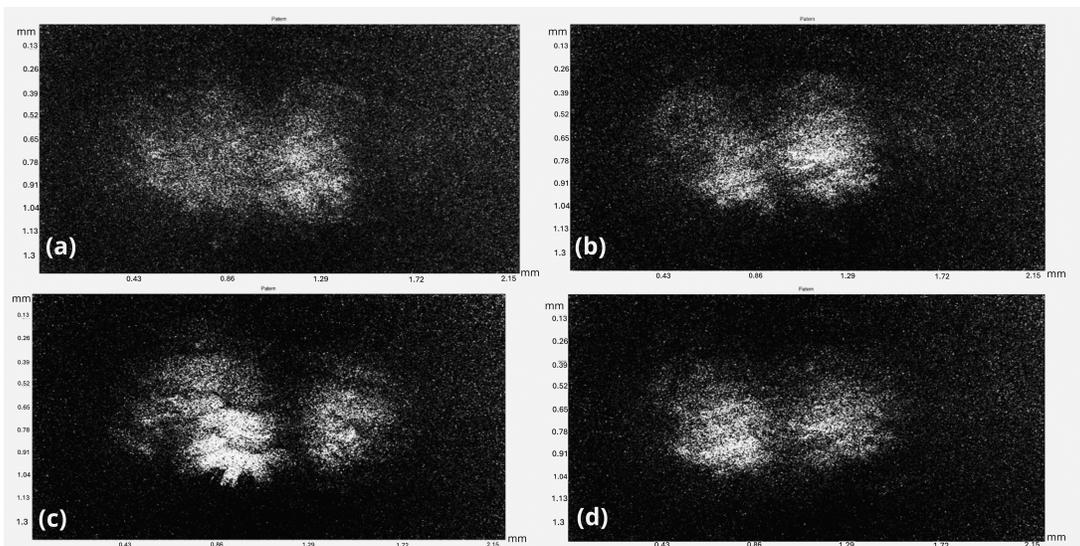


Figura 5.8: Ácaro varroa observado durante la aplicación de: a) 145Hz, b) 150 Hz, c) 155 Hz y d) 160 Hz. Se aprecia una franja.

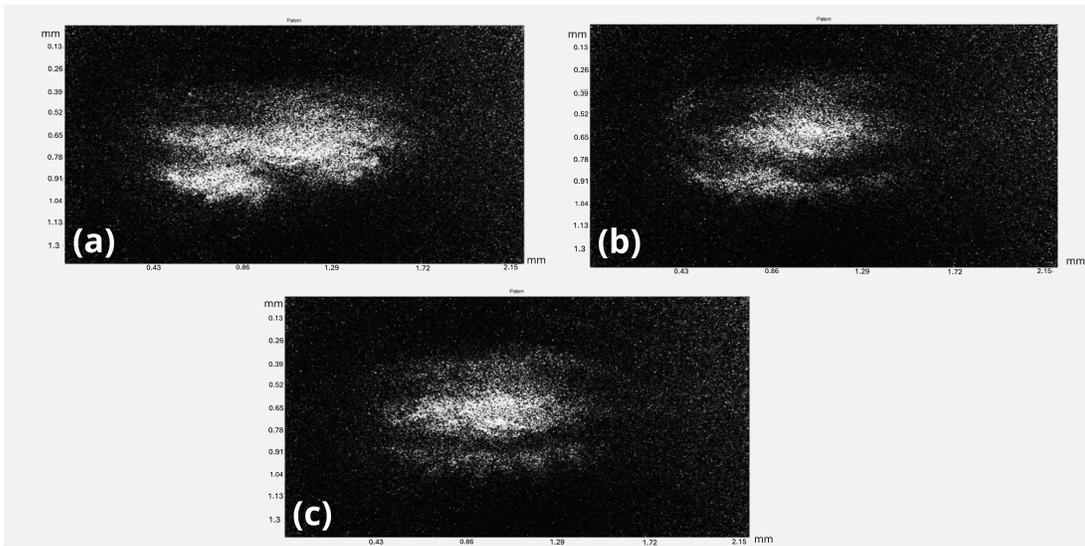


Figura 5.9: Ácaro varroa observado durante la aplicación de: a) 200Hz, b) 210 Hz y c) 220 Hz.

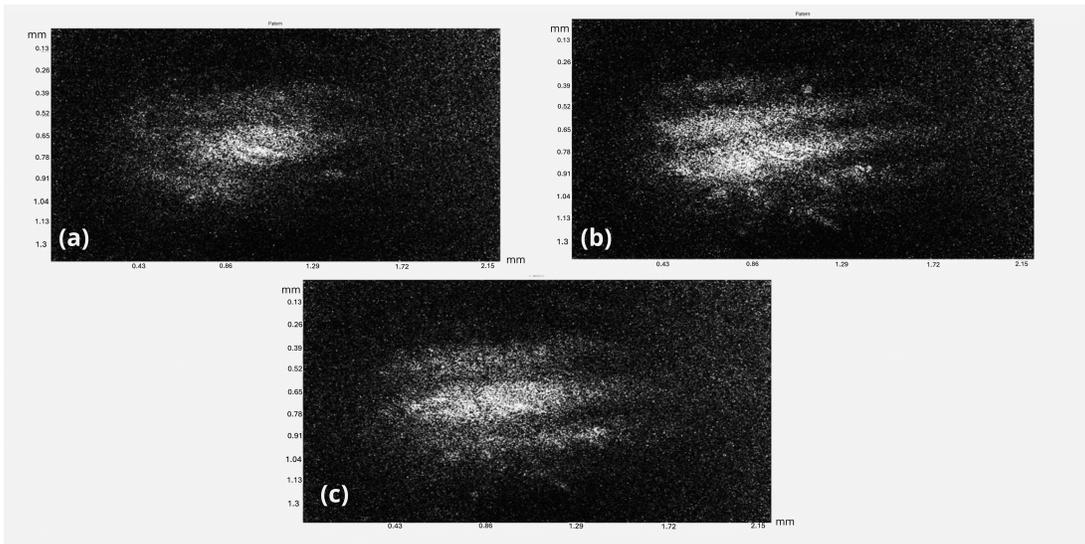


Figura 5.10: Ácaro varroa observado durante la aplicación de: a) 230Hz, b) 235 Hz y c) 240 Hz.

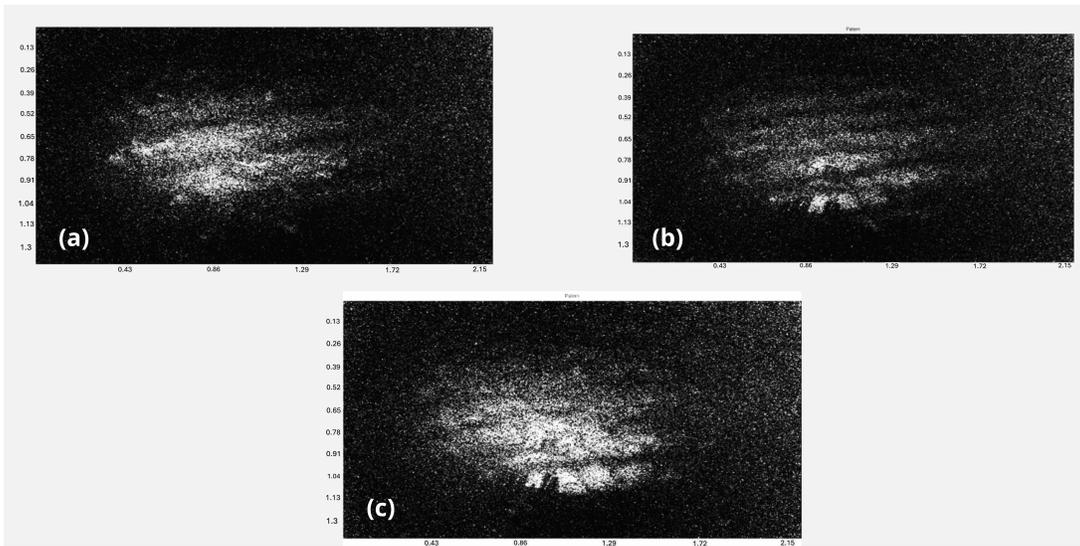


Figura 5.11: Ácaro varroa observado durante la aplicación de: a) 245Hz, b) 250 Hz y c) 255 Hz.

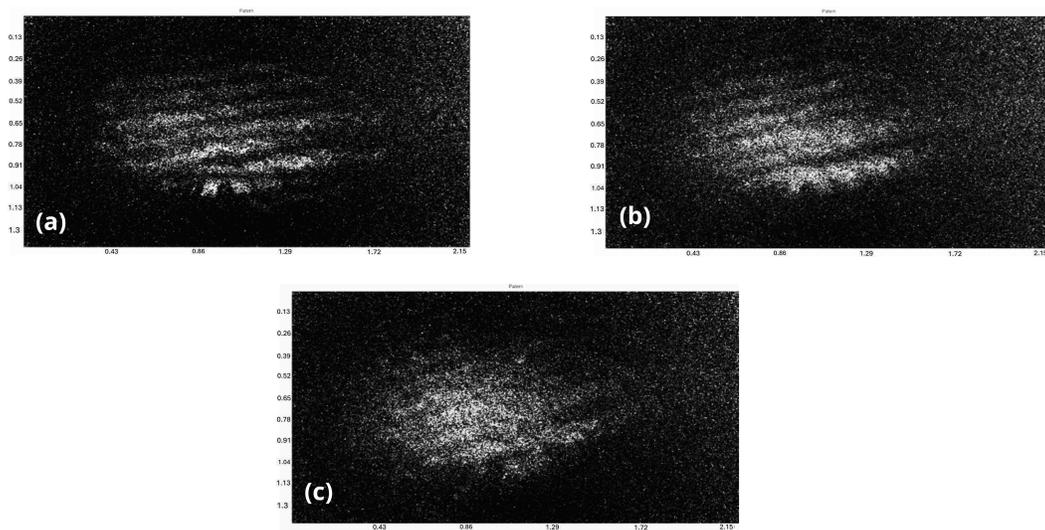


Figura 5.12: Ácaro varroa observado durante la aplicación de: a) 260Hz, b) 265 Hz y c) 270 Hz.

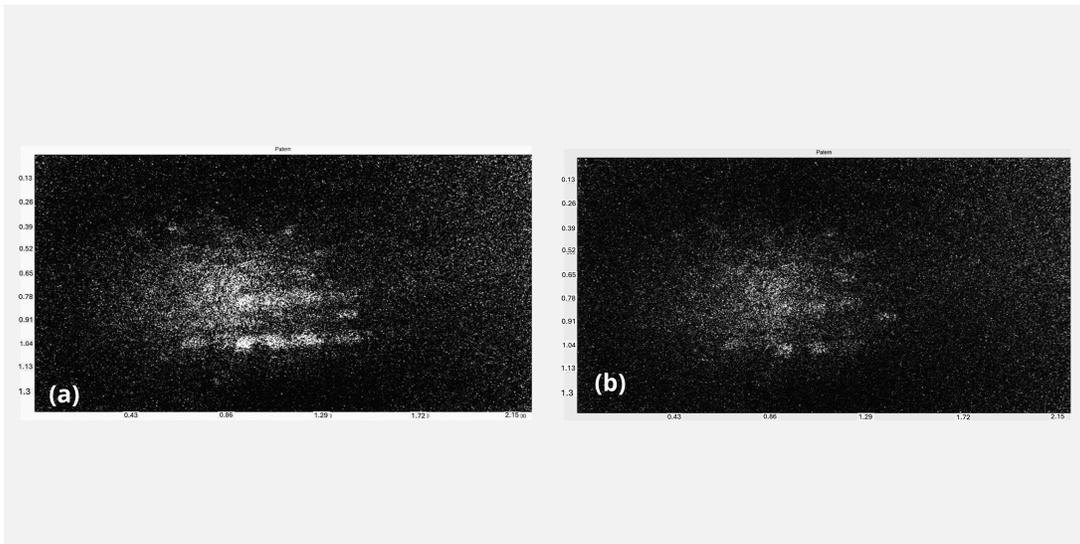


Figura 5.13: Ácaro varroa observado durante la aplicación de: a) 290Hz y b) 295 Hz

Finalmente, llegados a los 310 Hz, el cuerpo del ácaro deja de exhibir franjas y en su lugar 'salta' de la superficie del portaobjetos donde se encuentra contenido. Se intentaron aplicar frecuencias entre 300 y 310 Hz, obteniéndose el mismo resultado.

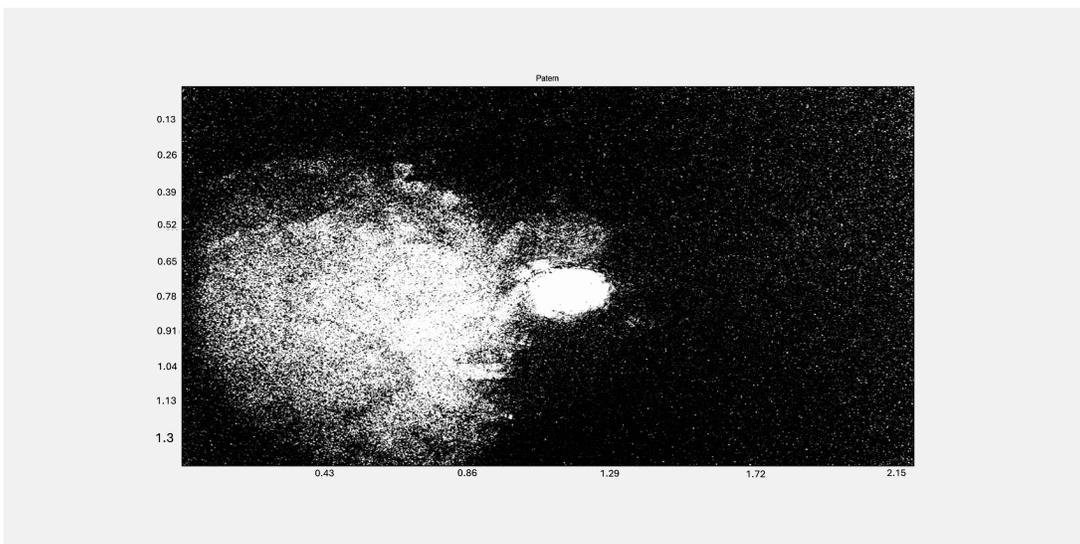


Figura 5.14: Ácaro varroa observado durante la aplicación de 310 Hz.

Tras observar este comportamiento del ácaro ante los estímulos vibracionales, se dedujo que la aparición de las franjas longitudinales alineadas en el cuerpo del mismo se

debía a un comportamiento en donde el portaobjetos vibraba en conjunto con la muestra. Asimismo, las franjas longitudinales observadas se trataron de explicar a través de la misma función característica 5.6 mencionada anteriormente en el apartado de simulación. Se tiene entonces la función característica

$$\mathcal{M} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} e^{i\Delta\phi(\vec{r},t)} dt \quad (5.7)$$

donde para la vibración , $\Delta\phi$ está definida de la siguiente manera:

$$\Delta\phi = KA \sin(\omega t) \quad (5.8)$$

o también como

$$\Delta\phi = K(\vec{r}_0 + \vec{V}_0 t) \quad (5.9)$$

donde $\Delta\phi$ representa el desplazamiento de un punto debido a una vibración, tomando en cuenta la velocidad y el tiempo. Lo anterior deducido a partir de que las franjas longitudinales podrían representar una vibración que las mueve a todas en una misma dirección.

Sustituyendo esta definición en la ecuación para \mathcal{M} , tenemos:

$$\mathcal{M} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_0} \cdot e^{i\vec{k}\cdot\vec{V}_0 t} dt \quad (5.10)$$

Extrayendo de la integral los términos que no dependen del tiempo:

$$\mathcal{M} = \frac{e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_0}}{\tau} \int_0^{\tau} e^{i\vec{k}\cdot\vec{V}_0 t} dt \quad (5.11)$$

Resolviendo la integral:

$$\mathcal{M} = \frac{e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_0}}{\tau} \left. \frac{e^{i\vec{k}\cdot\vec{V}_0 t}}{i\vec{k}\cdot\vec{V}_0} \right|_0^\tau \quad (5.12)$$

Evaluando en los límites y reordenando términos:

$$\mathcal{M} = \frac{e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_0}}{\tau} \frac{e^{i\vec{k}\cdot\vec{V}_0\tau} - 1}{i\vec{k}\cdot\vec{V}_0} \quad (5.13)$$

$$\mathcal{M} = \frac{e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_0}}{\tau i\vec{k}\cdot\vec{V}_0} [e^{i\vec{k}\cdot\vec{V}_0\tau} - 1] = e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_0} \cdot e^{\frac{i}{2}\vec{k}\cdot\vec{V}_0\tau} \cdot \frac{e^{\frac{i}{2}\vec{k}\cdot\vec{V}_0\tau} - e^{-\frac{i}{2}\vec{k}\cdot\vec{V}_0\tau}}{i\vec{k}\cdot\vec{V}_0\tau} \quad (5.14)$$

Reescribiendo la ecuación según la identidad de Euler:

$$\mathcal{M} = e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}_0 + \frac{1}{2}\vec{k}\cdot\vec{V}_0\tau)} \cdot \frac{2i \sin\left(\frac{\vec{k}\cdot\vec{V}_0\tau}{2}\right)}{i\vec{k}\cdot\vec{V}_0\tau} \quad (5.15)$$

$$\mathcal{M} = e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}_0 + \frac{1}{2}\vec{k}\cdot\vec{V}_0\tau)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\vec{k}\cdot\vec{V}_0\tau}{2}\right)}{\frac{\vec{k}\cdot\vec{V}_0\tau}{2}} \quad (5.16)$$

De aquí se deduce que la aparición de las franjas longitudinales se debe a que la vibración está generando un movimiento en el ácaro en la misma dirección que todos los puntos del portaobjetos, este movimiento se puede representar bajo la función $\text{sinc}^2(x) = \left(\frac{\sin\left(\frac{\vec{k}\cdot\vec{V}_0\tau}{2}\right)}{\frac{\vec{k}\cdot\vec{V}_0\tau}{2}}\right)^2$, cuya gráfica se muestra a continuación. En esta gráfica de la función se observan crestas las cuales en su punto más alto representarían las partes luminosas, y los valles o hundimientos de la función, los puntos oscuros, dando así lugar al patrón de franjas que se observó.

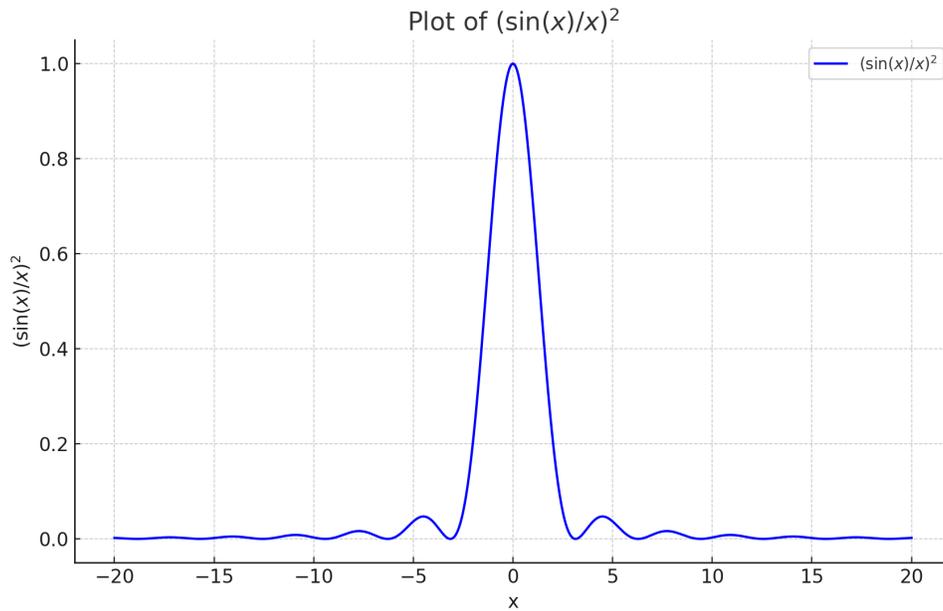


Figura 5.15: Gráfica de la función $\text{sinc}^2(x)$

A partir de esto se planteó la reestructuración de la metodología experimental y se considera necesario el separar el ácaro del portaobjetos.

Para tales fines se consideró entonces el hacer levitar al ácaro para observarlo y posteriormente aplicarle frecuencias que lo hicieran vibrar. De esta forma se construyó un levitador ultrasónico utilizando buzzers y una placa de circuito integrado, tal como se observa en la Figura 5.16.

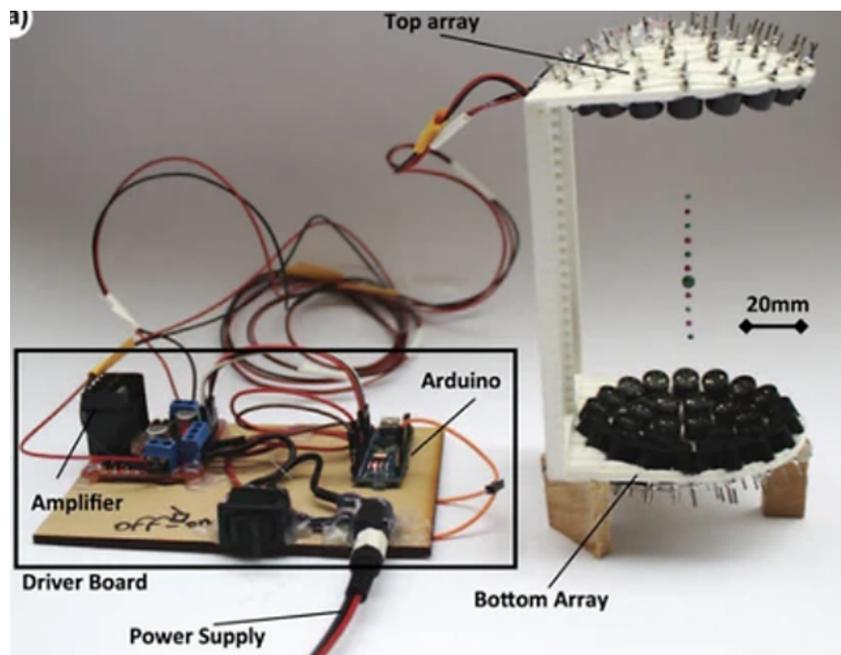


Figura 5.16: Levitador ultrasónico armado para el análisis del ácaro sin necesidad de un portaobjetos.

Un levitador acústico ultrasónico es un aparato que emplea ondas sonoras para mantener objetos suspendidos en fluidos, como el aire. Estos dispositivos logran la levitación mediante ondas acústicas que contrarrestan la fuerza gravitatoria terrestre, permitiendo que objetos de tamaños micrométricos y milimétricos queden atrapados en posiciones específicas. El desarrollo práctico de esta tecnología comenzó en los años 70 en el Jet Propulsion Laboratory de la NASA, donde se investigó la manipulación de objetos en condiciones de microgravedad. Actualmente, sigue en evolución y tiene múltiples aplicaciones, que van desde la suspensión y manejo de sustancias para realizar reacciones químicas sin contenedores, hasta el estudio de las propiedades físicas y químicas de líquidos, y la creación de pantallas 3D basadas en holografía acústica[27]. El levitador cumplió su función de levantar el ácaro, de modo que este no se encontrara apoyado sobre alguna superficie como anteriormente se encontraba sobre el portaobjetos. No obstante la visualización del ácaro resultó infructuosa, dado que la muestra presentaba movimientos

oscilatorios que dificultaban la captura de hologramas. Por otra parte se optó por buscar fuentes de frecuencias más altas que pudieran permitir la visualización de las franjas esperadas, pero los equipos para tales fines se encontraban en un rango muy especializado, fuera del alcance de tiempo y recursos del presente trabajo.

Capítulo 6

Estudio de los efectos de la aplicación de luz ultravioleta en el ácaro varroa

6.1. Procedimiento experimental

En el presente capítulo, se tomarán las bases teóricas expuestas en el capítulo 3 sobre la luz ultravioleta y los efectos hasta ahora reportados sobre las plagas y artrópodos de la familia de los ácaros; con ello se pretende extender estas bases para el estudio y el monitoreo de sus efectos sobre el cuerpo, exoesqueleto y en general la morfología del ácaro varroa destructor, que es el objeto central del presente trabajo de investigación. Este monitoreo es realizado mediante Interferometría holográfica digital haciendo uso de la misma fuente de luz UV con la que se irradió al ácaro.

6.1.1. Arreglo experimental y adquisición de hologramas

Para los propósitos del presente capítulo, el arreglo experimental consistió en un rayo láser con una longitud de onda de 355 nm, una cámara CCD pco.ultraviolet, dos divisores de haz 50/50, una fibra óptica y un conjunto de lentes UV. El montaje experimental se muestra esquemáticamente en la Figura 6.1. El rayo láser se dividió en un haz de referencia (Rb) y un haz de objeto (Ob) mediante un divisor de haz (Bs1).

El haz de referencia se dirigió hacia la fibra óptica (Of) y se transmitió a un segundo divisor de haz (Bs2), que reflejó el 50% de la intensidad del haz hacia la cámara CCD. El haz de objeto se colimó utilizando lentes UV especiales (L1 y L2) y se dirigió hacia el espécimen. La cámara CCD recogió la luz retrodispersada en un ángulo (α) de 14° . Se utilizó una lente UV especial (L3) y un diafragma (A) frente a ella para capturar una imagen en la cámara CCD. El láser utilizado en este estudio fue el Cobolt 05-01, un láser de estado sólido bombeado por diodos de onda continua de alto rendimiento. Este láser opera a una longitud de onda de 350 nm y entrega una potencia de salida de hasta 50 mW. Para la cámara, se utilizaron una cámara pco.ultraviolet, la cual es una cámara científica de alta sensibilidad y alta velocidad diseñada para aplicaciones de imagen ultravioleta (UV).

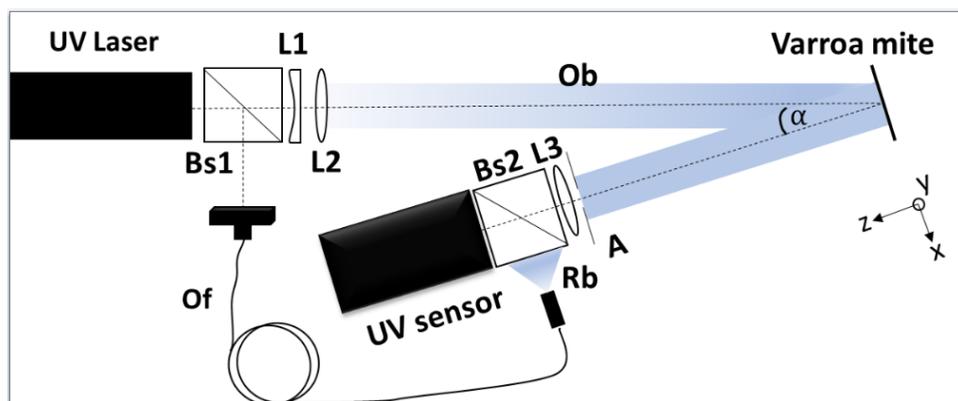


Figura 6.1: Representación del arreglo experimental para irradiación luz UV.

Esta cámara UV tiene una resolución de 1392 x 1040 (h x v) y un rango dinámico de 14 bits. Además, en el montaje experimental se utilizó una fibra óptica de modo único. Las lentes utilizadas en el montaje experimental fueron el conjunto de lentes plano-convexas UVFS de 01"- recubiertas con UV de 290-370 nm.

Las muestras se montaron cuidadosamente en láminas adhesivas y se expusieron continuamente durante 1 hora a irradiación UVA. Se considera irradiación continua ya que la fuente de irradiación y la fuente de luz para la grabación de los hologramas son la misma.



Figura 6.2: Vista superior del arreglo experimental para irradiación luz UV armado.

Se registraron hologramas con una exposición de 10 ms, utilizando una cámara CCD (Sae Manufacturing Specialties Corp., Bayville, NY, EE. UU.) que capturaba un holograma cada 1.6 minutos. Durante este tiempo, se midió una dosis de irradiación UVA de 0.428 ± 0.024 W/cm² por segundo. El sistema holográfico se diseñó para obtener hologramas de alta resolución, que detallan minuciosamente la superficie del ácaro. La reconstrucción digital de estos hologramas se llevó a cabo con algoritmos de procesamiento de imágenes

mediante el software MATLAB R2023. Gracias a este proceso, se generaron mapas de fase del ácaro, permitiendo medir con precisión las deformaciones en su superficie.

6.1.2. Colecta de muestra de ácaro Varroa

Las muestras de ácaro Varroa destructor fueron proporcionados por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). El muestreo se realizó en la primavera de 2023, asegurando que se incluyeran diferentes etapas de desarrollo del ácaro. Los ácaros se recolectaron cuidadosamente usando el método de lavado de abejas de David de Jong (siguiendo la NOM-001-ZOO-1994 [17], modificada por última vez en 1998) para evitar causarles estrés o daño. Se prestó especial atención a seleccionar ácaros con características típicas de una población saludable. La recolección y manejo cuidadoso de los especímenes fueron pasos cruciales para obtener datos precisos sobre los efectos de la irradiación UVA. En total, se donaron 35 muestras para estudios sobre los ácaros Varroa, y en este estudio se utilizaron cinco de estos especímenes.



Figura 6.3: Muestra de ácaro varroa colectada.

6.1.3. Procesamiento de Hologramas

El procedimiento llevado a cabo en este estudio se muestra gráficamente en la Figura 6.3. Para cada espécimen, se registró una serie de hologramas (H_0, H_1, \dots, H_n), espaciados uniformemente con una diferencia de tiempo Δt de 1.6 minutos. Este enfoque garantiza que cualquier daño en la superficie se capture a lo largo de la serie de hologramas, permitiendo una evaluación detallada de las posibles alteraciones.

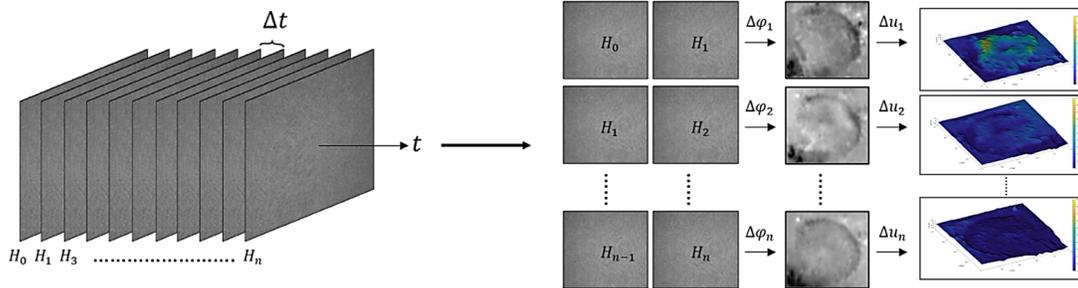


Figura 6.4: Representación gráfica del procesamiento de los hologramas

A partir de la serie de hologramas, la diferencia de fase entre hologramas consecutivos, expresada matemáticamente por la Ecuación (6.1), se extrajo mediante procesamiento digital. Finalmente, cada uno de los mapas de fase se procesó para obtener los mapas de desplazamiento $\Delta u(x, y)$ en el eje z . Estos mapas de desplazamiento proporcionaron una medida cuantitativa de las variaciones en la geometría que sufre el *Varroa destructor* debido a la exposición a la radiación UVA.

$$\Delta\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{e} \cdot \Delta U \quad (6.1)$$

Esta ecuación representa el cambio de fase en cada punto (x, y) de la imagen en un sistema de interferometría holográfica digital, donde:

- $\Delta\phi(x, y)$: es el cambio de fase en el punto específico (x, y) del plano de la imagen

holográfica. Este cambio de fase cuantifica las variaciones en el objeto, como deformaciones o cambios en el índice de refracción, al comparar el estado antes y después de un cambio.

- λ : es la longitud de onda de la luz utilizada en el experimento de interferometría holográfica. La longitud de onda determina la sensibilidad de la medición: longitudes de onda más cortas permiten detectar cambios más pequeños en el objeto.
- \hat{e} : es un vector unitario que define la dirección de observación en el sistema óptico. En muchos experimentos, \hat{e} apunta en la dirección del rayo incidente o de observación para obtener una medición precisa del cambio de fase.
- ΔU : representa la variación del desplazamiento o el cambio en la posición del objeto, asociado a deformaciones físicas, movimientos o cambios en el índice de refracción de la muestra.

En conjunto, esta ecuación indica que el cambio de fase $\Delta\phi(x, y)$ en cada punto (x, y) es proporcional a la variación de desplazamiento ΔU , escalado por la longitud de onda λ y la dirección de observación \hat{e} . Esta relación permite reconstruir el perfil de los cambios en la muestra, facilitando la visualización precisa de desplazamientos minúsculos o cambios en las propiedades del ácaro.

6.1.4. Resultados y discusión

En la Figura 6.4, se muestra la amplitud de cuatro hologramas reconstruidos mediante procesamiento digital. En la Figura 6.4a, se observa que el ácaro refleja menos intensidad que su entorno, lo que sugiere una absorción significativa de radiación UVA por parte del ácaro. Para mejorar los resultados de la medición, se intentó reducir la reflexión del entorno añadiendo un fondo oscuro y optimizando el tiempo de exposición (10 ms). Los resultados se muestran en la Figura 6.4a–c.

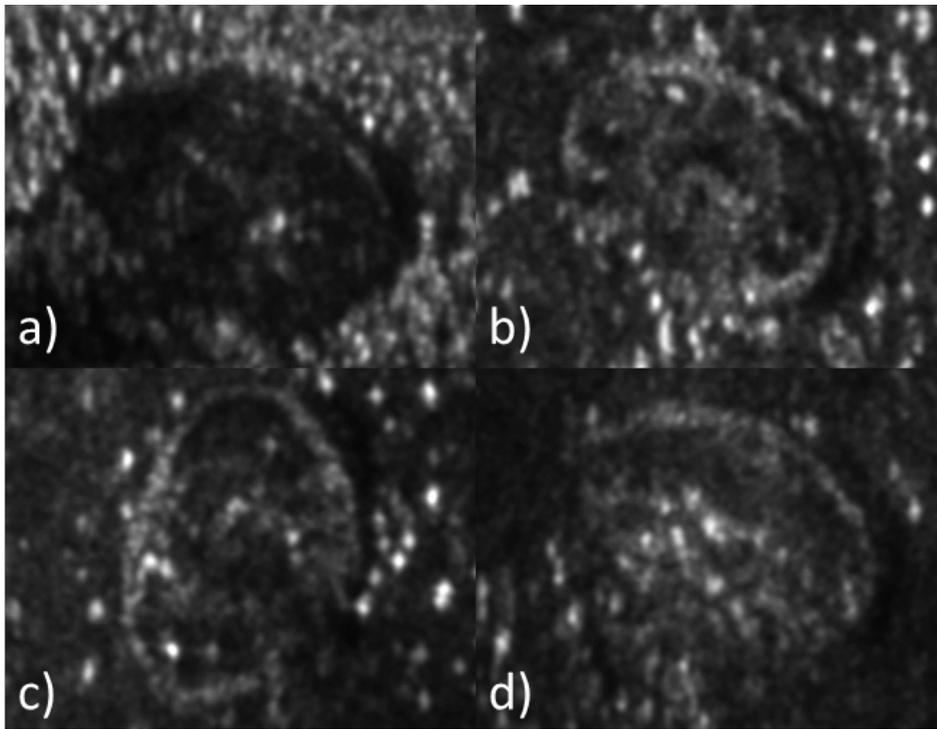


Figura 6.5: Reconstrucción de la amplitud de cuatro especímenes de *Varroa destructor*. Los hologramas fueron registrados con un láser UVA a $\lambda = 355$ nm.

La Figura 6.5 muestra los primeros nueve mapas de diferencia de fase extraídos de una serie de hologramas. Cada una de las imágenes representa la diferencia de fase entre dos hologramas consecutivos cuyo registro difiere en un tiempo correspondiente a una dosis de irradiación UVA (1.6 min). En la Figura 6.5b, es posible observar una deformación alrededor del escudo genital (GS) del ácaro.

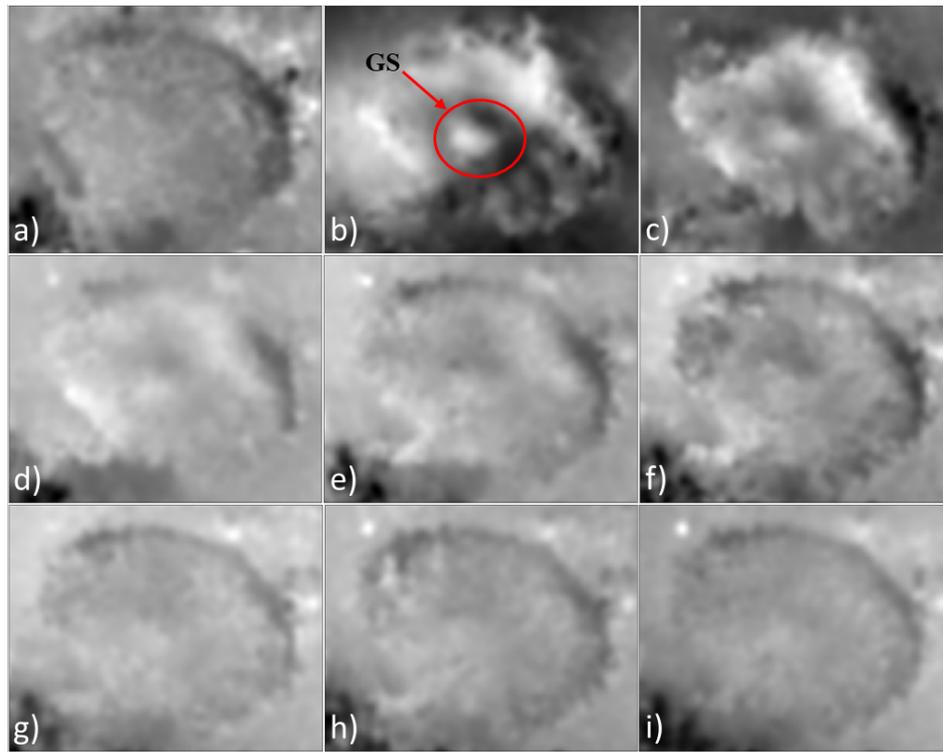


Figura 6.6: Mapas de diferencia de fase extraídos de una serie de hologramas registrados con un láser UVA a $\lambda = 355$ nm. Cada mapa de diferencia de fase fue obtenido entre dos hologramas consecutivos. (a) Diferencia de fase a los 1.6 minutos. (b) Diferencia de fase a los 3.2 minutos. (c) Diferencia de fase a los 4.8 minutos. (d) Diferencia de fase a los 6.4 minutos. (e) Diferencia de fase a los 8.0 minutos. (f) Diferencia de fase a los 9.6 minutos. (g) Diferencia de fase a los 11.2 minutos. (h) Diferencia de fase a los 12.8 minutos. (i) Diferencia de fase a los 14.4 minutos.

La Figura 6.6a muestra el mapa de desplazamiento con la amplitud más alta (aproximadamente $0.5 \mu\text{m}$). Las áreas encerradas por un círculo rojo (denominadas escudo anal (AS) y escudo genital (GS) según lo designado en [18]) indican regiones del espécimen de Varroa que experimentan una hinchazón más pronunciada. La Figura 6.6b muestra los mapas de desplazamiento extraídos de los mapas de fase de la Figura 6.5. Estos mapas de desplazamiento muestran la progresión de las alteraciones en el ácaro a lo largo del tiempo. La diferencia en amplitud entre los mapas de la Figura 6.6b sugiere una desaceleración de las alteraciones después de la tercera dosis de irradiación.

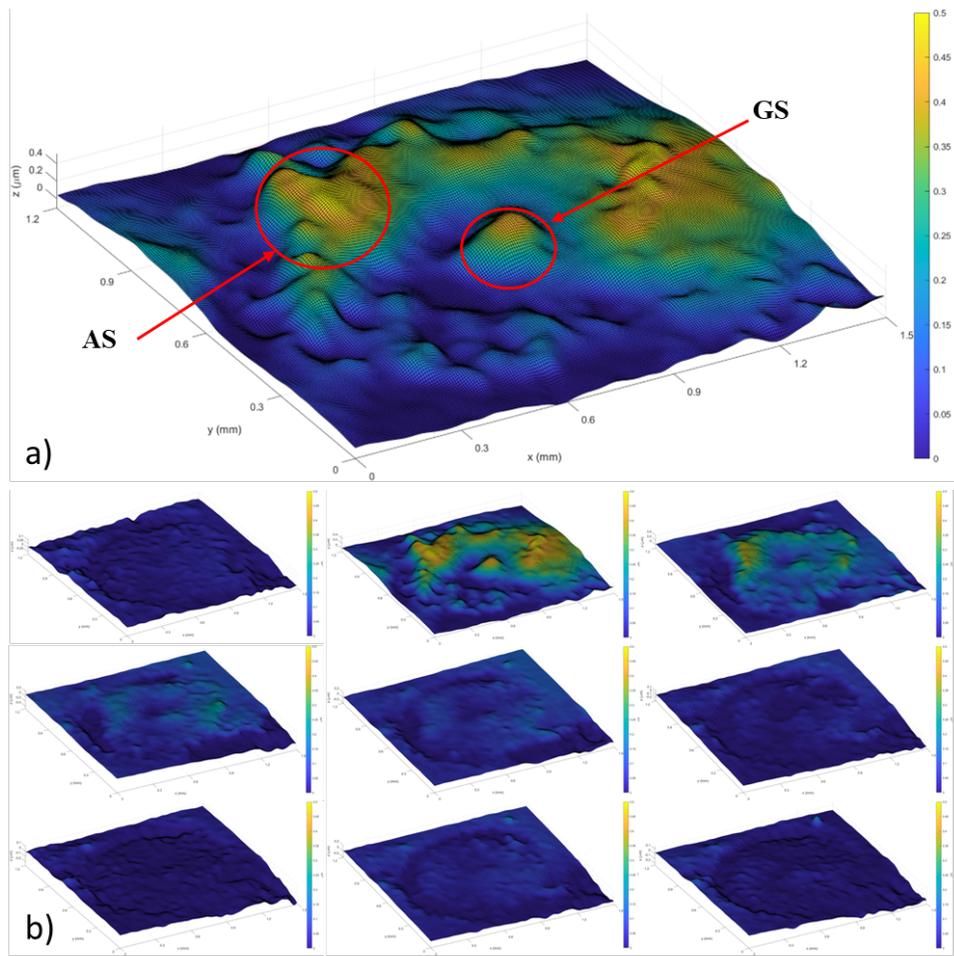


Figura 6.7: (a) Mapa de desplazamiento extraído de la Figura 4b, (b) mapas de desplazamiento extraídos de la Figura 6.5.

La Figura 6.7 muestra un gráfico del valor promedio de desplazamiento a lo largo del tiempo para cada espécimen. En esta gráfica, se puede observar que todos los especímenes exhiben el mismo comportamiento; sin embargo, el tiempo en que alcanzan el desplazamiento máximo varía entre los experimentos. Esto sugiere que cada espécimen puede absorber una cantidad diferente de radiación UVA. Este valor promedio de desplazamiento implica que, en lugar de analizar el desplazamiento en un punto específico, se calcula un promedio espacial o temporal sobre varios puntos del ácaro o a lo largo del tiempo para cada fotograma. Esto permite una visión general de la magnitud y dirección

de las deformaciones en el ácaro.

El cambio de fase, $\Delta\phi(x, y)$, registrado en los hologramas, se traduce en desplazamientos ΔU que se pueden promediar para obtener una medida representativa de cómo se deforma el ácaro con el tiempo bajo la influencia de la luz UV.

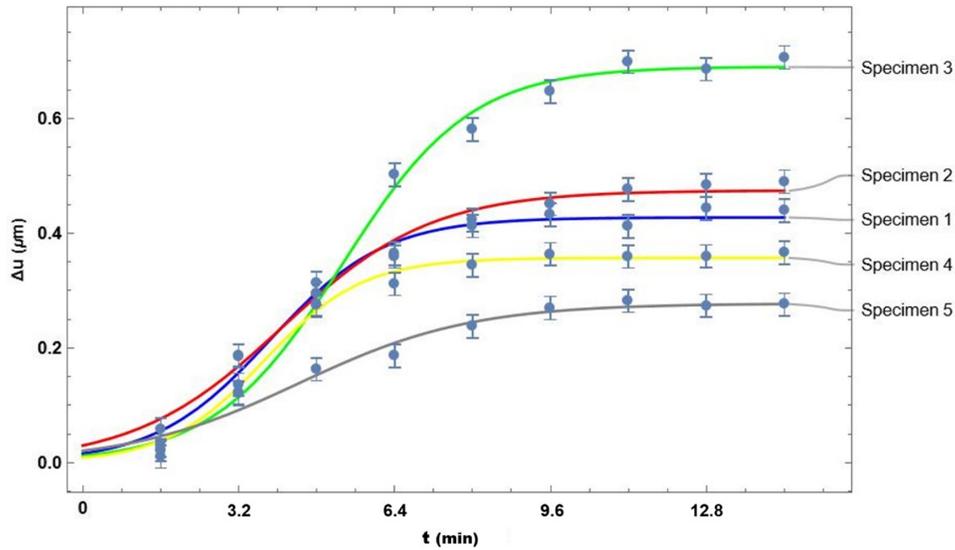


Figura 6.8: Valor promedio de desplazamiento a lo largo del tiempo

Las curvas en el gráfico de la Figura 6.7 fueron generadas usando la ecuación

$$\Delta u(t) = \frac{a}{1 + be^{-kt}} \quad (6.2)$$

donde a , b y k son constantes seleccionadas de manera que las curvas se ajusten mejor a los datos experimentales. Los valores de estas constantes se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Parámetros de la ecuación (6.2) para el mejor ajuste de los datos experimentales

Specimen	a	b	k
1	0.427304	26.276475	1.361738
2	0.474361	14.949269	1.052715
3	0.690298	58.175074	1.221711
4	0.356871	40.920902	1.591442
5	0.277327	12.515519	0.909502

El estudio actual muestra, mediante el uso de interferometría holográfica digital (IHD), los efectos de la irradiación UVA en los ácaros Varroa. Estos efectos fueron observados midiendo los cambios en los mapas de fase derivados de una serie de hologramas. La metodología experimental presentada en el estudio demuestra un enfoque novedoso para medir alteraciones en el ácaro Varroa. Los cambios medidos ocurren a pequeña escala y se capturan en tiempo real. La investigación también destaca aspectos positivos en la lucha contra el ácaro Varroa al introducir nuevos métodos que reducen la dependencia de productos químicos y minimizan el riesgo de desarrollo de resistencia en los ácaros. Los cambios en la superficie de los especímenes de ácaro indican que la irradiación aplicada tiene efectos adversos que impactan directamente la integridad del ácaro. Basado en lo anterior, se espera que esta investigación contribuya a las líneas de conocimiento aplicadas a la conservación de abejas, así como a temas relacionados con las aplicaciones de técnicas interferométricas holográficas digitales.

Capítulo 7

Conclusiones

La investigación presentada en esta tesis ha permitido profundizar en la comprensión de las respuestas del ácaro *Varroa destructor* a diversos estímulos físicos, como la aplicación de frecuencias y la irradiación UVA, así como las limitaciones y desafíos que se enfrentan en la búsqueda de alternativas efectivas para su control.

En el desarrollo experimental del primer capítulo, se implementó un modelo teórico basado en la teoría de placas para simular los efectos esperados sobre el ácaro a partir de su exposición a frecuencias, a partir de este modelo se determinó que las franjas descritas por una función de Bessel se podían encontrar en los 59 y 228 kHz. Para constatar el modelado, se realizó un barrido de frecuencias mediante un dispositivo sonoro cuyo rango iba de cero hasta 60 kHz, no obstante se observaron franjas de interferencia desde los 125 Hz, y al llegar a los 310 Hz el ácaro varroa “saltó” del portaobjetos donde se encontraba contenido. Este rango de frecuencias no generó las franjas de Bessel esperadas, por lo que se optó por modificaciones en el arreglo experimental que constaban de un sistema de levitación para separar el ácaro del portaobjetos. Esto último representó nuevos retos en la visualización y estabilidad del ácaro. A pesar de los intentos de aplicar frecuencias más altas y explorar la documentación de artefactos de alta gama para generar pulsos

ultrasónicos, las limitaciones de tiempo y recursos impidieron la experimentación con estos instrumentos avanzados.

El sexto capítulo del estudio investigó los efectos de la irradiación UVA en *Varroa destructor*, revelando que el ácaro absorbe gran parte de esta energía electromagnética, lo que provoca una inflamación leve pero notable, especialmente alrededor del escudo anal y genital. Estos hallazgos, obtenidos a través de técnicas de alta precisión, sugieren una rápida respuesta del ácaro a la irradiación UVA, que podría comprometer su integridad y viabilidad. Además de mejorar nuestra comprensión de la biología de *Varroa destructor*, esta metodología establece una base sólida para la aplicación de técnicas de alta precisión en el estudio de otras plagas de artrópodos y sus respuestas a factores de estrés ambiental.

Los conocimientos obtenidos tienen implicaciones teóricas y prácticas, al contribuir a estrategias de control más efectivas para este parásito que afecta a las colonias de abejas. La investigación futura podría enfocarse en explorar reacciones fototóxicas en especímenes de *Varroa* expuestos a químicos, optimizando las dosis de irradiación UVA para una mayor efectividad, evaluando el impacto sostenido tras la exposición y ampliando el estudio a una gama más amplia de condiciones ambientales.

En resumen, la combinación de estos estudios proporciona una visión integral sobre las posibles estrategias de control del ácaro *Varroa destructor*, subrayando tanto los avances logrados como las áreas que requieren más investigación y desarrollo, asimismo la medición de los efectos de los estímulos vibratoriales y de luz UV mediante técnicas Interferometría Holográfica Digital permite el monitoreo en tiempo real de estos efectos, así como la medición en varios puntos del cuerpo del ácaro con métodos no destructivos lo que dio lugar a nuevas aplicaciones que abren posibilidades de investigación a futuro. .

Bibliografía

- [1] Miranda Farouk, J Kevin Palemra y Andrea Kevin Sepúlveda Cano. “Abejas”. En: *InfoZoa: Boletín de zoología* (2014).
- [2] J M Tapia-González, G Alcazar-Oceguera, J O Macías-Macías, F Contreras-Escareño, J C Tapia-Rivera, T Petukhova y E Guzmán-Novoa. “Varroasis en abejas melíferas en diferentes condiciones ambientales y regionales de Jalisco”. En: *Ecosistemas y recursos agropecuarios* 6.17 (2019), México.
- [3] Diego Armando Masaquiza Moposita, Lino Miguel Curbelo, Byron Leoncio Díaz Monroy y Amílcar Arenal Cruz. “Varroasis y mecanismos de defensa de la abeja melífera (*Apis mellifera*)”. En: *Revista de Producción Animal* 31.3 (2019), págs. 76-87.
- [4] C Santana y B Valladares-Carranza. “Varroasis: enfoque ambiental y económico. Una revisión”. En: *Honeybees Life* ().
- [5] A P Maldonado-González, L E Tenorio-Beltrán, Y I Vázquez-Romero, M A Villalobos-Rodríguez, V Velázquez-Ordóñez, C Ortega-Santana y B Valladares-Carranza. “Varroasis: enfoque ambiental y económico. Una revisión”. En: *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria* 18.9 (2017).
- [6] E Genersch. “Honey bee pathology: current threats to honey bees and beekeeping”. En: *Applied microbiology and biotechnology* (2010).

-
- [7] O Yáñez-Ordóñez, T Ortega y J Llorente Bousquets. “Patrones de distribución de las especies de la tribu Meliponini (Hymenoptera: Apoidea: Apidae) en México”. En: *Interciencia* 33.1 (2008).
- [8] Hannelie Human et al. “Miscellaneous standard methods for *Apis mellifera* research”. En: *Journal of Apicultural Research* 52.4 (2013).
- [9] Martínez-Cesáreo Marcelino et al. “Presence of *Varroa destructor*, *Nosema apis*, and *Acarapis woodi*, in honey bee (*Apis mellifera*) of the east region in the State of Mexico”. En: *Abanico Veterinario* 6.2 (2016).
- [10] Gallo y al. *Entomología Agrícola*. Ceres, 2002.
- [11] F de M PEREIRA, M T do R LOPES, R C R de CAMARGO y S L de VILELA. *Sistema de Produção de Mel*. Embrapa Meio-Norte, 2003.
- [12] E Botta, H Carmenate y P E de la Torre. “Varroasis, peligrosa enfermedad de la abeja melífera”. En: *Fitosanidad* 8.1 (2004).
- [13] Uc Várguezm Alberto y Ana Ramos-Díaz. “Principales problemas sanitarios y errores comunes en la producción de la miel de abeja (*Apis mellifera*)”. En: *Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco AC., Unidad Sureste* (2016).
- [14] Comité Estatal de Fomento y Protección Pecuaria de Chihuahua A.C. *Campaña contra la Varroasis de abejas*. s.n., 2005.
- [15] Frank D Rinkevich. “Detection of amitraz resistance and reduced treatment efficacy in the *Varroa* Mite, *Varroa destructor*, within commercial beekeeping operations”. En: *PloS one* 15.1 (2020), e0227264.

- [16] Rafael A Calderón-Fallas y Luis A Sánchez-Chaves. “Revisión sobre la presencia del Pequeño Escarabajo de la Colmena, *Aethina tumida* (Coleoptera: Nitidulidae) infestando colonias de abejas nativas sin aguijón (Apidae: Meliponini)”. En: *Vol. 41* (2023), págs. 2215-450.
- [17] Carlos Aurelio Medina Flores. *Principales enfermedades que afectan a las abejas melíferas (Apis mellifera)*. Universidad Autónoma de Zacatecas, 2014.
- [18] José María Tapia-González, Gustavo Alcazar-Oceguera, José Octavio Macías-Macías, Francisca Contreras-Escareño, José Carlos Tapia-Rivera, Tatiana Petukhova y Ernesto Guzmán-Novoa. “Varroosis en abejas melíferas en diferentes condiciones ambientales y regionales de Jalisco, México”. En: *Ecosistemas y recursos agropecuarios* 6.17 (2019), págs. 243-251.
- [19] J H Reyna Fuentes, J C Martínez González y A Silva Contreras. “Efecto de tres moliendas vegetales contra el ácaro *Varroa destructor* en colonias de *Apis mellifera*”. En: *Nova scientia* 14.28 (2022).
- [20] Augusto Beléndez et al. “Thomas Young y la naturaleza ondulatoria de la luz”. En: (2015).
- [21] María del Socorro Hernández-Montes, Fernando Mendoza Santoyo y Carlos Pérez-López. “HOLOGRAFÍA DIGITAL PULSADA APLICADA A LA DETECCIÓN DE IN-HOMOGENEIDADES EN MATERIALES SEMI-SÓLIDOS”. En: ().
- [22] José Luis Silva. “INVESTIGACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES ELÁSTICAS DE LA PIEL USANDO ÓPTICA NO INVASIVA”. En: (2020).
- [23] R. E. D. Bishop. *Vibration*. Cambridge University Press, 1979.
- [24] F. J. Fahy. *Sound and structural vibration: radiation, transmission and response*. Academic Press, 1985.

-
- [25] Glen White. “Introducción al análisis de vibraciones”. En: *Woburn, MA, Estados Unidos: Ázima* 551 (2010), págs. 1990-2010.
- [26] Tatiana Koutchma. *Ultraviolet light in food technology: principles and applications*. CRC press, 2019.
- [27] Carlos Alberto Uribe Zavaleta. “Análisis numérico y experimental del amplificador ultrasónico de un levitador acústico uniaxial”. En: (2023).
- [28] F Nazzi e Y Le Conte. “Ecology of *Varroa destructor*, the major ectoparasite of the western honey bee *Apis mellifera*”. En: *Rev. Entomol* (2012), págs. 417-432.
- [29] Chaxiraxi Coromoto Salazar González et al. “Revisión sobre los efectos del cambio climático en las interacciones planta-polinizador:¿ Qué sabemos y qué nos queda por saber?” En: (2022).
- [30] María Alejandra Maglianesi Sandoz. “Efectos del cambio climático sobre la polinización y la producción agrícola en América Tropical”. En: *Ingeniería* 26.1 (2016), págs. 11-20.
- [31] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens y V. J. Sanders. *Fundamentals of acoustics*. 3rd. John Wiley & Sons, 1982.
- [32] D. D. Reynolds. *Engineering principles of acoustics: noise and vibration*. Allyn & Bacon, 1981.
- [33] F. S. Tse, I. E. Morse y R. T. Hinkle. *Mechanical vibrations: theory and applications*. Allyn & Bacon, 1979.
- [34] Frederick Bueche y Eugene Hecht. *FISICA*. Mc Graw Hill, 2016.
- [35] Rosario Vidal Olarte. “Entendiendo e interpretando las aberraciones ópticas”. En: *Ciencia y tecnología para la salud visual y ocular* 9.2 (2011), págs. 105-122.

-
- [36] Singiresu S Rao, David Sepúlveda García, Ricardo Rodríguez Figueroa y Gabriela del Valle Díaz Muñoz. *Vibraciones mecánicas*. Vol. 776. Pearson educación, 2012.
- [37] Rodrigo B Onofre, David M Gadoury, Arne Stensvand, Andrew Bierman, Mark Rea y Natalia A Peres. “Use of ultraviolet light to suppress powdery mildew in strawberry fruit production fields”. En: *Plant Disease* 105.9 (2021), págs. 2402-2409.