



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SECCIÓN DE BIOELECTRÓNICA

Sistema de seguimiento del movimiento de larvas de escarabajo por medio
de sensores magnéticos ante estímulos eléctricos y sonoros

Tesis que presenta

Aarón Andrés Santana Hernández

Para obtener el grado de
Maestro en ciencias en la especialidad de

Ingeniería Eléctrica

Director de la Tesis:

Dr. Arturo Minor Martínez

Ciudad de México

Noviembre 2022

Agradecimientos

Al centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV del IPN) por el honor de permitirme formar parte de esta institución, justo en la sección a la que aspiraba pertenecer.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su financiamiento económico, el cual me permitió llevar a cabo mis estudios de maestría, pues fue un aliciente invaluable.

A mi asesor de Tesis y mentor, el Dr. Arturo Minor Martínez, quien me abrió las puertas de su laboratorio, confió en mí y confió en mi capacidad de consolidar este y otros trabajos que me permitieron desarrollar mi potencial, sin mencionar las amplias facilidades materiales, así como de los bastos consejos que atesoraré siempre.

Al Dr. Arturo Vera Hernández por su comprensión, amabilidad y humanidad en momentos críticos de mi transcurso en el posgrado.

A los profesores Adrián Castañeda, Brenda Robles, Arturo Minor, Daniel Lorias, Carlos Alvarado, Arturo Vera, Pablo Hernández, Eladio Pérez, Rafael Urrutia y Lorenzo Lieja por todos los conocimientos brindados de los que estoy seguro me serán de gran utilidad en mi trayecto profesional.

A las secretarías Patricia Peña y Mariana Falmoir, por su grato servicio y toda la ayuda brindada durante mi estancia.

Al personal técnico Irwin Rosales, José Rosas y Don Humberto quienes me brindaron su servicio de forma amable y diligentemente en los momentos precisos de este proyecto, sin mencionar los consejos y observaciones que formaron parte importante de este trabajo.

A mis camaradas de laboratorio, Abraham Hernández, Ramón Cortina, Erick Nandayapa, José Rebollar, Salvador Montoya, Dalia Méndez, Juan Mota, Michel Zamudio, Perla Jimarez e Iván Tlacaélel, con quienes viví desde las más gratas experiencias, hasta los más grandes desastres, con quienes reí, discutí, debatí; aquellos que me enseñaron y me aconsejaron a lo largo de este trabajo y de los que siento un profundo aprecio, respeto y admiración.

A mis compañeros de generación Daniela Ávila, Jannette Magaña, Ramón Cortina, Oscar Aguilar, David Coello, Irari Jiménez, Laura Flores y Ángel Medellín, por su apoyo en el gran reto de que fue la maestría en épocas de pandemia.

Por último, pero no menos importante a quienes más les debo y sin quienes nada de esto hubiera sido posible, le agradezco a mi familia, a mi padre Andrés Santana Carvajal, a mi madre Dalila Hernández y a mi hermano Ezequiel Santana.

Contenido

Agradecimientos	i
Contenido	ii
Lista de figuras	iv
Lista de tablas	vii
Resumen	viii
Abstract.....	ix
1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Objetivo General.....	4
1.2.1 Objetivos particulares.....	4
1.3 Estructura de la tesis	5
2 Antecedentes y estado del arte.....	6
2.1 Los insectos plaga.....	6
2.1.1 Los tipos de plaga según el tipo de daño que causan.....	6
2.2 Las plagas en México	8
2.3 Larvas de escarabajo de la subfamilia <i>Melolonthidae</i>	8
2.3.1 La tierra, medio de desarrollo de la gallina ciega	10
2.4 Métodos de marcaje de insectos	11
2.4.1 Marcadores visualmente detectables.....	11
2.4.2 Marcadores ocultos	12
2.4.3 Seguimiento de larvas de escarabajo ocultas bajo tierra	13
2.5 Características del instrumento de seguimiento de etiquetas magnéticas propuesto.....	15
2.5.1 Sensores magnéticos	15
2.5.2 Características de la etiqueta magnética seleccionada	19
2.6 El manejo integral de plagas y los métodos de control de larvas subterráneas	22
2.6.1 Métodos químicos de control de larvas de escarabajo	24
2.6.2 Métodos físicos de control de plagas subterráneas	24
3 Desarrollo	27
3.1 Sistema propuesto.....	28
3.2 Diseño electrónico	30
3.2.1 Selección del sensor propicio.....	30
3.2.2 Distribución de los sensores en celdas montables.....	33
3.2.3 Diseño de las pistas y asignación de direcciones de multiplexado por hardware ...	34

3.3	Sistema de estimulación eléctrica y sonora	37
3.3.1	Etapa de acondicionamiento	39
3.3.2	Etapa de preamplificación.....	40
3.3.3	Etapa de medición de frecuencia y amplitud	40
3.3.4	Etapa de amplificación.....	41
3.4	El microcontrolador y procesamiento de los datos.....	43
3.5	Recolección de larvas de escarabajo y adaptación de estas a condiciones de laboratorio.	46
3.6	Especies vegetales utilizados.....	50
3.7	Marcado de las larvas de la subfamilia <i>Melolonthinae</i>	51
4	Pruebas.....	52
4.1	Caracterización de los imanes	52
4.2	Precisión del posicionamiento de la marca magnética	55
5	Resultados.....	57
5.1	Supervivencia de las larvas de escarabajo y adherencia de la marca magnética.....	57
5.2	Estimulación eléctrica y sonora en larvas no marcadas con imanes	58
5.3	Estimulación eléctrica y sonora en larvas marcadas con imanes	59
5.4	Seguimiento de la larva ante estímulos intermitentes.....	60
6	Discusión	63
7	Conclusiones y perspectivas	65
8	Referencias	67
	Apendices	72
	Apéndice A. Variables y gráficas para el cálculo del producto de la energía estática de un imán N35.....	72
	Apéndice B. Medidas y pesos de las larvas colectadas.....	74
	Apéndice C. Fórmulas y nomenclatura de los componentes del campo magnético	75
	Apéndice D. Programa de adquisición de los datos del microcontrolador	77
	Apéndice E. Programa de interfaz gráfica del mapa de intensidades magnéticas	1
	Apéndice F. Programa de procesamiento del mapa de intensidades de campo magnético	2

Lista de figuras

Fig. 1 Esquema de las áreas de delimitadas por el nivel de impacto económico (EIL) y el umbral económico (ET) en función de la proliferación de una plaga sobre la que se ejerce un control, basado en [22].	6
Fig. 2 Larva de la subfamilia <i>Melolonthidae</i> .	9
Fig. 3 Rango de sensibilidad de los sensores magnéticos considerados, adaptado de [68].	16
Fig. 4 Movimiento de la carga por el efecto magnetorresistivo, a) influencia de la fuerza de Lorentz en la longitud del camino actual; (b) las trayectorias de corriente y las líneas equipotenciales en una placa rectangular conductora en ausencia de campo magnético externo; (c) las mismas líneas en ausencia del campo externo después, adaptado de [70].	18
Fig. 5. Producto de energía estática máxima de distintos tipos de imanes permanentes y periodos en los que fueron optimizados debido a su relevancia comercial, adaptado de [72].	20
Fig. 6 Dependencia de la temperatura de (BH)max para la mayoría de los imanes permanentes comerciales. El valor entre paréntesis indica el (BH)max a 25°C, adaptado de [75].	21
Fig. 7 Acciones de prioridad en un manejo integral de plagas.	22
Fig. 8 Diagrama de los sistemas desarrollados para el monitoreo y aturdimiento de las larvas SM.	28
Fig. 9 Patrón de intensidad esperado al acercarse un imán IP sobre una matriz de sensores magnéticos de forma que el flujo magnético sea paralelo a la matriz.	29
Fig. 10 Patrones de intensidad esperados al acercarse un imán IP sobre una matriz de sensores magnéticos de forma que el flujo magnético sea perpendicular a alguno de los polos magnéticos.	30
Fig. 11 Diagrama de bloques del sensor QMC5883L de la empresa QST, fuente: [94].	31
Fig. 12 Módulo GY-273 y los puertos de conexión que se usarán en este proyecto.	32
Fig. 13 Dimensiones de los imanes de neodimio N35 utilizados como marcadores en el seguimiento de larvas SM.	32
Fig 14 Comunicación entre dos placas-celda como sistema de expansión de matrices de sensores magnéticos.	33
Fig. 15 Pistas del circuito impreso de una placa-celda de 4x4 sensores que componen la matriz y las respectivas placas correspondientes a) Bottom, b) Top y Bottom, c) Top.	34
Fig. 16 Direcciones disponibles para el multiplexor I ² C TCA9548A configurables al conectar los pines 1,2 y 21 a Vcc (1) o a tierra (0).	35
Fig. 17 Diagrama y distribución de los multiplexores en sus respectivas posiciones dentro de la matriz.	36

Fig. 18 Matriz de sensores en su recubrimiento impreso en 3D.....	37
Fig. 19 Módulo generador de ondas controlado por el CI XR2206 con las resistencias variables para controlar la amplitud y la frecuencia de las funciones generadas de manera tenue y abrupta.	38
Fig. 20 Diagrama de bloques del sistema de estimulación de las larvas de escarabajo y del cálculo de los parámetros de la señal de estimulación.....	38
Fig. 21 conversor de fuente simple a simétrica	39
Fig. 22 Diagrama de la etapa de acondicionamiento de la señal.....	39
Fig. 23 Diagrama de la etapa de preamplificación del generador de funciones de $5V_{pp}$ a $18 V_{pp}$	40
Fig. 24 Diagrama de la etapa de medición de frecuencia y amplitud.....	41
Fig. 25 Diagrama de la etapa de amplificación	41
Fig. 26 Modelo 3D de la placa que comunica las etapas de acondicionamiento, preamplificación y de comunicación con el microcontrolador.....	42
Fig. 27 Sistema de generador y amplificador de ondas y de comunicación de la matriz de sensores magnéticos con el microcontrolador	42
Fig. 28 Microcontrolador ATmega328P [96].....	43
Fig. 29 Diagrama del flujo de procesamiento de las señales de los sensores y del sistema de estimulación eléctrica y sonora.	45
Fig. 30 Estimación de la posición del imán de acuerdo a la ubicación del sensor que detecta el valor de flujo magnético máximo (a), mínimo (b) o tanto mínimo como máximo (c).....	46
Fig. 31 Sitio de colecta de las larvas de escarabajo. a) Ubicación geográfica del recinto de muestreo “Viveros de Coyoacán”, b) Zona específica de muestreo “Jardín biocultural”, c) Algunos ejemplares muestreados d) Lugar en donde se reportó una alta presencia de larvas de escarabajo y designado para la recolección para no dañar a los cultivos	47
Fig. 32 Dimensiones y proporción de elementos recomendados para el traslado de escarabajos.....	48
Fig. 33 Sistema de control de temperatura y luminosidad mediante el módulo de control de temperatura WI-209 y una bombilla de 250W.	49
Fig. 34 Higrómetro de tierra “Soil tester” en funcionamiento para el control de humedad del terrario de crianza de larvas de escarabajos.....	49
Fig. 35 a) Terrarios de experimentación (izquierda) y de cría de larvas (derecha) b) Dimensiones de las bases móviles para ajustar la posición del terrario.	50
Fig. 36 Posición en la que se adhirió el imán de neodimio en el noveno segmento de las larvas con las que se experimentó.....	51
Fig. 37 Dimensiones relevantes para el cálculo del flujo magnético a una distancia z.....	52

Fig. 38 Respuesta de los sensores QMC5883L al imán N35 seleccionado a diferentes alturas (1 cm -15 cm).....	53
Fig. 39 Valores de los componentes vectoriales del campo magnético terrestre ubicado en la sección de bioelectrónica del CINVESTAV Zacatenco, adaptado de [103].	54
Fig. 40 Determinación de la posición de marcas magnéticas con ayuda de impresora 3D, en la figura de la derecha se muestra el sistema y en el de la izquierda al extrusor con el imán adherido.....	55
Fig. 41 Posiciones de las intensidades de flujo magnético captadas por la matriz al acercarle un imán de neodimio adherido al extrusor de la impresora 3D de la marca Creality modelo Ender 5 a 7cm de distancia.....	56
Fig. 42 Perspectivas ventral, dorsal y lateral del escarabajo criado en el laboratorio 5, del que se presume pertenece al género <i>Phyllophaga</i>	57
Fig. 43 Ubicación de 3 larvas de escarabajo tras la estimulación sónica a frecuencias de 20 Hz a 1000 Hz.	58
Fig. 44 Larva SM siendo aturdida eléctricamente a 1 cm del electrodo, emergiendo a 48.5 VRMS (16 mA) y volviendo a enterrarse a 9.59 VRMS (5.77 mA)	59
Fig. 45 Monitoreo del movimiento de una larva de escarabajo tras ser aturdida con electricidad. a) momento antes de la aplicación de corriente eléctrica, b) momento en el que la larva se aleja del área de estimulación eléctrica, c) momento en el que es movido el terrario 3 cm para poder volver a detectar a la larva de escarabajo con claridad.	60
Fig. 46 Desplazamiento de una larva tras estimulación sonora a) a 60 Hz, b) a 70 Hz después de 2 minutos. El punto blanco indica la posición de la última toma c) a 217 Hz, después de 4 horas y 29 minutos de constante estimulación sonora. La bocina se posicionó a 19 cm de ambos lados de la parte corta como se simboliza.	60
Fig. 47 Trayectoria de la larva SM al ser estimulada eléctricamente a) periodo de adaptación, sin corriente b) se aplican 90 V a 116 Hz, la larva se retira de la fuente de alimento. El punto blanco indica la última posición hasta ese conjunto de tomas c) se apaga la corriente y se retiran los electrodos, la larva regresa a la plántula.	61
Fig. 48 Trayectoria de la larva SM al ser estimulada eléctricamente en presencia de una planta de patata de la cual uno de sus tallos fue conectado directamente al neutro del sistema de estimulación a) periodo de establecimiento, sin corriente b) se aplican 100 V a 60 Hz, la larva se retira de la fuente de alimento, el punto blanco indica la última posición hasta ese conjunto de tomas c) se apaga la corriente y se retiran los electrodos, la larva regresa a la plántula.....	61

Lista de tablas

Tabla 1. Precio optimo por rendimiento métrico para imanes permanentes, adaptado de [72].....	20
Tabla 2. Propiedades magnéticas del imán seleccionado, adaptado de [95]	33
Tabla 3. Intensidad del flujo magnético calculado, medido y el error estándar de la media de 30 repeticiones	53
Tabla 4. Desviación de la posición del objetivo a diferentes alturas (cm)	56

Resumen

Las plagas subterráneas, como las larvas de los escarabajos de la subfamilia Melolonthidae (SM), pueden causar serios daños en los cultivos que invaden, y suelen ser difíciles de detectar y de tratar. El abuso de pesticidas para el control de plagas subterráneas es visto como peligroso e ineficaz. Al respecto, han sido planteados métodos experimentales de marcado y monitoreo que buscan dar explicaciones y sacar conclusiones sobre la actividad de los insectos subterráneos.

El marcaje de plagas subterráneas como las SM busca dar pie al desarrollo de métodos experimentales de etapas clave en el manejo, el monitoreo y la identificación de plagas. En este trabajo se propone un método de marcaje y seguimiento de larvas SM con el que se pueda detectar la posición de estas bajo tierra, empleando imanes de neodimio adecuados para el propósito y sensores magnéticos de alta sensibilidad con los cuales se puedan obtener respuestas en corto tiempo y que puedan permanecer en funcionamiento durante tiempos prolongados.

Para determinar la reacción de las larvas SM ante estímulos de manera repetible y controlada, se estimuló eléctrica y sónicamente a estos insectos, con lo que se obtuvieron registros de cómo el instrumento de localización magnética pudo determinar las reacciones de evasión ante estímulos eléctricos y atracción ante la introducción de plántulas de maíz (*Zea mays*) y papa (*Solanum tuberosum*), concluyendo en que es viable marcar larvas SM así como monitorear el movimiento de estas a profundidades de hasta 15 cm bajo tierra con etiquetas que no emiten radiación, son económicas y de fácil adquisición.

Abstract

Subterranean pests, such as the larvae of beetles from the subfamily Melolonthidae (SM), can wreak serious havoc on the crops they invade, and are often difficult to detect and treat. The abuse of pesticides to control subterranean pests is seen as dangerous and ineffective. In this regard, experimental marking and monitoring methods have been proposed that seek to provide findings and draw conclusions about the activity of underground insects.

The marking of subterranean pests as SM seeks to give rise to the development of experimental methods of key stages in the management, monitoring and identification of pests. In this work, a method for marking and tracking SM larvae is proposed with which their position underground can be detected, using neodymium magnets suitable for the purpose and high-sensitivity magnetic sensors with which responses can be obtained in short time and that can remain in operation for long periods of time. To determine the reaction of the SM larvae to stimuli in a repeatable and controlled manner, these insects were electrically and sonically stimulated, with which records were obtained of how the magnetic localization instrument was able to determine the evasion reactions to electrical stimuli and attraction to the introduction of maize (*Zea mays*) and potato (*Solanum tuberosum*) seedlings, concluding that it is feasible to mark and SM larvae as well as monitor their movement at depths of up to 15 cm underground with labels that do not emit radiation and are affordable and easily acquired.

1 Introducción

La estrecha relación entre los insectos herbívoros, la producción agrícola y la seguridad alimentaria han llevado a clasificar una gran variedad de insectos como plagas, adquiriendo especial importancia cuando rebasan el parámetro conocido como umbral de daño económico [1]. Dichos insectos plaga se suelen agrupar dependiendo del tejido afectado y del nivel de daño que provocan, pudiendo ser consumidores de tejido, obstruores de la tasa fotosintética, asimiladores de nutrientes, reductores de turgencia, plagas mayores, esporádicas, potenciales etc. [1, 2].

Las plagas subterráneas son de particular interés para agrónomos y la comunidad científica debido a lo difícil que puede resultar su monitoreo y control, tomando en cuenta las características tan diversas y dinámicas del suelo. Un ejemplo de este tipo de plagas, es la gallina ciega, un grupo de larvas de escarabajo de la subfamilia *Melolonthidae* (SM) considerado como plaga esporádica consumidora de tejidos y reductora de turgencia cuyos hábitos rizófagos (que se alimentan principalmente de las raíces de las plantas), están ligados a la pérdida de diversos cultivos producidos en México, como el maíz, frijol, papa, entre otras hortalizas [3, 4].

Los métodos convencionales de monitoreo y eliminación de plagas suelen involucrar la inspección radicular de los cultivos y la administración de cantidades adicionales de pesticidas a las utilizadas en las partes superficiales de las plantas, lo cual resulta perjudicial para la inocuidad de los productos agrícolas, para el medio y la seguridad alimentaria [5].

1.1 Planteamiento del problema

Los métodos de monitoreo de larvas de escarabajo como es el caso del grupo rizófago de las larvas SM denominado “gallinas ciegas”, se han diversificado con tasas de éxito variables. Desde los métodos de marcaje con etiquetas de identificación hasta la interpretación de imágenes tridimensionales de tomografía computacional, el éxito en el marcaje y seguimiento de insectos suele depender fuertemente de factores como la elección del método idóneo tanto para la especie a marcar, como para el ambiente en el que el insecto se encuentra, así como la naturaleza del experimento [6].

Al habitar en el suelo las larvas SM, sacrifican el ágil movimiento que poseen los insectos superficiales a cambio de un medio opaco y de particular complejidad al que es difícil acceder

para muchos depredadores, tal como el ser humano [7]. Los depredadores que son naturalmente capaces de localizar a estos insectos como lo son ciertas aves, se valen de los movimientos de la tierra que ocasionan cuando las larvas se aproximan a la superficie [8].

Siguiendo un principio similar al que usan dichos depredadores, han sido propuestos métodos de monitoreo de las larvas SM, a partir del sonido que producen, llamado estridulación (ruido producido por los órganos maxilo-mandibulares, llamados órganos estridulatorios). Al respecto, autores como Gorres *et al.* (2019), Markin *et al.* (2021) y Wang *et al.* (2021) han implementado instrumentos y algoritmos de monitoreo acústico con los que han conseguido detectar sonidos distintivos de larvas de escarabajos de diferentes especies (*Melolontha melolontha*, *M. hippocastani*, *Rhynchophorus ferrugineus* y *Sitophilus oryzae*) en diversos medios como almacenes de granos, al interior de plantas y bajo el suelo, obteniéndose buenos resultados a corta distancia, que abarca hasta un par de docenas de centímetros, dependiendo del medio en el que se pruebe, sin embargo, resulta impráctico en muestreos extensos o con una gran interferencia sonora [9-11].

Con objetivos similares, se ha logrado conocer la trayectoria de larvas de escarabajo incluso con más detalle utilizando tomografía computarizada de rayos X 3D, con gran detalle en el ambiente que rodea al insecto, incluyendo el crecimiento de las raíces secundarias como es reportado por Booth *et al.* (2020). Sin embargo, nuevamente, el espacio limitado de análisis (545 cm³) y en este caso el riesgo que implica el uso de herramientas que emiten radiación ionizante lo que es dañino para el usuario y puede interferir en el análisis de la conducta del insecto [12].

Un método viable para la inspección en espacios más amplios, es el que fue propuesto por Booth *et al.* (2017), el cual, por medio de la inductividad electromagnética proveniente de anillos de cobre atados entre las patas de especímenes larvarios de *M. melolontha*, empleando un detector de metales, con lo que se consiguió monitorear la respuesta de estos insectos por largos periodos de tiempo. Con ello, se concluyó que estas larvas en particular, prefieren cultivos de diente de león (*Taraxacum officinale*) cuando no producen éster de β -D-glucopiranosilo del ácido taraxínico (un repelente natural propio de la planta) a menos de que la planta se encuentre a una corta distancia, implicando que *M. melolontha* suele preferir alimentarse de la fuente más cercana sin importar que esta pueda ejercer un efecto tóxico [13].

Así como han sido planteados métodos de monitoreo, las prácticas de control químico de plagas subterráneas también han evolucionado, pues las normas que limitan el impacto ambiental y los riesgos a la salud pública ahora castigan a los pesticidas vinculados a enfermedades y afecciones medioambientales, generando una oportunidad para métodos alternativos de control de plagas. Tal es el caso de los métodos físicos de control de plagas, los cuales se valen de la aplicación de energía al medio, sea térmica, neumática, eléctrica e incluso vibracional. Con ello se persigue aturdir, alejar o eliminar a una plaga localizada.

Ejemplos de este tipo de prácticas realizadas en escarabajos en sus diferentes etapas incluyen la inducción de corriente alterna y directa a árboles de palma (*Phoenix canariensis* y *Phoenix dactylifera*) que se encontraban infestados de larvas del escarabajo picudo rojo (*Rhynchophorus ferrugineus*) alcanzando hasta un 99% de la mortalidad de las larvas invasoras, pero con un 16.7% de la mortalidad de las palmas, con voltajes de 15 a 240 voltios enclavando electrodos de 5 a 20 cm en estas [14, 15].

También se ha explorado el uso de descargas eléctricas en almacenes de granos por Matsuda *et al.* (2018), consiguiendo no solo la inactivación de los insectos (*Sitophilus oryzae*), sino que a su vez pudiendo ser una herramienta de detección al calcular las diferencias de conductividad cuando la corriente pasa a través de los insectos [16].

Por otro lado, se han probado los efectos acústicos sobre el comportamiento de varios escarabajos (*Tribolium castaneum*, *Leptinotarsa decemlineata*, *Dendroctonus frontalis*, *D. brevicomis*, *D. ponderosae*) consiguiendo desde una leve desviación de una ruta preestablecida, hasta la muerte de un porcentaje significativo de las larvas, deformaciones en su desarrollo [17], así como una ovoposición deficiente y una tasa de reproducción disminuida [18].

La diversidad de vías con las que se busca mantener bajo control a las plagas subterráneas evidencia la necesidad de métodos seguros de control de plagas para el ambiente y para el aseguramiento de la calidad de los alimentos, así como de métodos eficientes que permitan la observación segura de la etología de estos animales para dar con conclusiones acerca de sus hábitos alimenticios y de la repulsión ante estímulos físicos, químicos o biológicos.

1.2 Objetivo General

Registrar la respuesta de larvas de escarabajos de la subfamilia Melolonthidae utilizando imanes como marcadores entomológicos y sensores magnéticos para detectar su trayectoria, así como evaluar la respuesta de dichas larvas ante estimulación eléctrica y sonora cuando estas se alimentan de cultivos de maíz (*Zea mays*) y papa (*Solanum tuberosum* L).

1.2.1 Objetivos particulares

Diseñar un instrumento sensible a campos magnéticos capaz de detectar los cambios de posición de un marcador (imán) que pueda ser adherido a larvas de escarabajo, que pueda ser enterrado bajo tierra y del que se puedan obtener registros constantes durante largos periodos de tiempo.

Definir la mejor forma de montar el marcador al espécimen larvario para poder visualizar su movimiento sin la necesidad de interrumpir su trayecto.

Establecer el ambiente propicio para que las larvas SM colectadas puedan permanecer bajo el menor estrés posible.

Determinar los umbrales de estrés eléctrico y sonoro que pudiesen provocar la repulsión de los sujetos de prueba.

Determinar la respuesta de diferentes tratamientos de estrés en la interacción de los sujetos de prueba mientras se alimentan de las raíces de maíz y papa.

1.3 Estructura de la tesis

Capítulo 1: En este capítulo, se presenta el resumen del proyecto, con una pequeña introducción acerca de las plagas subterráneas y los acercamientos que existen hacia el monitoreo y control de estas mediante métodos sónicos y eléctricos. Se expone el planteamiento del problema y se define los objetivos generales y particulares.

Capítulo 2: Se plasman los antecedentes y estado del arte, donde se expone el estudio del marcaje de la larvas de escarabajo, así como se define a las larvas de la subfamilia *Melolonthidae* como objeto de estudio por su relevancia en las actividades agrícolas en varias partes del mundo, en particular, México, las clasificaciones de los métodos de marcado y cómo los métodos de seguimiento de insectos subterráneos ha adquirido importancia por el difícil monitoreo de estas por métodos convencionales; además se manifiestan los avances en los métodos de control físico como alternativas a pesticidas que pudieran poner en riesgo al ambiente y a la salud pública.

Capítulo 3: Se explica el desarrollo y construcción del sistema de seguimiento magnético propuesto, incluyendo las fórmulas, circuitos y deducciones usadas.

Capítulo 4: Se describen las pruebas realizadas para la validación del sistema, indicando los aparatos de medición empleados, los valores y resultados obtenidos, y el método empleado.

Capítulo 5: Se presentan las conclusiones para el trabajo realizado y las perspectivas propuestas para trabajos posteriores. Finalmente se incluyen las referencias empleadas y los apéndices en los que se encuentran los programas y diagramas eléctricos desarrollados en el proyecto.

Capítulo 6: Se contrastan los resultados obtenidos por otros autores con los obtenidos en este trabajo y se discute la aplicación y el alcance que el instrumento diseñado pudiese tener.

Capítulo 7: Se comparan los objetivos con los resultados obtenidos y se proponen las perspectivas que en un futuro pudieran aportar información útil para la finalidad del proyecto.

2 Antecedentes y estado del arte

2.1 Los insectos plaga

Un insecto plaga, es aquel cuya presencia en cultivos y productos de consumo humano consigue alcanzar o rebasar el denominado nivel de daño económico o EIL (Economic Injury Level) [19]. Dicho nivel que en la actualidad se mide con base al beneficio sobre el costo de controlar la población de una plaga con respecto al pérdida de la producción infringida, como se señala en a figura 1. En este punto incremento en la población de la especie plaga excede el margen en el que resulta rentable ejercerse un control, denominado umbral económico o ET (Economic Threshold) dañando la salud, el confort y la economía de las personas que entran en contacto con la especie plaga [20, 21]. Debido al impacto que pueden llegar a causar estos insectos, se han propuesto diversas clasificaciones tomando en cuenta la especie, el tipo de daño y las partes de la planta que afecta.

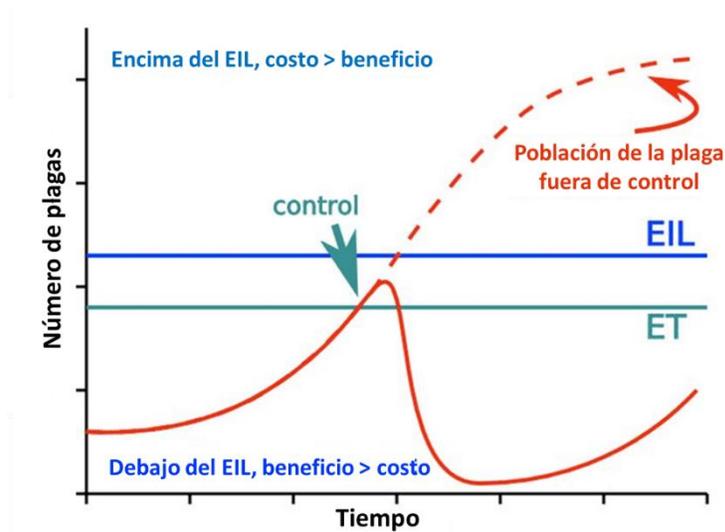


Fig. 1 Esquema de las áreas de delimitadas por el nivel de impacto económico (EIL) y el umbral económico (ET) en función de la proliferación de una plaga sobre la que se ejerce un control, basado en [22].

2.1.1 Los tipos de plaga según el tipo de daño que causan

Aunque suelen tomarse diversas consideraciones para clasificar a una especie dentro de un solo grupo, una forma práctica de agrupar a las plagas es de acuerdo al daño que ocasionan sobre los cultivos.

Bajo este criterio, se encuentran los devastadores de tallos y vástagos, los obstrutores de tasa fotosintética, los aceleradores de la senescencia de las hojas, los asimiladores de nutrientes, los consumidores de tejido y los reductores de turgencia [2, 23].

Por su parte, los devastadores de tallos y vástagos (barrenadores de tallo, gusanos cortadores, termitas y moscas de brotes), ocasionan la pérdida de plantas enteras o los macollos de estas, al reducir el área de la planta, el peso de las hojas y tallos, mermando así el rendimiento de la cosecha [2, 24].

Por otro lado, los reductores de la tasa fotosintética (como los ácaros y trips), reducen la cantidad de radiación fotosintéticamente activa que llega al cultivo incluso sin consumir el tejido. Estos tienen un efecto directo sobre el proceso fotosintético del tejido remanente. Algunas plagas, aunque son consumidores primarios de tejidos o asimiladores de nutrientes, también pueden causar este efecto de manera remota en el tejido adyacente [2, 25].

También se encuentran los aceleradores de la senescencia de las hojas, como las chicharritas (*Delphacodes kuscheli*), los cuales además de ser consumidores de tejido y asimiladores de nutrientes, provocan la abscisión prematura de las hojas y pecíolos, por lo tanto, reducen la captación de la luz y la fotosíntesis. A diferencia de los reductores de la tasa fotosintética, estos insectos plaga ocasionan la reducción de la fotosíntesis del cultivo en mayor medida por la disminución del índice de área foliar que por su efecto sobre la fotosíntesis de una sola hoja [2, 26].

Se considera como asimiladores de nutrientes aquellos que invaden las células de las plantas huéspedes y consumen los nutrientes de estas desde el citoplasma a través de la membrana plasmática, eliminando así los asimilados solubles de las células vegetales. Los mecanismos de absorción de los nutrientes van desde aquellos que aprovechan los asimilados que contienen carbono y nitrógeno directamente del follaje hasta aquellos que los obtienen directamente del floema de la raíz, dejando a la planta con menos asimilados para su propio crecimiento tisular [2, 25].

En contraste, los consumidores de tejido como son los saltamontes, las larvas de lepidópteros, los minadores de hojas, los barrenadores de nodos y los escarabajos, difieren de los asimiladores de nutrientes en que se alimentan después de que la planta ya ha convertido el asimilado en tejido, implicando para esta un costo metabólico adicional. Los consumidores de tejido pueden

alimentarse de cualquier tipo de parte de la planta, incluidas raíces, tallos, vainas, semillas y hojas [2, 26].

Finalmente, los reductores de turgencia, insectos que se alimentan de las raíces de las plantas como la gallina ciega y los nemátodos, afectan el balance hídrico de las plantas, interrumpiendo el transporte del floema hacia las puntas de las raíces, reduciendo el crecimiento de estas y afectando también el balance de nutrientes y el suplemento energético de las plantas. Estas plagas pueden comenzar como asimiladores de nutrientes y/o consumidores de tejidos, pero además provocan la reducción de la transferencia de agua a través del xilema de la raíz [2, 27].

2.2 Las plagas en México

En México, 137 especies de insectos, en particular artrópodos, han sido clasificadas como plagas, de las cuales distintas empresas paraestatales estiman son potenciales agentes de pérdidas de hasta el 40 % de la producción [28]. Entre las especies de mayor impacto agrícola, se encuentran el pulgón amarillo (*Aulacorthum solani*), la mosquita blanca (*Bemisia argentifolii*), el picudo rojo (*Rhynchophorus ferrugineus*), la araña roja (*Tetranychus sp.*), la gallina ciega (*Phyllophaga spp.*) la mosca de la fruta (*Ceratitis capitata*) y la larva minadora de hojas (diversas especies de lepidópteros, dípteros, coleópteros e himenópteros) [28, 29]. Entre los cultivos que se han visto más vulnerados ante dichas plagas, se encuentran la papa, el tomate, el chile, el maíz, el sorgo e incluso el algodón [29]. En este trabajo se profundizará acerca del grupo “gallina ciega” que es una plaga con presencia en todo el mundo, tanto en climas tropicales como templados y que suele tener preferencia a cultivos de poca rotación y en tierras de alto contenido orgánico.

2.3 Larvas de escarabajo de la subfamilia *Melolonthidae*

El grupo gallina ciega está formado principalmente por la etapa larvaria de una gran diversidad de escarabajos, en su mayoría del género *Phyllophaga*, cuyos integrantes son principalmente especies autóctonas de la subfamilia *Melolonthidae*. Este grupo puede ser clasificado como plaga consumidora de tejido y como reductora de turgencia, debido a los hábitos tróficos que suelen ocasionar daños a las partes subterráneas de cultivos de plantas de raíces fibrosas [3]. La variedad de especies de este grupo varía considerablemente de acuerdo a la localidad, estación

del año y del tipo de cultivo, pudiéndose encontrar individuos del género *Phylophaga*, *Diplotaxis*, *Macroductylus*, *Anomala* y *Cyclocephala* [30, 31]. Todas las larvas SM comparten características típicas, como el color crema y la distintiva forma de C que adoptan cuando se alimentan o descansan, así como una cabeza color marrón en forma de cápsula, un par de piezas bucales masticadoras y tres pares de patas articuladas. La coloración de la parte trasera del abdomen suele transparentar la comida y la tierra que ingiere, por lo que se torna oscura (figura 2). Así mismo, la superficie ventral del último segmento abdominal cuenta con dos filas paralelas de espinas cortas con forma semejante a la de una cremallera. Mayormente, estos insectos alcanzan entre 25 y 58 mm de largo [32].

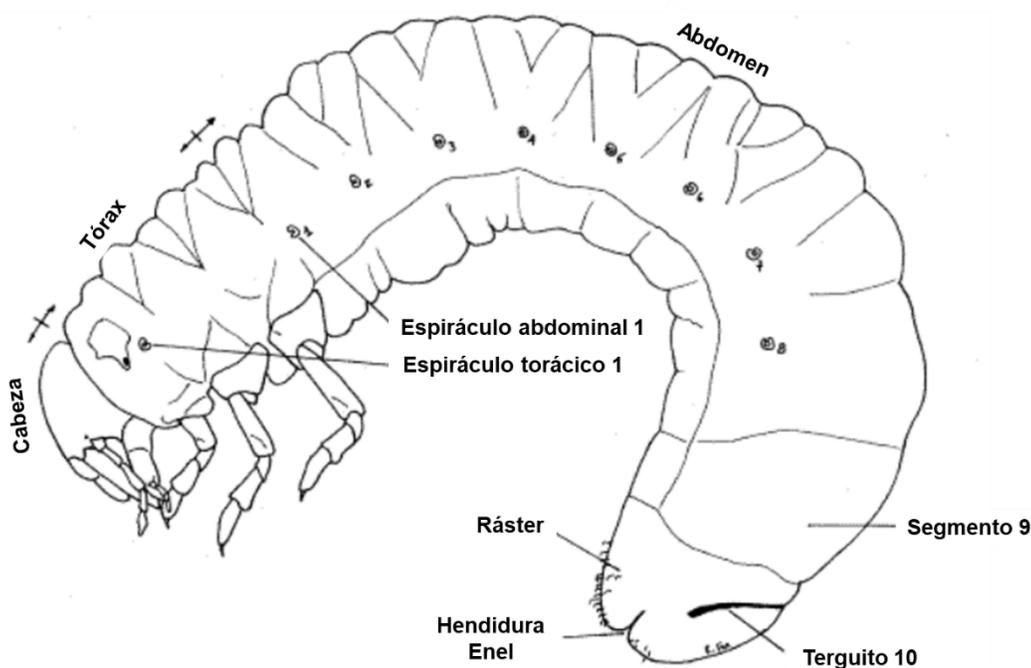


Fig. 2 Larva de la subfamilia *Melolonthidae*.

Entre los cultivos afectados por este grupo se encuentran el maíz (*Zea mays L.*), el sorgo (*Shorgum bicolor L.*), el arroz (*Oryza sativa L.*), el frijol (*Phaseolus vulgaris L.*), el camote (*Ipomoea batatas L.*), el cafeto (*Coffea arábica L.*), y variedad de especies de solanáceas, cucurbitáceas, árboles frutales, pastos, plantas ornamentales y malezas [4].

La distribución geográfica en la que es común encontrar estos insectos abarca desde el sur de Estados Unidos hasta Colombia y Venezuela, mientras que en territorio mexicano, suelen tener

una amplia presencia en los estados de Chiapas, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Sinaloa y Veracruz [28, 33].

2.3.1 La tierra, medio de desarrollo de la gallina ciega

Después del apareamiento, las hembras de escarabajo fecundadas vuelan a áreas de alta vegetación en las que abundan pastos o en su defecto, a campos agrícolas, donde ovipositan tras escarbar a una profundidad de entre 5 y 15 cm, poniendo de 20 hasta 50 huevos durante su vida. Transcurridas aproximadamente 3 semanas las larvas surgen para alimentarse de raíces finas y materia orgánica en ciclos de dos años [32].

Debido a que la principal fuente de alimento de larvas SM son las raíces subterráneas, a menudo no son percatadas hasta que una pérdida importante en el sistema de raíces se vuelve notable, ocasionando la desecación e incluso la muerte de las plantas. Sumado a ello, el control de las larvas SM no suele ser sencillo, ya que es necesario que los insecticidas que se aplican al suelo penetren varias capas del cultivo y del suelo para hacer contacto efectivo con dichas larvas [34].

Es la dificultad de ubicar a esta plaga que se encuentra bajo tierra, así como la incertidumbre de algunos de sus comportamientos lo que ha llevado a llamar crípticos a los hábitos de las larvas SM. Por si fuera poco, la compleja composición química, la variada estructura y el sistema dinámico de la tierra, la convierte en un medio sobre el que resulta un reto realizar estudios cuantitativos [35]. Por ello, resulta meritorio visibilizar el problema por medio de métodos prácticos y ofreciendo soluciones inscritas a prácticas de manejo integral de plagas que limite el impacto de los insectos plaga como lo es el grupo gallina ciega.

Una de las formas de dar seguimiento a los hábitos de las plagas, incluso aquellas que permanecen ocultas o son difíciles de seguir es por medio de métodos de marcado, que pueden ser tanto variados como ingeniosos, y que han demostrado ser útiles en la interpretación de la etología de una gran variedad de insectos que además, es una vía válida para ahondar en el comportamiento y control de plagas de vida subterránea.

2.4 Métodos de marcaje de insectos

El marcaje de insectos se ha utilizado para estudiar el comportamiento, crecimiento, reproducción, esperanza de vida, ecología así como las redes de alimentación de gran variedad de insectos, algunos incluso considerados plagas [36-38].

Para llevar a cabo estos métodos se utilizan materiales y técnicas distintas, como etiquetas, pinturas, tintas ingeribles, polvos teñidos, polvos fluorescentes, polen, isótopos radioactivos, entre otros [39].

Los factores que rodean al objetivo de marcaje son decisivos al momento de la elección del método idóneo, estos dependen de una variedad de aspectos, como son la especie a marcar, el ambiente en el que el insecto se encontrará, si se realizará de manera individual o a un grupo de insectos, así como de la naturaleza del experimento [6]. Por ende, es conveniente conocer los diferentes tipos de marcado, así como sus ventajas y desventajas.

2.4.1 Marcadores visualmente detectables

En este subgrupo de marcadores se encuentran aquellos en los que la marca puede ser observada a simple vista o por métodos convencionales de inspección. Estos incluyen marcas de mutilación, pinturas, tintes, polvos y polen [40].

2.4.1.1 Marcaje por mutilación

El marcaje por mutilación, involucra provocar muescas o grabar marcas distintivas en un insecto para que pueda distinguirse, es de utilidad en individuos grandes o muy esclerotizados, como escarabajos [6, 41, 42]. La principal ventaja de la técnica es que las marcas permanecen a lo largo de la vida del insecto incluso tras la muda de este, sin embargo puede ocasionar el rechazo del insecto por parte de su colonia [6].

2.4.1.2 Marcaje de pinturas y tintas

Las pinturas y tintas se aplican con varios niveles de éxito a insectos haciendo uso de alfileres entomológicos, bolígrafos de punta fina o cepillos de pelo fino. Es una técnica económica y los

especímenes se pueden muestrear repetidamente sin la necesidad de dañar al espécimen en el transcurso de un estudio a largo plazo, pero se limita a una sola etapa de muda a la vez [42]. Idealmente, el colorante utilizado debe ser duradero, no tóxico, fácil de aplicar, de secado rápido, liviano, disponible en varios colores muy visibles y resistente al desprendimiento [39].

2.4.2 Marcadores ocultos

Debido a los hábitos de algunos insectos puede llegar a ser necesario utilizar métodos de rastreo invisibles al ojo humano pero que son reconocibles mediante el uso de técnicas adicionales o de instrumentos sensibles a las marcas propiciadas. La limitación de los métodos de marcado suele deberse al tamaño o delicadeza del insecto, el riesgo que supone el insecto en cuestión o bien, a lo difícil que resulta el acceso al lugar donde habita, ya sea huésped de algún otro insecto, de una planta o bien, se encuentre en el fondo de la tierra.

2.4.2.1 Marcaje por tintes ingeribles

Algunas sustancias solubles en aceite se acumulan en los fluidos o tejidos corporales de los insectos después de que éstos los consumen, consiguiendo un color visible y duradero sin que ocasionen efectos secundarios [43, 44]. Este fenómeno es utilizado como un método de automarcado económico y que requiere un trabajo adicional mínimo [45]. Sin embargo, algunos tintes no son visibles por inspección directa; por lo tanto, los insectos deben ser aplastados en papel filtro [46, 47] o molidos en solvente (por ejemplo, acetona), seguido de una inspección visual o espectroscópica, además, solo unos pocos tintes marcadores de insectos han demostrado ser efectivos, la mayoría son escasamente retenidos en el organismo de los insectos o son dañinos para estos [43, 48].

2.4.2.2 Marcaje con elementos traza

El marcado con elementos traza es la introducción artificial de un elemento escaso en el medio como el rubidio, estroncio, cesio, manganeso, hafnio, iridio samario, europio, disprosio o cerio en el espécimen a marcar [49-51]. Este marcaje se puede llevar a cabo sumergiendo a los

insectos en alguno de estos elementos, rociando partes específicas de sus cuerpos o alimentándolos con dietas artificiales que los contengan [52].

Al llevar a cabo este método de marcado, se debe considerar alcanzar un buen nivel de contraste entre la concentración del isótopo escogido en el insecto y la del medio [53, 54], la relación entre la concentración del elemento aplicado y la cantidad del elemento retenido por el insecto [50], la intensidad y duración de la marca, la cual puede variar dependiendo de la técnica de aplicación del elemento [55, 56] y en función de la fisiología y de los hábitos del insecto [57]. Otras limitaciones de este método incluyen la difícil detección en áreas extensas, su elevado costo, tiempos prolongados de procesamiento, así como el hecho de que las altas concentraciones de elementos traza pueden afectar negativamente el desarrollo de ciertos insectos. Sin embargo, éste método tiene como ventajas que los marcadores elementales no son radiactivos, no se suelen necesitar etiquetas, externas que pudieran alterar el comportamiento o la interacción con otros insectos, son útiles para el marcaje multietápico, multigeneracional y multitrófico, y se encuentran entre los pocos marcadores que son útiles para marcar a los parasitoides que se desarrollan dentro de los huéspedes marcados [58, 59], así como a aquellos insectos que se encuentran en el interior de las plantas en las que se hospedan [60, 61]. Esta técnica junto con otras que se encuentran en la vanguardia del marcaje, sienta las bases del seguimiento de insectos.

2.4.3 Seguimiento de larvas de escarabajo ocultas bajo tierra

Identificar cuando una plaga rizófaga invade un cultivo es decisivo, pues los síntomas de deshidratación como la pérdida de turgencia y el amarillamiento de las hojas a pesar de un riego adecuado, suelen ser fatales para las plantas y es comúnmente tomado como signo de alerta para el resto del sembradío, sin embargo, los métodos convencionales para cerciorarse de esto por lo general son desde altamente dañinos hasta destructivos para el cultivo [5, 62].

La inspección de la tierra alrededor de las plantas infectadas y la remoción de estas desde la raíz suele ser la manera convencional de verificar si una plaga subterránea habita ahí cuando no se cuenta con los conocimientos o instrumentos para percatarse de ello. El riesgo que supone para los cultivos amenazados esta práctica ha incentivado el desarrollo de métodos menos invasivos para el monitoreo y control de un gran número de especies rizófagas, en particular de las larvas de escarabajo.

El seguimiento poco invasivo y no invasivo de este grupo rizófago abarca principalmente técnicas isotópicas, acústicas y radiológicas, aunque, existen propuestas de impacto moderado, pero menos exigentes técnicamente, en las que se emplea desde el marcaje con objetos radioactivos e inductivos hasta la inspección por medio de recipientes de paredes transparentes a desnivel, cajas de Petri e instrumentos de radiofrecuencia [12, 63, 64].

El marcaje isotópico es de gran utilidad para dar seguimiento a los hábitos tróficos de poblaciones enteras de todo tipo de especímenes cuando se alimentan a los insectos de tejido vegetal enriquecido con ^{13}C y ^{15}N , de manera similar al marcaje por elementos traza, se espera una acumulación en el organismo de los insectos marcados lo suficientemente elevada como para que resalte del medio en el que se encuentra y así poder diferenciarlo, aún si este tiene hábitos subterráneos [65].

Por otro lado, el monitoreo acústico de larvas herbívoras, aunque más complejo y sensible a perturbaciones ambientales, suele ser abordado como un método no invasivo debido a la poca o inexistente interacción con el medio, las larvas y los cultivos. Valiéndose de micrófonos, acelerómetros y herramientas de procesamiento de datos, se ha conseguido diferenciar entre los ruidos producidos por larvas de escarabajo, del medio y de otras especies de la superficie a profundidades de entre 3 y 10 cm [66].

Así mismo, la tomografía computarizada de rayos X ha permitido la exploración no solo de las los insectos, sino que la del medio y la del crecimiento de las raíces de las que se alimentan las larvas, ha sido posible, pese a que es un método sumamente costoso y del que solo se pueden obtener imágenes de volúmenes muy limitados, el contraste que se logra entre la tierra, las plantas, las larvas de escarabajo y el espacio que dejan a su paso, aportan información sumamente detallada y de un valor tanto cuantitativo como cualitativo. El inconveniente más severo que presenta esta técnica es que puede afectar a las larvas de escarabajo debido la alta exposición a la radiación, lo que puede modificar el comportamiento de estas [12].

Por otro lado, los métodos de marcado con etiquetas adheribles simplifican muchos de los requisitos técnicos antes señalados y hacen más accesible el uso y la replicación de estas técnicas de seguimiento de insectos subterráneos. Entre ellos se menciona el uso de discos y cables fabricados con elementos radioactivos, como Ra-226, Ta-182 y Co-60 adheridos a larvas de escarabajos subterráneos con pegamento, que si bien, logran el objetivo de ser detectados con instrumentos como contadores Geiger, contadores proporcionales y centelladores, también

presenta todas las desventajas de los marcadores visualmente detectables, así como el riesgo que suponen los elementos radioactivos, pudiendo causar desde la deformación e intoxicación del insecto hasta su aniquilación, sin mencionar el riesgo de contaminación ambiental [42, 67].

De forma menos polémica, se han utilizado marcadores metálicos no radioactivos. Bont et al. (2017) reportan haber adherido con éxito discos de cobre de 105 mg en larvas de *M. Melolontha*, con lo que, se aprovechó la inductividad electromagnética capturada por un detector de metales para poder seguir el movimiento de estas larvas bajo tierra, consiguiendo información referente a la preferencia de las rutas subterráneas de estos insectos en contacto con sustancias repelentes [13].

Estos estudios suelen tener un objetivo en común, el cual es dar la explicación de ciertos hábitos larvales de los escarabajos para determinar la mejor manera en la que abordar el control de estos cuando llegan a ser considerados plaga. De esta forma, el poder conocer acerca de los hábitos de transporte y elección de rutas de dichos insectos se convierte en una herramienta para la protección de los cultivos de estos depredadores.

De forma similar al método de seguimiento de Bont et al. (2017), y del método de marcaje con discos radioactivos, en este trabajo se propone el uso de sensores magnéticos para registrar el movimiento de larvas de escarabajo marcadas con imanes de neodimio, para este propósito fueron considerados los elementos con las características más provechosas para el objetivo de este proyecto, como el tamaño, la sensibilidad y las facilidades de implementación que pudieran ofrecer. Así, la descripción de dichas características se detalla en la siguiente sección.

2.5 Características del instrumento de seguimiento de etiquetas magnéticas propuesto

2.5.1 Sensores magnéticos

Para la selección los sensores utilizados en el instrumento de este proyecto se tomaron en cuenta las propiedades de diversos sensores magnéticos, tomando como factor crucial, el espectro de campo magnético al que son sensibles.

Dado que el rango de medición que se desea obtener de los sensores corresponde al emitido por imanes permanentes de tierras raras, que va de de los 10^{-4} T a los 10 T, es conveniente considerar en la elección a los sensores que cubran este rango o incluso sean más sensibles. Como se puede observar en la figura 3, existen algunos candidatos que resultan interesantes para este fin, como

son los magnetómetros magnetorresistivos anisotrópicos (AMR), los de magneto-impedancia gigante (GMR), los de bobina de búsqueda, los fluxgate y los sensores de efecto hall, a continuación, una breve descripción de estos.

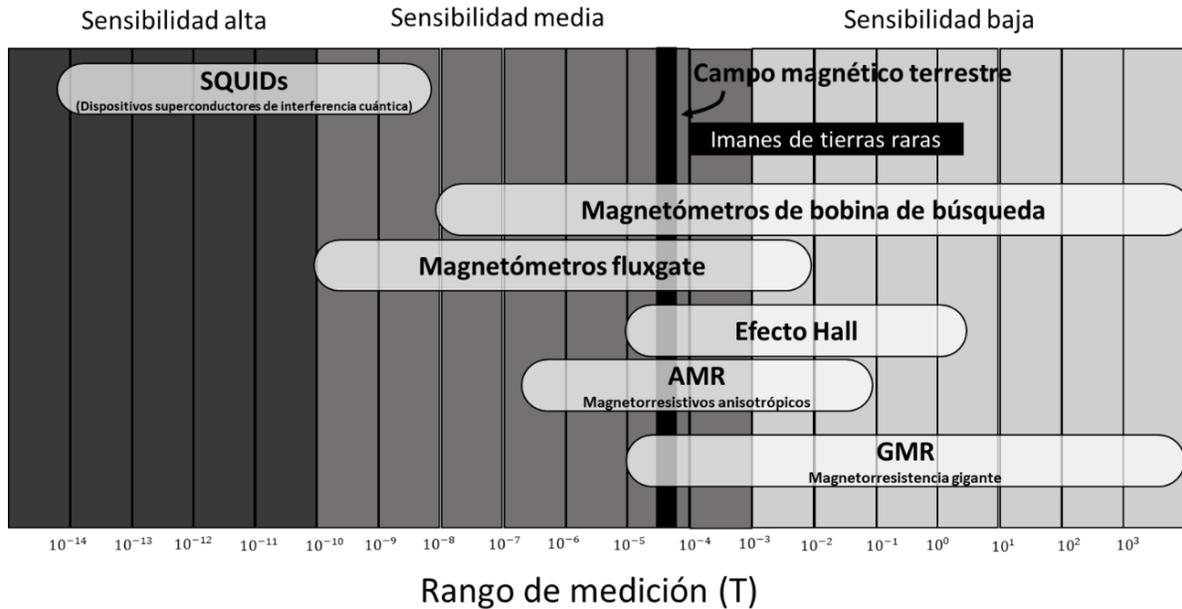


Fig. 3 Rango de sensibilidad de los sensores magnéticos considerados, adaptado de [68].

Magnetómetros de bobina de búsqueda: Basados en la ley de Faraday de inducción electromagnética, cuando las espiras de una bobina, usualmente provista de un núcleo ferromagnético es atravesada por un campo magnético externo alterno, es inducido un voltaje que es directamente proporcional a la amplitud y velocidad de cambio del campo magnético (o el flujo magnético) [69].

Magnetómetros fluxgate: Compuestos por dos núcleos cilíndricos paralelos u ortogonales de un material de alta permeabilidad magnética con devanados en serie, pero en sentido inverso, los cuales son saturados periódicamente con un campo magnético de corriente alterna que hace que la magnetización cambie rápidamente de una dirección a la otra, de tal manera que al pasar por ellos un campo de corriente continua provoque un desequilibrio "en la puerta" y sea captado por una bobina de detección [69]. A pesar de ser de un tamaño considerable, los magnetómetros de este tipo, así como los de bobina de búsqueda requieren de un procesamiento de señales y de una calibración muy compleja.

Magnetómetros de magneto-impedancia gigante (GMI): Cuando una corriente alterna a muy altas frecuencias se aplica a un material ferromagnético, su acción se restringe a un área determinada por la profundidad del fenómeno conocido como efecto pelicular. Entonces, su valor depende no solo de la frecuencia, sino también de la magnetización de la corriente continua y la permeabilidad dinámica. Por lo que, si un campo magnético externo es aplicado, los parámetros magnéticos y la profundidad de la capa del efecto pelicular influirán en esta, lo que lleva al cambio en la resistencia (o impedancia) de valor complejo del material. Esto resulta en un cambio en el voltaje de salida, el cual puede ser medido por un microcontrolador. Sin embargo, las altas frecuencias de corriente alterna (las cuales alcanzan desde varios MHz hasta el orden de GHz) y la fabricación especializada que requieren, limitan su fabricación a fines muy específicos [69, 70].

Sensores de efecto Hall: El efecto Hall, descubierto en 1879 por Edwin Hall, explica que cuando un flujo de densidad magnética que pasa de manera perpendicular a la cara de un conductor o semiconductor por el cual fluye una corriente eléctrica, se generará una diferencia de potencial opuesta al borde sobre el que es aplicado el flujo magnético (V_{Hall}). Este efecto a pesar de ser conveniente para el instrumento a diseñar posee una baja sensibilidad y usualmente son necesarios amplificadores para obtener buenos resultados a las distancias que en este trabajo se requieren [71].

Sensores magnetorresistivos anisotrópicos (AMR): Este tipo de sensores, al igual que los magnetómetros magnetorresistivos gigantes (GMR) se basan en la variación de impedancia, pues cuando se hace pasar un flujo de corriente a través de una delgada lámina hecha de un material ferromagnético, es posible detectar un voltaje si en dirección perpendicular pasa un campo magnético externo.

Dicho campo magnético puede afectar la conducción de las sustancias de varias formas, existiendo una fuerte influencia en la magnetización intrínseca a las características eléctricas del material con el que se fabriquen. Semiconductores como NiFe, InSb y InAs son frecuentemente usados en la fabricación de sensores AMR, pues la movilidad de la carga en estos es significativamente mayor, pues el efecto magnetorresistivo anisotrópico se interpreta como el resultado de la fuerza de Lorentz (F) sobre una carga q que se mueve a una velocidad v en un

campo magnético B como se describe en la ecuación 1, dando como resultado una desviación de la trayectoria de los portadores de carga (Figura 4a), provocando un cambio en la resistividad del material [70].

$$F = q(v \times B) \quad (1)$$

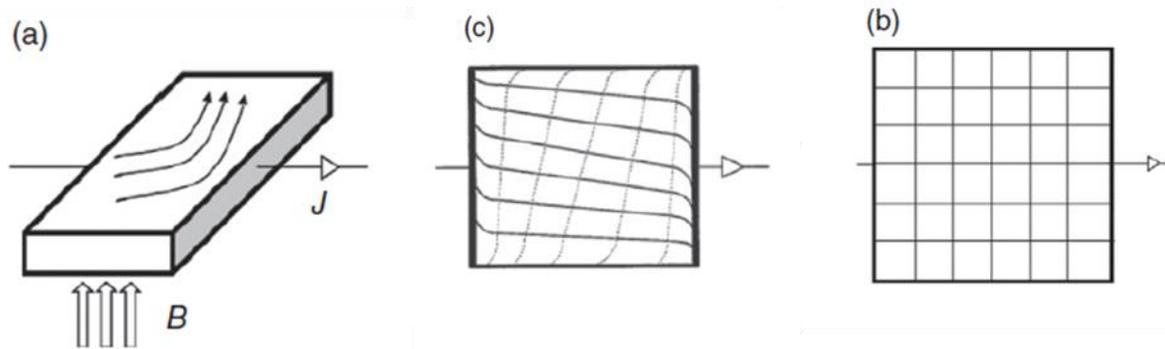


Fig. 4 Movimiento de la carga por el efecto magnetorresistivo, a) influencia de la fuerza de Lorentz en la longitud del camino actual; (b) las trayectorias de corriente y las líneas equipotenciales en una placa rectangular conductora en ausencia de campo magnético externo; (c) las mismas líneas en ausencia del campo externo después, adaptado de [70].

Así mismo, el efecto AMR da como resultado una dependencia local de conductividad eléctrica en la orientación mutua de los vectores de magnetización y de densidad de corriente, lo que atribuye a que el objeto ferromagnético muestre una alta resistividad cuando la dirección de magnetización es paralela a la corriente y menor cuando esta es perpendicular, en las figuras 4b y 4c se aprecia este efecto al comparar las líneas equipotenciales en una placa rectangular de material conductor cuando son sometidas a campos magnéticos y cuando no respectivamente.

Los encapsulados de este tipo de sensores se encuentran en una amplia variedad de presentaciones. Comúnmente, suelen ser encontrados en configuración de puentes de Wheatstone para incrementar su sensibilidad y han sido ampliamente incorporados a todo tipo de sistemas, como lo son de navegación, de telefonía celular, de posicionamiento global, entre otros, lo que lo vuelve la elección en el diseño del instrumento de seguimiento de marcadores magnéticos en este proyecto [70].

2.5.2 Características de la etiqueta magnética seleccionada

2.5.2.1 Los tipos de imanes permanentes

Al optar por un marcador magnético, se debe cuidar que el imán seleccionado interfiera lo menos posible con el comportamiento normal del espécimen a analizar, por lo que es deseable que cumpla con determinadas características:

- Debe ser lo suficientemente ligero y poco voluminoso como para ser transportado sin dificultad por la larva SM marcada.
- Debe emitir un campo magnético lo suficientemente notorio a profundidades considerables como para ser detectado por los sensores magnéticos.
- No debe ser tóxico para los especímenes de larva SM o para el ambiente.
- De preferencia, debe ser fácilmente accesible para todo público y de bajo costo

Como se puede observar en la figura 5, en las últimas 6 décadas, el imán permanente que ha permanecido como el predilecto y del que se sepa que se obtiene un mayor producto de energía estática máxima o $(BH)_{\max}$ es el de neodimio, como se aprecia en la tabla 1, es una opción de gran accesibilidad y de un costo bastante atractivo.

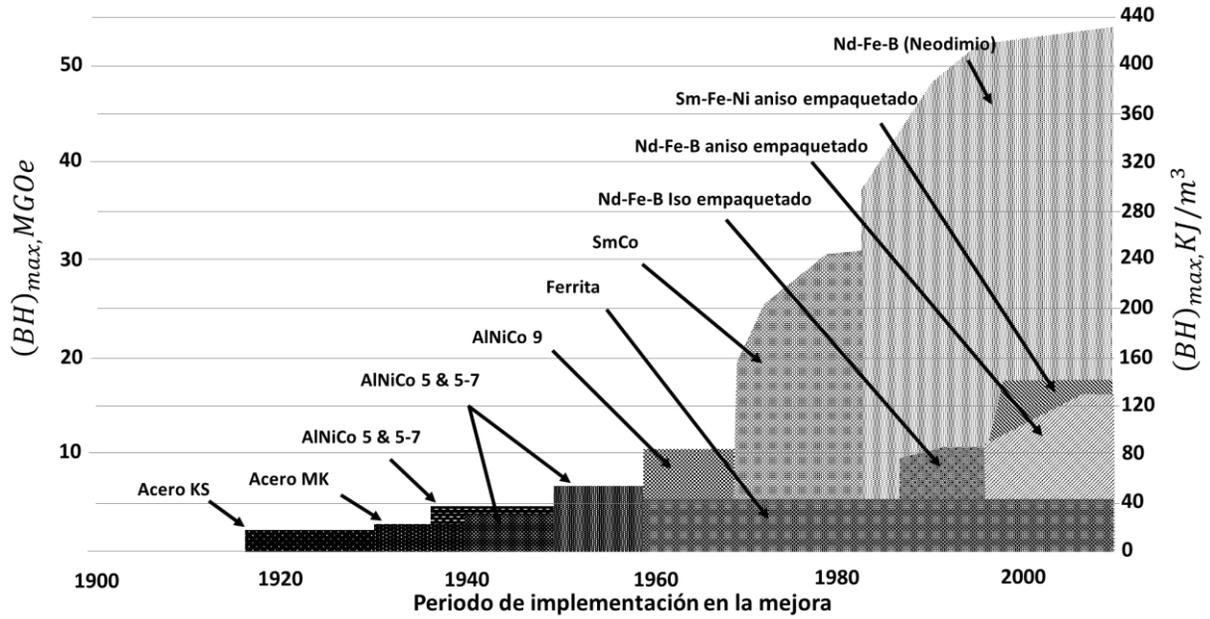


Fig. 5. Producto de energía estática máxima de distintos tipos de imanes permanentes y periodos en los que fueron optimizados debido a su relevancia comercial, adaptado de [72].

Tabla 1. Precio optimo por rendimiento métrico para imanes permanentes, adaptado de [72].

Material	$(B)_{max}$, kJ/m^3 (MGOe)	Precio promedio, \$/kg	Densidad, kg/m^3	Precio promedio, \$/m ³	Precio/rendimiento, \$/kJ (\$/m ³ /MGOe)
Nd-Fe-B	358 (45)	70	7 500	525 500	1 468 (11 678)
Ferrita	28 (3.5)	6.4	5 000	32 000	1 143 (9 143)
Sm-Co	199 (25)	95	8 400	798 000	4 010 (31 920)
AlNiCo	56 (7)	56	7 300	408 800	7 300 (58 400)

En contraste, la tendencia a la pérdida de fuerza magnética al incrementar la temperatura resulta sumamente pronunciada en imanes de NdFeB como se observa en la figura 7, sin embargo, para el propósito de este proyecto, es adecuado, pues la baja profundidad (menor a 100 m) y temperatura moderada (30 °C) en la que se trabajará permiten obtener un $(BH)_{max}$ superior a los demás imanes permanentes (figura 6) [73, 74]. Es por esto que, considerando las ventajas económicas y de capacidad de este tipo de imanes permanentes, son considerados como la opción como marcador entomológico.

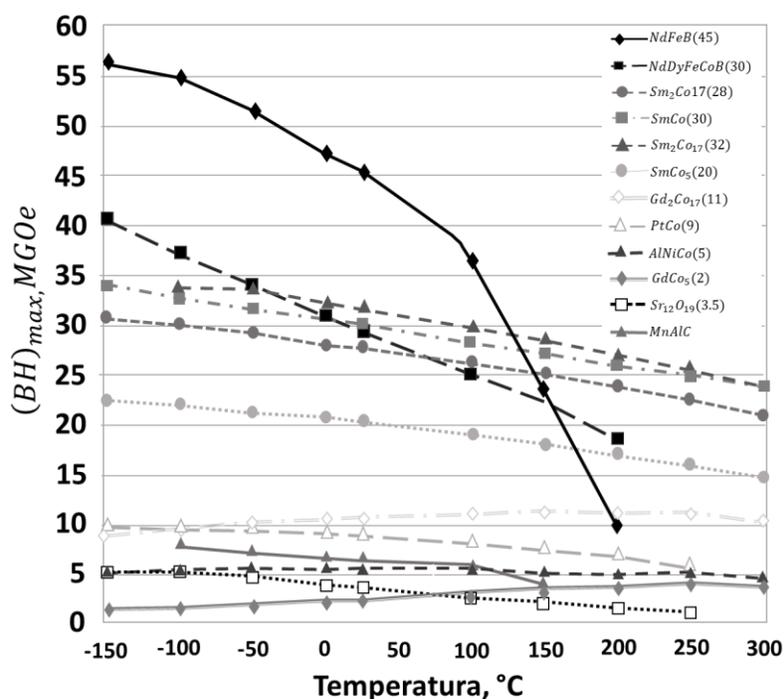


Fig. 6 Dependencia de la temperatura de $(BH)_{max}$ para la mayoría de los imanes permanentes comerciales. El valor entre paréntesis indica el $(BH)_{max}$ a 25°C, adaptado de [75]

2.5.2.2 Características de los imanes de neodimio hierro boro (NdFeB)

El neodimio, con el número atómico 60 es un elemento que forma parte del grupo químico de los lantánidos, grupo que además, se conoce como el de las tierras raras, lo que también le da el nombre a los imanes que surgen de la combinación del neodimio con otros elementos, como son el hierro y el boro, formando una aleación de fórmula química $Nd_2Fe_{14}B$ [76].

Los imanes de neodimio se nombran con la letra N seguido del producto de energía estática del imán, así, por ejemplo, un imán de neodimio N35, pueden alcanzar una remanencia estática de capo magnético (B) de 1.22 Teslas (12 200 Gauss) y una intensidad de campo magnético (H) de

12 800 Oersteds (1.02 MA/m), con lo cual se obtiene un producto de energía estática máxima de aproximadamente 35 Mega Gauss Oesterds (MGOe) o bien 286.48 kJ/m³. Los detalles para el cálculo de estos parámetros se incluyen en el apéndice A [77].

A pesar de la fragilidad de estos imanes y del abrupto decremento de su campo magnético al ser expuestos a temperaturas superiores a los 100 °C, estos pueden superar hasta 15 veces la intensidad del campo magnético de imanes de mayor uso comercial, como los de ferrita, además de poder ser fabricado en una gran variedad de formas y tamaños. En particular, estos imanes resultan interesantes para el marcaje entomológico por su alto rendimiento en función de su volumen [75]. Es por tal motivo que se en este proyecto se emplearán estos imanes permanentes para marcar larvas SM con ayuda del instrumento diseñado con los sensores descritos en la sección anterior.

2.6 El manejo integral de plagas y los métodos de control de larvas subterráneas

El control de plagas moderno ha sido influenciado desde 1968 por lo que hoy se conoce como el manejo integral de plagas o IPM (Integral Pest Management), sistema propuesto por Smith y van den Bosch. Dicho concepto en constante evolución engloba diversas técnicas de control de plagas en conjunto con la gestión del medio con el fin de integrar los intereses económicos y los impactos percibidos por los productores, la sociedad y el ambiente [78, 79].



Fig. 7 Acciones de prioridad en un manejo integral de plagas

El manejo integral de plagas, se ha establecido como una tendencia cuyo propósito se asienta en el uso coordinado de múltiples tácticas para optimizar el control de plagas de manera económica y ecológicamente responsable [79]. De esta forma, la variedad de recursos empleados en el manejo integral de plagas suele ir desde medios de control físico, químico, biológico hasta métodos culturales (figura 7), con lo que se busca la compatibilidad entre dichos elementos para alcanzar los umbrales económicos prudentes en los que se consiga el manejo supervisado de insectos [80].

Parte importante del éxito de la gestión IPM radica en el análisis de la naturaleza de la plaga a tratar, el tipo de tejido del que se alimenta y el medio en el que vive; por lo que es conveniente la especialización de ciertas técnicas partiendo desde dicho enfoque.

Un caso particularmente complejo es el control de plagas subterráneas, ya que a diferencia de los insectos que se alimentan del follaje y partes superficiales de las plantas, gran parte de la ecología y del ciclo de vida de estos animales permanece oculto por capas de tierra. Aunado a ello, los métodos químicos de control, que suelen ser los más prácticos y definitorios para un gran número de plagas, resultan poco eficaces debido a la profundidad a la que habitan estos insectos, limitando la permeabilidad de las sustancias activas, siendo necesarias cantidades de insecticidas que en un esquema de IPM resultan prohibitivas [81].

En correspondencia a esta particularidad, los métodos de control de plagas subterráneas y específicamente aquellos dirigidos a larvas de escarabajo de hábitos rizófagos incluyen la rotación de cultivos, la labranza del suelo, trampas físicas y de feromonas sexuales, el despliegue de depredadores y parasitoides, el uso de hongos entomopatógenos como *Beauveria bassiana* y *Metarhizium anisopliae*, así como la combinación de estos con nemátodos o insecticidas de origen vegetal [62]. Esta diversidad propicia que la tasa de efectividad de los métodos antes mencionados sea variable, poniendo en perspectiva la riqueza de vías por las que el control de este tipo de plagas puede ser abordado.

2.6.1 Métodos químicos de control de larvas de escarabajo

Como se ha mencionado, el uso de agentes químicos en el control de plagas es polémico y muchas veces ineficiente. Además de que los pesticidas carbamatos y organoclorados como el aldrin y el lindano, con una alta persistencia en el suelo, han sido prohibidos en un gran número de países, existiendo pocas alternativas químicas cuyo desempeño aún se encuentra en valoración, como los neonicotinoides, piretroides y fenil pirazoles, de los cuales solo el último ha demostrado la mortalidad de larvas de escarabajo tras tiempos prolongados, mientras que los dos primeros actúan con cierta efectividad al principio, pero con resultados reversibles [62, 82].

A pesar de la rápida acción y el desarrollo de infraestructura de tratamiento químico de plagas, aún queda por resolver varias de las desventajas que suponen, como la resistencia a los pesticidas por los insectos diana, el impacto sobre otras especies, sobre todo insectos polinizadores, así como las limitaciones por la permeabilidad del suelo, lo cual no solo puede provocar fitotoxicidad en los cultivos donde se esparcen, sino que además vuelve a estos cultivos en portadores de sustancias que también pueden ser nocivas para el ser humano. En respuesta, han sido planteados métodos de control de plagas menos tóxicos, como es el caso de los métodos físicos [80, 83].

2.6.2 Métodos físicos de control de plagas subterráneas

Para poner en práctica los métodos físicos de control de plagas, el entorno se modifica con la intención de que los insectos dejen de ser una amenaza para el cultivo agrícola. El estrés generado a partir de dichas prácticas pretende ejercer un control sobre las plagas, ya sea tras conseguir su erradicación o al menos, formando barreras que protejan a los productos y plantas de una posible infección. [80, 84].

Las líneas de desarrollo de métodos de control físico de plagas han vertido sus esfuerzos en el monitoreo y la intervención, desarrollando herramientas con las que cerciorarse de la presencia de plagas ocultas. Dichas intervenciones se han visto favorecidas gracias al avance de la tecnología digital y al procesamiento de las señales. Así mismo, varios casos han sido reportados en los que se han alcanzado altas tasas de mortalidad en larvas de escarabajo, dichos métodos

de control abarcan técnicas mecánicas, térmicas, neumáticas, de atmósferas alteradas y como se considerará en este trabajo, mediante estímulos eléctricos y sonoros (ES) [80, 83].

2.6.2.1 Métodos eléctricos de control de plagas

El uso de la energía eléctrica como medio insensitivo de control de plagas ha sido utilizada en repetidas ocasiones de manera focalizada como lo describen Garcia-Paniagua (1974) y Flagler *et al.* (2003), quienes bajo sus propias metodologías afirman que es posible erradicar las plagas del suelo de cultivo incluyendo nemátodos y demás pestes de la tierra mediante descargas eléctricas, utilizando distintos medios de transmisión de corriente [85, 86],

También se han realizado pruebas en el interior de cultivos como estiman Fedrezzi *et al.* (2020) y Niamouris y Psirofonia (2014) quienes aplicaron corriente eléctrica directa y alterna en árboles de palma (*Phoenix canariensis* y *Phoenix dactylifera*), infectadas de larvas del escarabajo *Rhynchophorus ferrugineus* introduciendo electrodos a profundidades de 5, 10, 15 y 20 cm de la corteza de los troncos de dichas pantas, concluyendo que se puede obtener una mortalidad de entre el 85 y 99% de los insectos mencionados a partir de los 15 voltios de corriente alterna, con un riesgo de hasta el 16.7 % de causar la muerte de la especie huésped [14, 15].

Las descargas eléctricas también han sido utilizadas para proteger los productos almacenados, como reportan Matsuda *et al.* (2018), quienes, mediante la diferencia de conductividad entre los granos almacenados y las plagas, en este caso el gorgojo del arroz, *Sitophilus oryzae*, reportan haber diseñado un sistema de detección y eliminación de los estos [16].

2.6.2.2 Métodos sónicos de control de escarabajos

Siguiendo la vertiente del control de plagas y particularmente de escarabajos herbívoros, ha sido evaluado el efecto del estrés acústico en ejemplares adultos, pupas y larvas de este grupo de artrópodos. Tal es el caso de los estudios realizados sobre *Tribolium castaneum*, el gorgojo castaño de la harina, realizados por Jinham (2012), quienes reportan haber obtenido mortalidades de hasta el 86 % en larvas expuestas a frecuencias sonoras de entre 1100 y 1200 Hz, y siendo detectadas deformaciones en la sección dorsal del pronoto de las larvas y pupas

sobrevivientes [17], lo cual pudiese ser explicado por el constante estrés generado en los órganos cordotonaes ubicados en los discos pleurales de los escarabajos en etapa larvaria [87, 88].

De modo similar, Sokol et al. (2022) expusieron el impacto que el estrés vibracional y acústico puede tener sobre los cuerpos los escarabajos de la patata (*Leptinotarsa decemlineata*). Esto considerando la frecuencia de resonancia (f_{RES}) específica de cada insecto, la masa (m) y la rigidez (k) de sus cuerpos al permanecer en un dispositivo emisor de ondas puras fabricado con ese propósito, según la ecuación (2).

$$f_{RES} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m} \quad (2)$$

De esta forma, determinaron que la banda de frecuencia que le ocasionó más daño a estos escarabajos se encuentra entre 800 y 1500 Hz, con una amplitud de 120 dB. Esta estimulación provocó desde el aletargamiento de los escarabajos hasta la pérdida de extremidades y la muerte de estos [18].

Por otro lado, autores como Aflitto et al. (2013) y Hofstetter et al. (2014) han reportado una leve modificación en la conducta y reproducción en gorgojos descortezadores (*Dendroctonus frontalis*, *D. brevicomis*, *D. ponderosae*) tras ser estimulados acústicamente con grabaciones capturadas mientras estos mismos cortejaban, se alimentaban o eran sometidos a estrés. De esta forma, se logró desde un muy leve desvío de la ruta seguida [89], hasta la interrupción del apareamiento, una ovoposición reducida e incluso la agresión a su pareja de cúpula [90].

En vista de la escasa literatura dirigida al estudio del efecto sónico y eléctrico del comportamiento de las larvas SM mediante un marcado que permita el seguimiento de su ruta a través de la tierra, resulta de interés para determinar la eficacia de estos métodos físicos de control de plagas.

3 Desarrollo

En este capítulo se explica el método de desarrollo del dispositivo propuesto, así como se exponen los diagramas eléctricos, fórmulas matemáticas y deducciones utilizadas para diseñar y construir un sistema de seguimiento de insectos marcados magnéticamente.

Dicho sistema se compone por tres elementos:

Una matriz de 64 sensores magnetorresistivos anisotrópicos, que conforman el instrumento de detección de las etiquetas magnéticas, es decir, los imanes de neodimio que se adhirieron a las larvas SM. La información captada por dicho instrumento fue enviada un microcontrolador, el cual a su vez recibió las señales necesarias para determinar la frecuencia y la amplitud de los pulsos del siguiente elemento, el sistema de estimulación eléctrica y sonora.

El sistema de estimulación eléctrica y sonora se compuso por una serie de etapas de acondicionamiento y amplificación de un generador de funciones, con el que se obtuvo una salida de audio, que se conectó a un woofer y una salida de corriente amplificada por un transformador en configuración de elevador, la cual se conectó a un par de placas rectangulares de aluminio que se usaron como electrodos para aplicar descargas a las larvas SM en terrarios destinados a la experimentación con condiciones de temperatura y humedad controladas.

La última etapa fue una interfaz gráfica que generó un mapa de intensidades con el cual fue posible comparar la posición de las larvas SM con la posición del sensor que detectó la intensidad máxima o mínima en caso de detectar un solo polo del imán, o bien el punto medio entre la intensidad máxima y mínima en caso de que se detectaran ambos. Dicha interfaz fue programada en una computadora personal con el software MATLAB R2020.

El diagrama que resume el desarrollo de este proyecto se muestra en la figura 8.

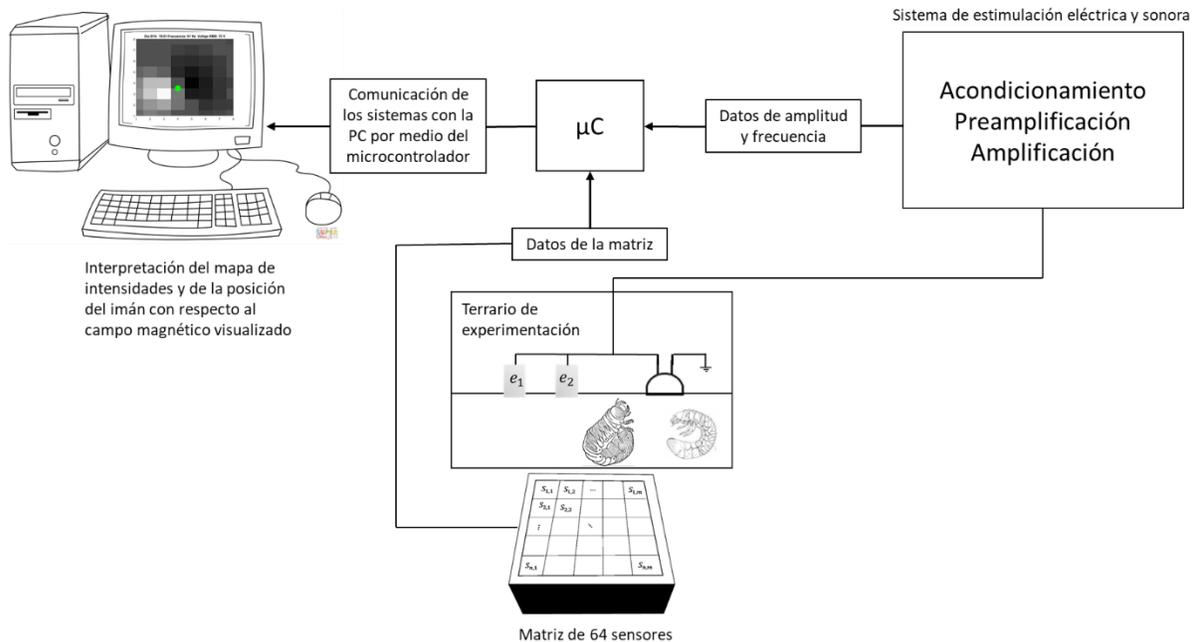


Fig. 8 Diagrama de los sistemas desarrollados para el monitoreo y aturdimiento de las larvas SM.

3.1 Sistema propuesto

Como se ha mencionado, el sistema propuesto tiene como fin el monitoreo de insectos subterráneos y en particular de larvas de escarabajo rizófagas SM, pues detectar los signos de invasión de estos insectos de manera temprana, puede ser crucial para evitar la pérdida o destrucción del cultivo. El método de marcaje y control que se propone, se busca evitar generar algún impacto nocivo sobre el ambiente y sobre los productos de cultivo, así como dar una imagen coherente de los especímenes.

Para este propósito, se propone el método de marcado magnético para detectar la posición de larvas SM, el cual se destaca por las siguientes razones:

- El campo magnético de los imanes comerciales puede traspasar el medio en el que suelen habitar los insectos subterráneos (tierra de alto contenido orgánico).
- A diferencia de los métodos de inspección que requieren de exponer las raíces de los cultivos o escarbar alrededor de estas para conocer la posición de los invasores, el seguimiento de marcadores magnéticos solo precisa del acercamiento de detectores sensibles a marcadores magnéticos.

- Los marcadores magnéticos perdurarán adheridos al insecto en todo momento, siempre que sea fijado adecuadamente y este no mude de piel.
- El costo de pequeños imanes permanentes, así como el de los sensores magnéticos de uso comercial es asequible, como fue expuesto en la sección 2.
- El sistema de monitoreo de imanes permanentes con los sensores permitiría el seguimiento del movimiento de las larvas de escarabajo sin la necesidad de sistemas computacionales de gran complejidad.

Estas ventajas hacen de los marcadores magnéticos una opción prudente para los objetivos de este proyecto. El uso de arreglos de sensores magnéticos para el seguimiento de objetos ya ha sido propuesto anteriormente por Liang et al. (2017), Rahmawati et al. (2017) y Suksmono et al. (2021), incluso, se ha llegado a sugerir por el primer autor que esta tecnología podría llegar a ser útil para obtener imágenes biológicas [91-93]

En la figura 1 se esquematiza un arreglo de sensores magnéticos (S_{nm}) ordenados en forma de matriz, un imán permanente (IP) y la imagen resultante que se espera como mapa de intensidades del campo magnético del IP. Como resultado, es posible obtener tres posibles imágenes dependiendo de la orientación que tome el IP, pues pueden ser visibles los dos polos magnéticos (figura 9) o solo uno (figura 10).

La tonalidad de cada pixel dependerá del valor dentro de la escala ajustada que sea proporcional a la magnitud del vector magnético que llegue a ser captado por el sensor más próximo, considerando que la intensidad del campo magnético registrado dependerá la posición del IP es posible calcular la ubicación de un imán dependiendo de la ubicación del sensor que detecte la intensidad máxima, mínima o el punto medio entre los dos polos, en caso de que ambos sean detectados.

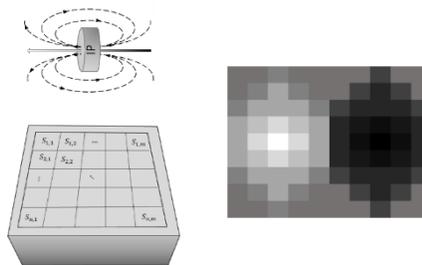


Fig. 9 Patrón de intensidad esperado al acercar un imán IP sobre una matriz de sensores magnéticos de forma que el flujo magnético sea paralelo a la matriz.

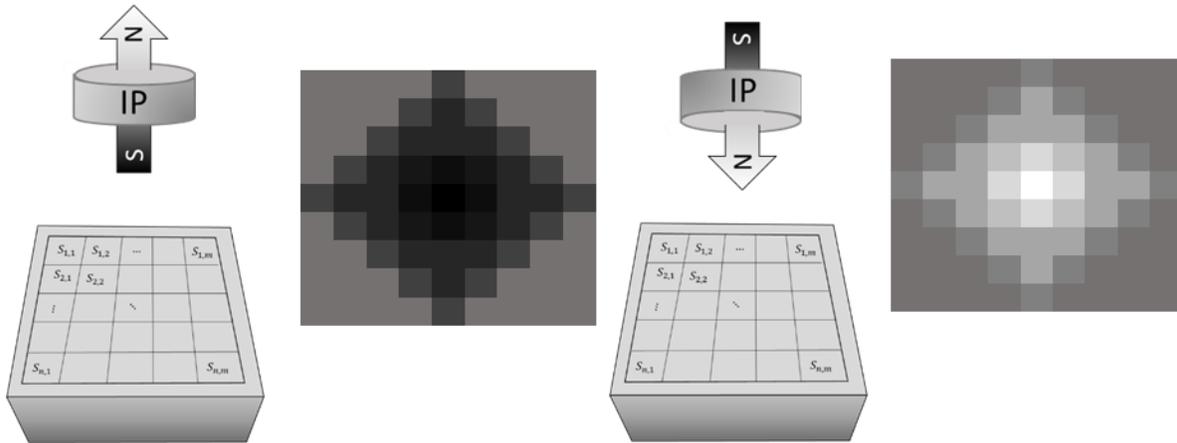


Fig. 10 Patrones de intensidad esperados al acercar un imán IP sobre una matriz de sensores magnéticos de forma que el flujo magnético sea perpendicular a alguno de los polos magnéticos.

Ya decidido el método de localización del marcador que se utilizará para seguir a las larvas SM se prosiguió a determinar la clase de imanes a utilizar, el tipo de sensor que se usará, el diseño del circuito electrónico y el de la carcasa que lo contendrá y el procesamiento de las señales.

3.2 Diseño electrónico

3.2.1 Selección del sensor propio

Los candidatos de mayor relevancia para el propósito de este trabajo fueron los de efecto hall y los de efecto anisotrópico magnetorresistivo, esto debido a que ambos cuentan con encapsulados de uso general, lo que los vuelve fácilmente adquiribles, de un precio razonable, de fácil programación y de un tamaño adecuado para el objetivo de diseño, siendo deseable que la distancia entre sensores limite lo menos posible la resolución de la imagen obtenida.

Se consideraron específicamente 2 modelos por su alta disponibilidad y lo bien documentado que ha sido su rendimiento como “cámaras de campo magnético”. Estos dos modelos son las brújulas digitales HMC5883L y QMC5883L, que comúnmente son fabricadas por las empresas Honeywell y QST respectivamente.

Las descripciones y el hardware de ambos encapsulados son prácticamente iguales, con la diferencia de que los encapsulados QMC5883L cuentan con un ADC interno de 16 bits, mientras que el HMC5884L con uno de 12, así como diferencias en los métodos de programación y las

direcciones I2C que les fueron asignadas. Ambos sensores fueron adquiridos y probados para evaluar su rendimiento resultando en la observación de que 7 de cada 10 sensores de la denominación HMC5883L contaban con un defecto en alguno de los ejes magnéticos, comúnmente el z, lo que podía sesgar y limitar la respuesta del instrumento a elaborar, además esto podía contribuir a errores durante la calibración de los sensores y al intentar medir la intensidad del campo magnético a distancias específicas por encima de la matriz.

Por todo lo anterior mencionado, se optó por diseñar el instrumento de seguimiento con sensores QMC5883L (figura 11), más específicamente, los incorporados al módulo GY-273 que los contienen, pues estos cuentan con los componentes necesarios para el acondicionamiento de la transferencia de datos por el protocolo I²C.

Las características de los módulos QMC5883L son las siguientes [94]:

- ADC interno de 16 bits de bajo ruido
- Resolución de hasta 0.5 μ T (5 mG)
- Amplio rango de lectura de campo magnético (± 8 Gauss/ $\pm 8 \times 10^{-4}$ Tesla)
- Voltaje de operación de entre 2.16 V a 3.6 V con un bajo consumo de energía (75 μ A)
- Salida de datos con compensación de temperatura
- Interfaz I2C
- Rango de temperatura de trabajo ente -40°C y 85 °C.
- Encapsulado de contactos en rejilla (LGA)

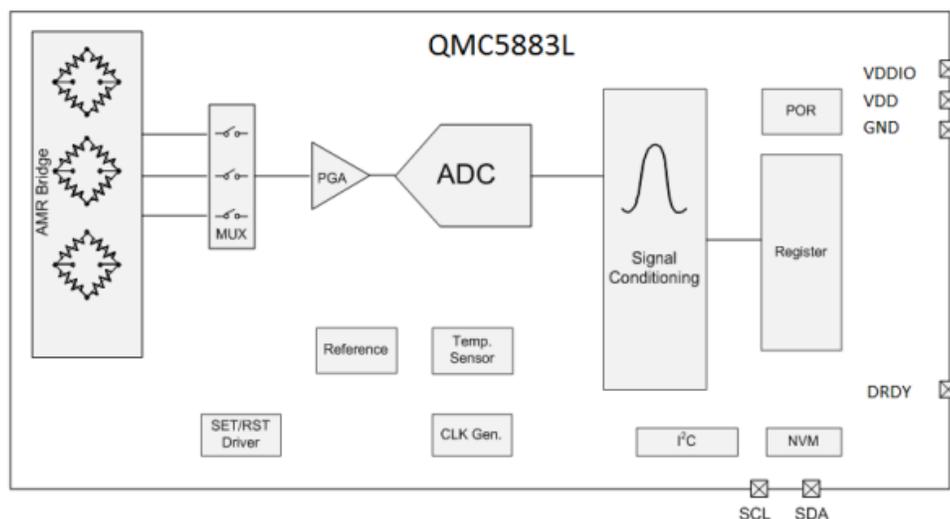


Fig. 11 Diagrama de bloques del sensor QMC5883L de la empresa QST, fuente: [94].

Como ventaja adicional del módulo GY-273 (figura 12) es que en este cuenta con un regulador de voltaje de 5V a 3.3, lo que hace que lo hace compatible con alimentaciones superiores a las que fueron diseñados los chips QMC5883L, aunado a ello, los componentes añadidos y los puertos de conexión simplifican la implementación del módulo para la aplicación que concierne a este trabajo.

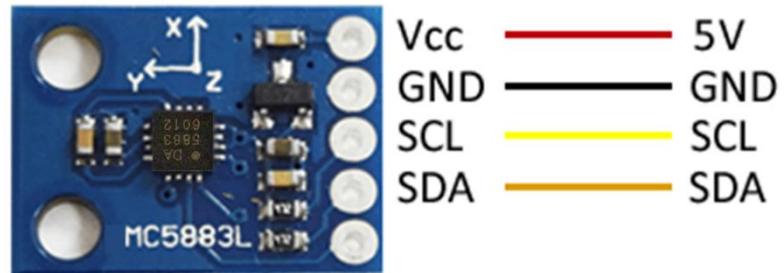


Fig. 12 Módulo GY-273 y los puertos de conexión que se usarán en este proyecto.

En este proyecto se utilizarán imanes cilíndricos de neodimio (N35). Estos fueron seleccionados por las razones planteadas en los antecedentes. En particular, se trabajó con imanes de 3mm de diámetro por 1mm de espesor con cubierta de níquel, como se muestra en la figura 13. Las especificaciones de estos imanes fueron facilitadas por el proveedor y se encuentran en la tabla 2, para más detalles acerca de cada uno de los parámetros, consultar el apéndice A [95].

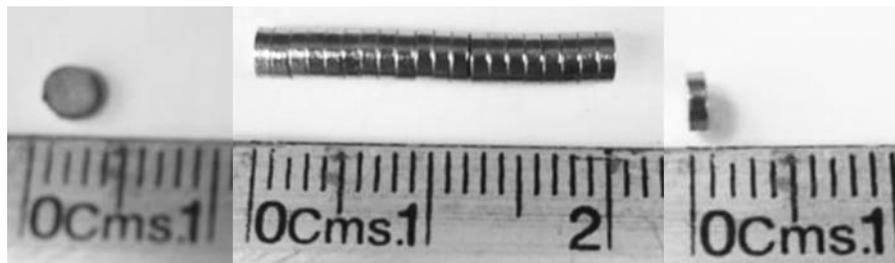


Fig. 13 Dimensiones de los imanes de neodimio N35 utilizados como marcadores en el seguimiento de larvas

SM.

Tabla 2. Propiedades magnéticas del imán seleccionado, adaptado de [95].

Grado de la aleación NdFeB	Inducción remanente (Br, T)		Fuerza coercitiva Hc, MA/m (Oe)		Producto de energía estática máxima BHmax, kJ/m ³ (MGOe)		Temperatura de trabajo continuo (T, °C)
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Max
N35	1,17	1.22	0.86 (10 800)	1.02 (12800)	262.61 (33)	286.48 (35)	80

Una vez seleccionados los sensores y las etiquetas con que se trabajará, se describirá cómo se diseñó el instrumento de seguimiento de dichas etiquetas a partir de una matriz de sensores.

3.2.2 Distribución de los sensores en celdas montables

Con el objetivo de cubrir un área de detección magnética significativa y con una buena resolución, se propuso el diseño de una matriz de 64 sensores en disposición de 8 columnas y 8 filas. Para abaratar los costos de fabricación, fueron ordenadas 4 placas de circuito impreso de acabado profesional a la empresa JLCPCB, las cuales cuentan con los espacios para dos multiplexores TCA9548A 4 filas y 4 columnas de sensores (después de hacer las pruebas de prototipado y por el método de planchado). Cada placa puede verse como una celda compatible con otra igual mediante el protocolo de comunicación I²C, como se muestra en la figura 14.

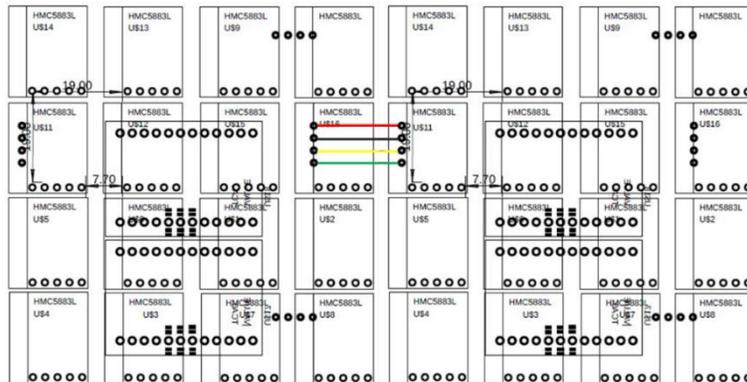


Fig 14 Comunicación entre dos placas-celda como sistema de expansión de matrices de sensores magnéticos.

El espaciamiento entre sensores se diseñó así tomando en cuenta las dimensiones de los sensores (13.5 mm x 19 mm), la del espacio que ocupan los pines (12 mm), así como un espacio de 0.7 mm entre filas para evitar que sea difícil instalarlos, con lo que se obtuvo un área cuadrada de

19 mm² por sensor, lo que da un total de 231.04 cm² de área efectiva y una resolución de 1.79 ppi (píxeles por pulgada).

3.2.3 Diseño de las pistas y asignación de direcciones de multiplexado por hardware

Los archivos gerber que sirvieron para la ordenar las placas de circuitos impresos se generaron a partir del diseño elaborado en el programa EAGLE 9.5.1, dichas placas se elaboraron en dos caras con vías de 0.36 mm como se muestra en la figura 15.

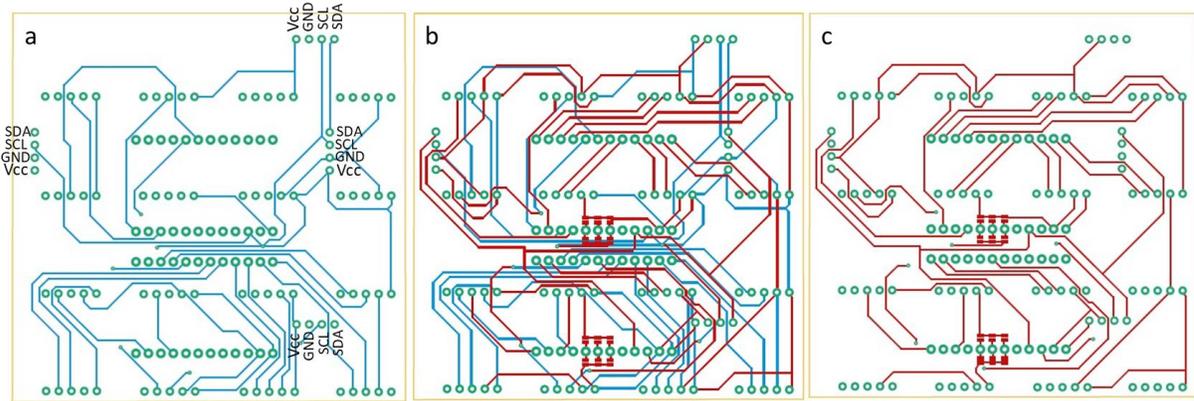


Fig. 15 Pistas del circuito impreso de una placa-celda de 4x4 sensores que componen la matriz y las respectivas placas correspondientes a) Bottom, b) Top y Bottom, c) Top.

Debido a que todos los sensores tienen la misma dirección de comunicación I²C (0x0D), es necesario emplear multiplexores para poder hacer la lectura de cada uno de estos a través de un microcontrolador, por ello, se empleó un multiplexor TCA9548A de la marca Shutao, dichos multiplexores, permiten establecer la comunicación de hasta ocho sensores con el microcontrolador cuando estos se conectan a los puertos SC0-SC7 y SD0-SD8. Aunado a ello, pueden interconectarse hasta 8 multiplexores en un mismo hilo si los pines 1, 2 y 21 son configurados de manera binaria al conectarlos a Vcc (1) o a tierra (0), modificando la dirección de estos de 0x70 a 0x77 como se observa en la figura 16.

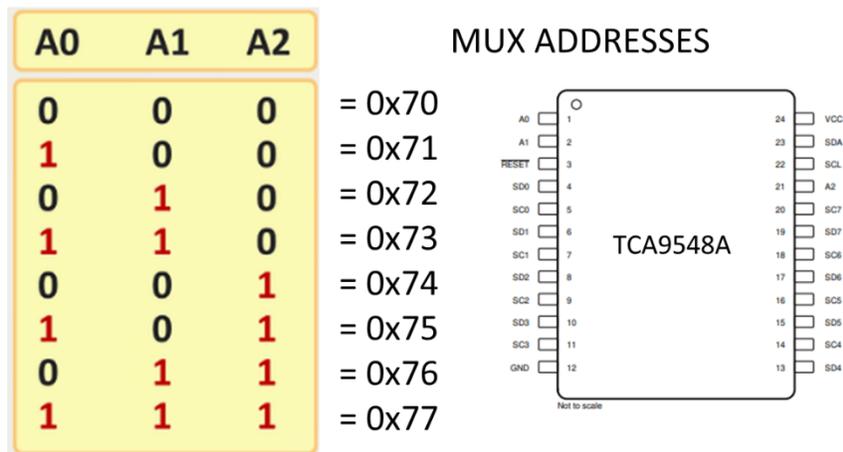


Fig. 16 Direcciones disponibles para el multiplexor I²C TCA9548A configurables al conectar los pines 1,2 y 21 a Vcc (1) o a tierra (0).

Aunque son pocos los componentes extra necesarios para mantener una comunicación estable de los multiplexores con el microcontrolador, el módulo HW-617 que contiene al multiplexor TCA9548A es más fácil de adquirir que el multiplexor en su forma de encapsulado SOIC-24, por lo que se prefirió emplear dicho módulo sacrificando el reducido tamaño que pudiera alcanzarse, pero se tiene acceso a una configuración más ordenada de los pines de asignación de dirección, los cuales fueron conectados a Vcc y GND mediante gaps, como se ve en las figuras 14 y 15, permitiendo la reprogramación de cualquiera de las placas-celdas en caso de ser necesario.

En total, fueron programados los 8 multiplexores disponibles, conectando 2 por placa-celda, como en el orden en el que se observa en la figura 17.

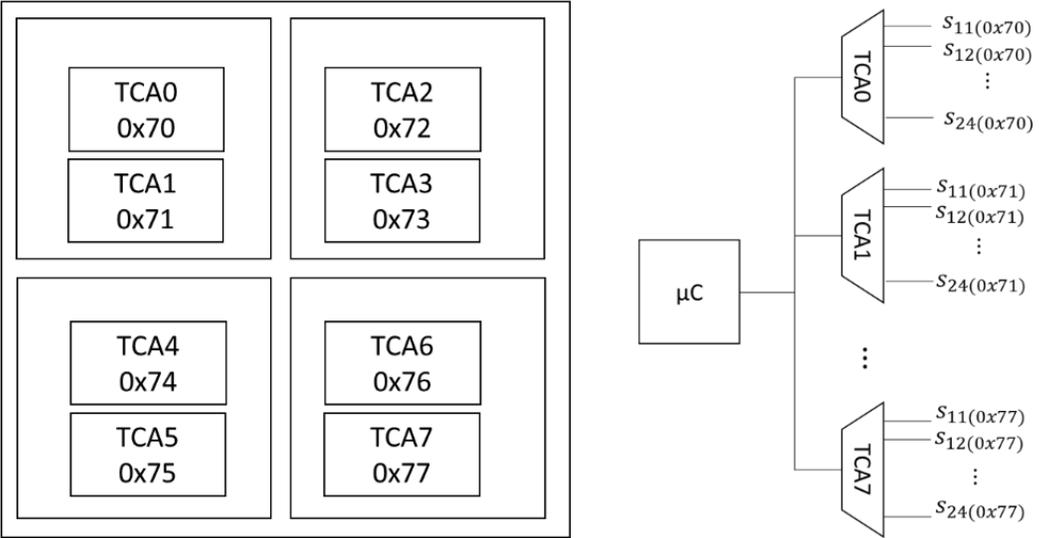


Fig. 17 Diagrama y distribución de los multiplexores en sus respectivas posiciones dentro de la matriz.

A manera de protección, se imprimió un recubrimiento en PLA (ácido poliláctico) de color gris, así como una tapa delgada para evitar que la tierra, polvo o agua caiga sobre los sensores, en la figura 18 se muestra la matriz en su recubrimiento

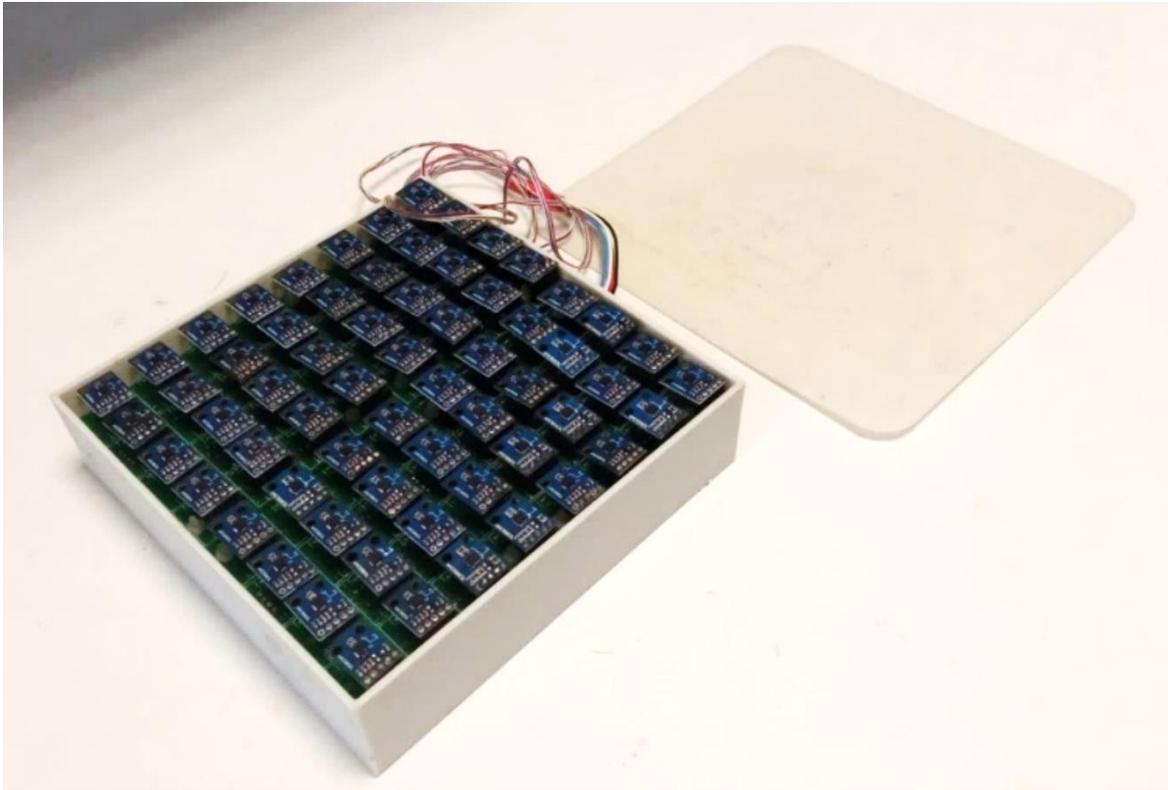


Fig. 18 Matriz de sensores en su recubrimiento impreso en 3D.

3.3 Sistema de estimulación eléctrica y sonora

Para poder controlar y registrar la frecuencia e intensidad eléctrica y sonora con la que se buscó aturdir a las larvas de escarabajo, se optó por emplear el circuito integrado XR2206 de la marca HLF, un generador de funciones con un rango de frecuencias de entre 0.1 Hz y 1 MHz, con una amplitud de 0 a 6 V, este circuito integrado (CI) puede adquirirse con bastante facilidad integrado en un módulo comercial (figura 19) que incluye los capacitores y resistencias variables necesarias para modular las frecuencias, incluso cuenta con dos salidas y un par de puentes que permite obtener el tipo de onda deseada (cuadrada, triangular o senoidal). accesibles con el CI,

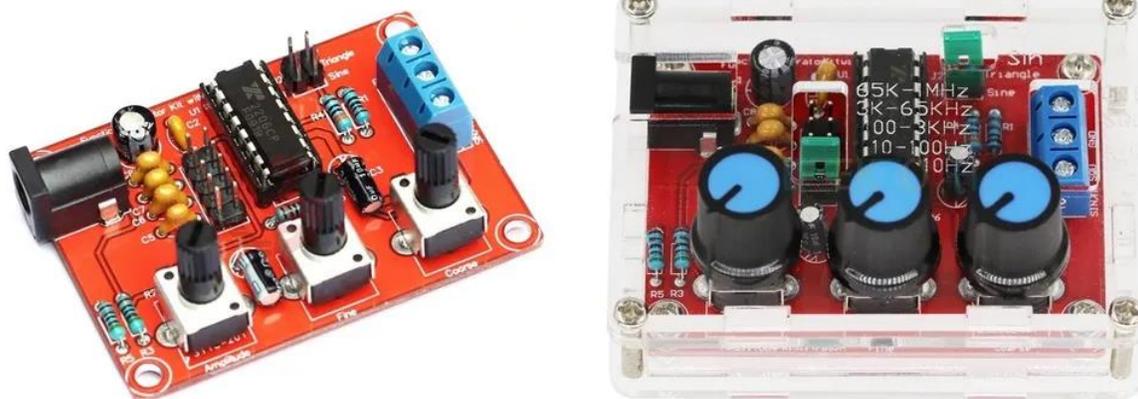


Fig. 19 Módulo generador de ondas controlado por el CI XR2206 con las resistencias variables para controlar la amplitud y la frecuencia de las funciones generadas de manera tenue y abrupta.

Para estimular eléctrica y sónica a las larvas de escarabajo, se optó por usar woofer y electrodos alimentados por una etapa de AC a través de un circuito de amplificación de potencia de tipo B y un transformador, ambos controlado por el módulo generador de funciones anteriormente descrito. Por dicho motivo, fue necesario acondicionar, preamplificar y amplificar la señal. Adicionalmente, la señal de preamplificación fue acondicionada para calcular la frecuencia y voltaje de salida con ayuda de un microcontrolador, como se ilustra en la figura 20.

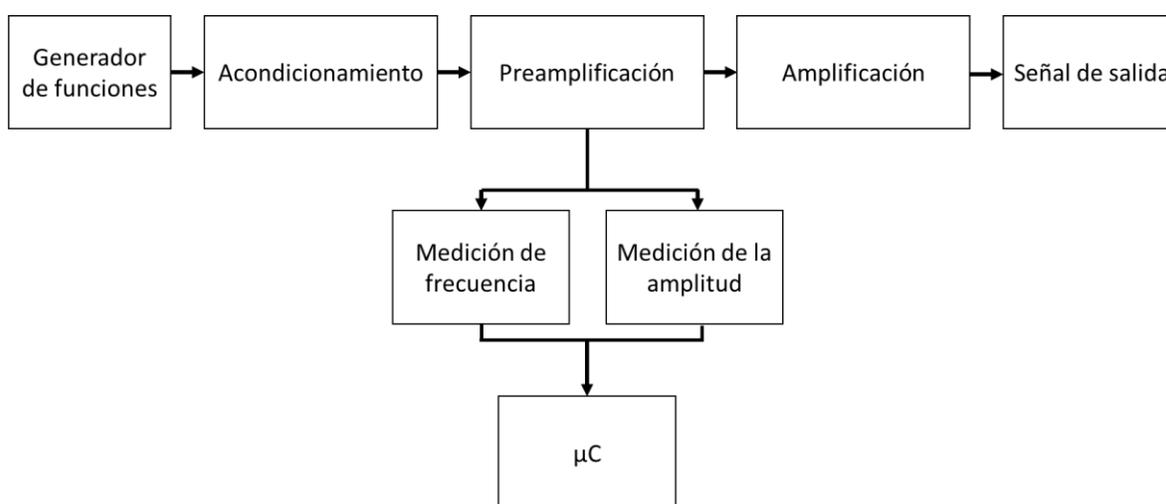


Fig. 20 Diagrama de bloques del sistema de estimulación de las larvas de escarabajo y del cálculo de los parámetros de la señal de estimulación.

3.3.1 Etapa de acondicionamiento

Para la alimentación tanto del generador como de las etapas posteriores se utilizó un mismo convertor de fuente simple a simétrica y una fuente de voltaje directa conmutada de 20 V como muestra en la figura 21.

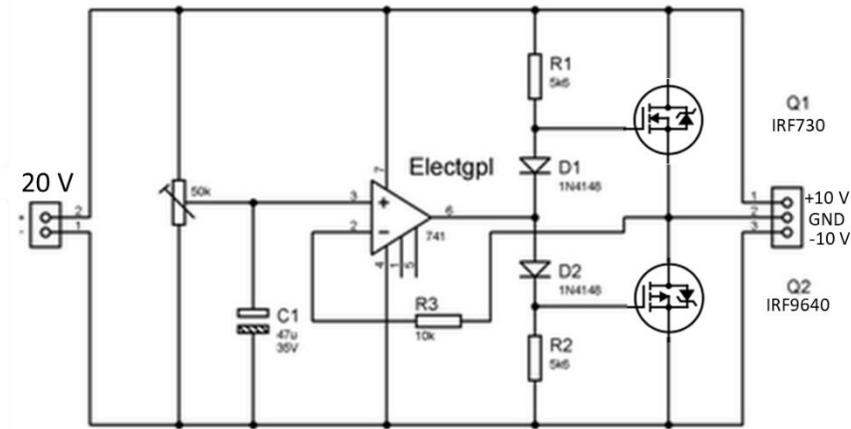


Fig. 21 convertor de fuente simple a simétrica.

Debido a que la señal de salida del generador de funciones trabaja con los 10 V de corriente directa provistos por el convertor de fuente simple a simétrica y por lo tanto, resulta netamente positiva, fue propicio acondicionar la señal por medio de un desacople capacitivo. De esta manera, se consiguió filtrar el offset de DC como se muestra en la figura 22, de esta forma, fue posible utilizar la señal para alimentar a una woofer y a un transformador como se verá en las siguientes secciones.

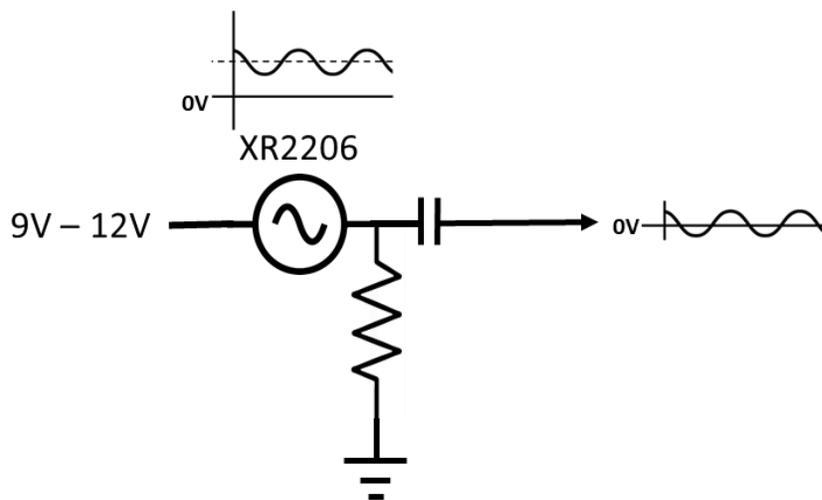


Fig. 22 Diagrama de la etapa de acondicionamiento de la señal

3.3.2 Etapa de preamplificación

Con el propósito de obtener una amplitud aún mayor, se optó por usar un transformador de uso convencional (110 V a 12 V) en configuración de elevador de voltaje, previo a eso, se decidió incluir una etapa de preamplificación, pues la salida del generador de funciones una vez filtrado, era de apenas $5V_{pp}$, lo que limitaba mucho la potencia que pudiera ser suministrada en los experimentos, para ello, se empleó el amplificador operacional LM358 a modo de amplificador no inversor, con una ganancia regulada por una resistencia variable, pudiéndose alcanzar hasta $18 V_{pp}$ como se muestra en la figura 23.

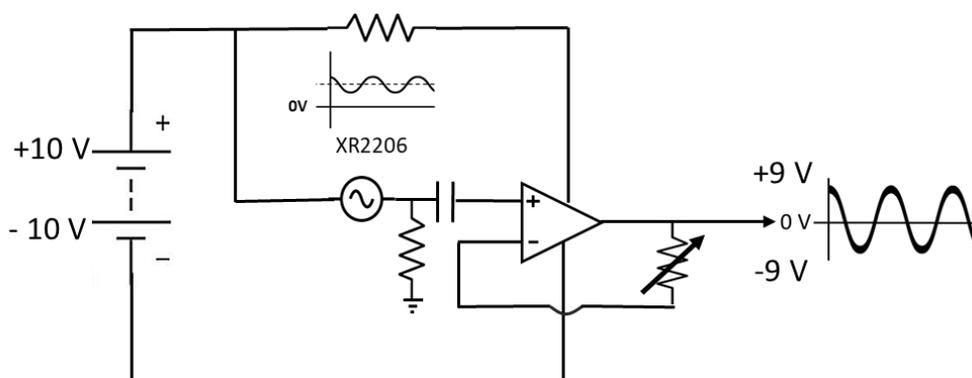


Fig. 23 Diagrama de la etapa de preamplificación del generador de funciones de $5V_{pp}$ a $18 V_{pp}$.

3.3.3 Etapa de medición de frecuencia y amplitud

Con la premisa de monitorear el voltaje y la frecuencia emitida en los experimento en cada lectura, se propuso un sistema de medición de dichos parámetros utilizando los amplificadores operacionales LM358 y A741 con el objetivo de que limiten la señal preamplificada a su parte positiva y a manera de contador de cruce por cero, de modo que pueda ser leída por los puertos de entrada analógica y digital del microcontrolador, utilizando reguladores 7806 y 7905 para no exceder el voltaje máximo admisible por dichos puertos. Con ello, se obtuvieron las señales proporcionales a la frecuencia y amplitud de la onda, el diagrama de ello se muestra en la figura 24.

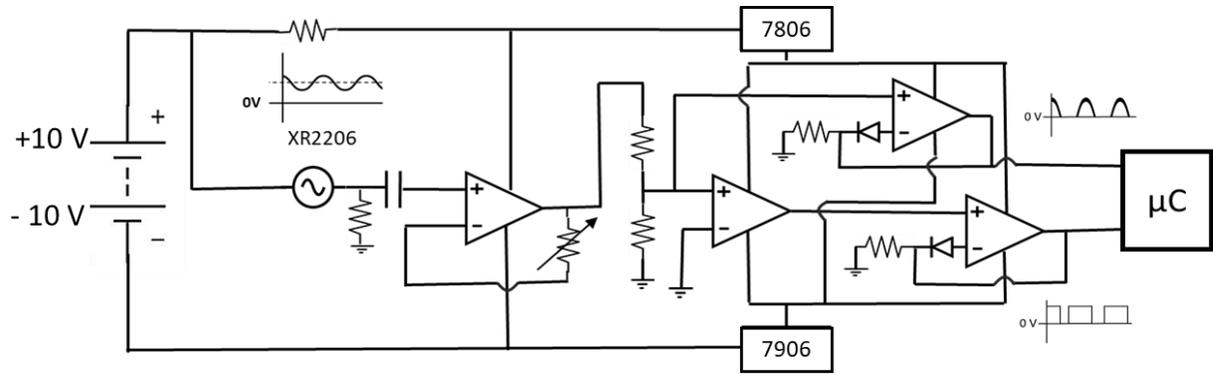


Fig. 24 Diagrama de la etapa de medición de frecuencia y amplitud

3.3.4 Etapa de amplificación

Una vez acondicionada y preamplificada la señal, se procedió a la etapa de amplificación de la misma. Primero se recurrió a la implementación de un amplificador de potencia de tipo b utilizando a los transistores 142 (NPN) y 147 (PNP) en un arreglo “push pull”, a continuación, dicha etapa se bifurcó para alimentar tanto a un woofer de 4 Ohms, 15 watts, 4 pulgadas de diámetro y un rango de operación de 0.1 Hz a 14 000 Hz, así como a un transformador en configuración de elevador de voltaje de 12 V de entrada y 110 V de salida, a este último fueron conectados a 2 electrodos de aluminio de 12 x 6 cm, los cuales fueron usados como instrumentos de estimulación eléctrica, clavándolos directamente en la tierra a diferentes distancias. El diagrama de esta última etapa se ilustra en la figura 25.

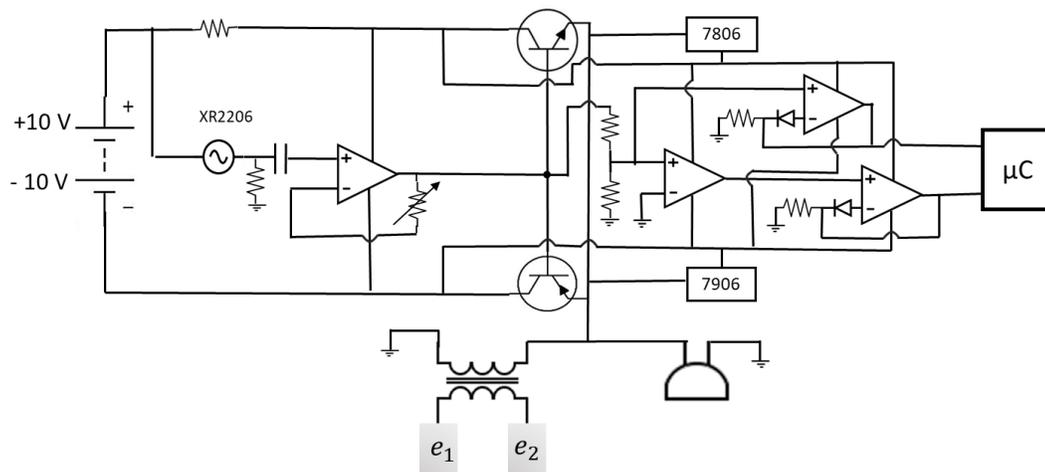


Fig. 25 Diagrama de la etapa de amplificación

La placa que contiene las etapas de acondicionamiento y preamplificación se muestra en la figura 26, mientras que en la figura 27, se muestra el dispositivo físico dentro de su respectiva caja impresa en PLA.

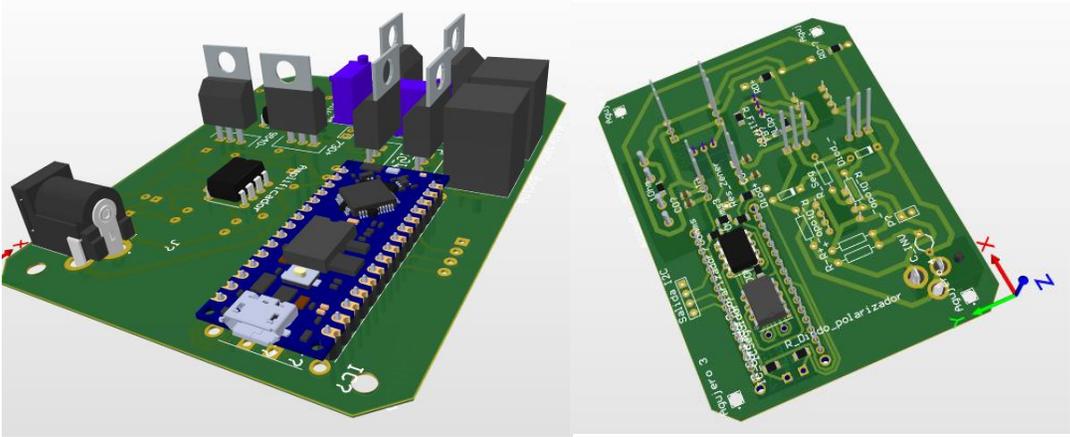


Fig. 26 Modelo 3D de la placa que comunica las etapas de acondicionamiento, preamplificación y de comunicación con el microcontrolador.

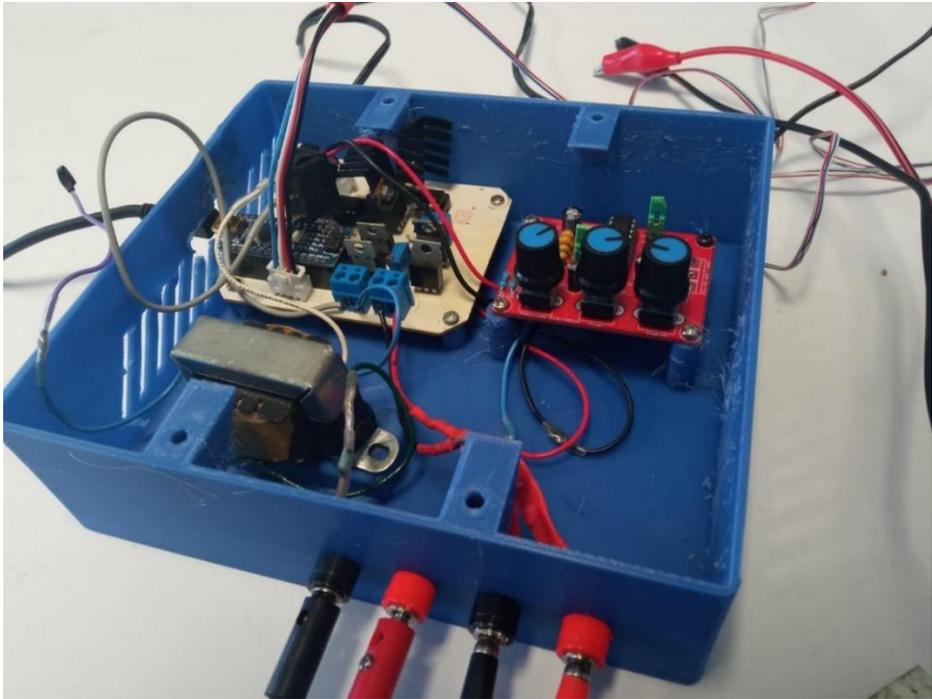


Fig. 27 Sistema de generador y amplificador de ondas y de comunicación de la matriz de sensores magnéticos con el microcontrolador

3.4 El microcontrolador y procesamiento de los datos

Una vez que cada uno de los 64 sensores fue multiplexado, cada respuesta fue interpretada por el microcontrolador ATMEGA328p (figura 28), de la empresa microchip utilizando la placa de desarrollo Arduino Nano.

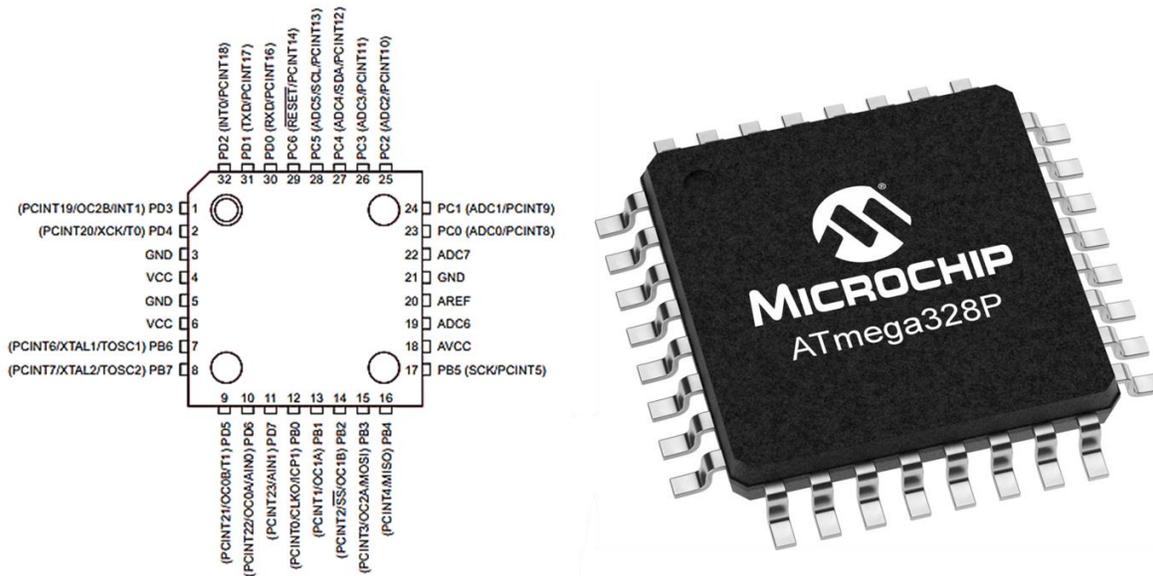


Fig. 28 Microcontrolador ATmega328P [96].

Algunas de las características del microcontrolador en cuestión de interés para este proyecto son [96]:

- CPU de arquitectura AVR.
- Oscilador interno de 8 MHz
- Memoria Flash de 32 kB
- Módulo de comunicación serial
- Conversor analógico a digital de 10 bits
- Capaz de entregar o recibir hasta 40 mA por pin
- Voltajes de operación de entre 1.8 y 5.5 V
- Consumo desde 19 mA
- 32 registros de propósito general y 23 configurables como de entrada o salida.

Para los fines de este proyecto se usaron los pines del protocolo I²C para recibir los datos de la matriz de sensores, uno de los canales analógico a digital (para la lectura de la señal proporcional a la amplitud del sistema de estimulación) y un pin digital (para la lectura de la frecuencia del sistema de amplificación) para detectar el voltaje y la frecuencia de las ondas de estímulo eléctrico y sonoro continuamente.

A pesar de que la velocidad de muestreo baja, de 10 a 2 Hz, el movimiento de las larvas es muy lento y la señal de interés no exige el uso de frecuencias altas, en este aspecto.

El diagrama del proceso de adquisición de datos y de medición de amplitud y frecuencias los estímulos de electricidad y sonido se presenta en la figura 28.

El procesamiento y visualización de los datos se desarrollaron en el software MATLAB R2020a de forma que cada 500 ms fue medido el campo magnético por los 64 sensores, los datos de frecuencia y amplitud del sistema de estimulación eléctrica y sonora, así como la fecha y hora de captura.

Para reducir la interferencia del fondo magnético terrestre (FMT) se calculó el valor de este tomando 10 capturas previas a la introducción de algún marcador, las cuales se promediaron y restaron a cada nuevo valor de cada sensor como se enuncia en la ecuación 3.

$$B_{(m,i)}(x, y) = B_{(m,1)}(x, y) - B_{(m,0)}(x, y) \quad (3)$$

Donde $B_{(m,0)}$ es el campo magnético de fondo terrestre en la posición, $B_{(m,1)}$ una nueva lectura posterior a la medición del FMT y $B_{(m,i)}$ el resultado de la substracción de ambos términos a cada momento i en la posición x, y . De esta forma, se obtuvo una respuesta uniforme en toda la matriz sin el FMT.

Finalmente, cada señal se acomodó en una matriz de 8x8 con posiciones correspondientes a las de los sensores de los que se obtuvo tal señal. De esta forma se generó un mapa de intensidades, con el cual fue posible determinar la posición de la marca magnética estimando las posiciones de trayecto en función de la posición de cada sensor, esto se puede apreciar en la figura 29.

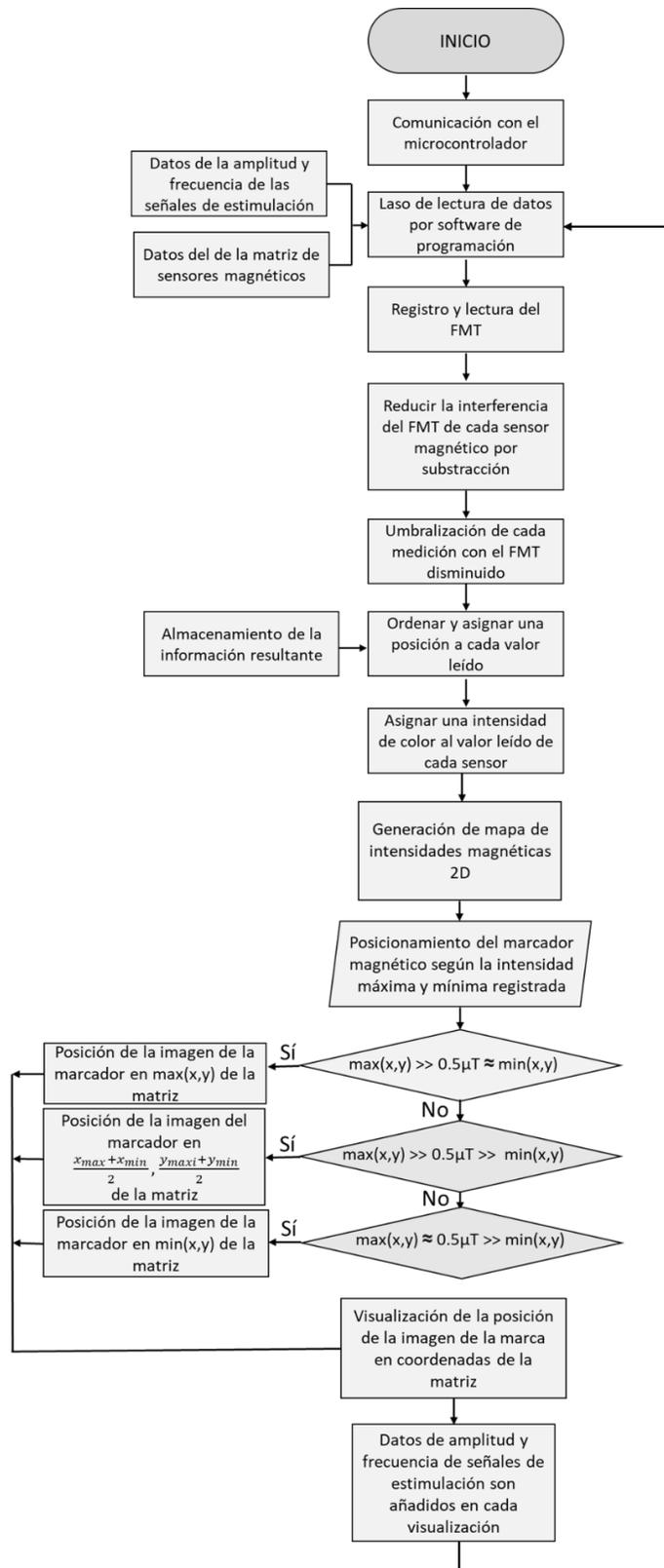


Fig. 29 Diagrama del flujo de procesamiento de las señales de los sensores y del sistema de estimulación eléctrica y sonora.

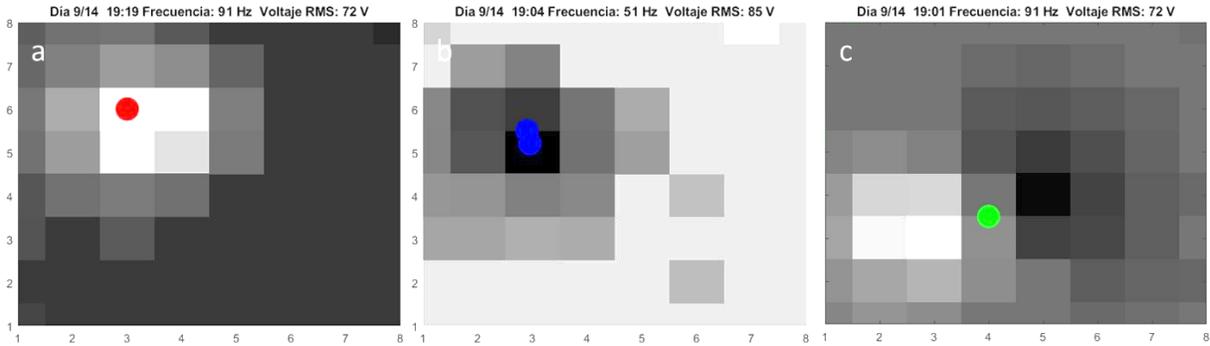


Fig. 30 Estimación de la posición del imán de acuerdo a la ubicación del sensor que detecta el valor de flujo magnético máximo (a), mínimo (b) o tanto mínimo como máximo (c).

Así mismo, en la figura 30 se muestra el mapa de intensidades de flujo magnético resultante de la lectura y procesamiento de la matriz, así como los valores de frecuencia y amplitud del sistema de aturdimiento. El mapa de intensidades se encuentra como fondo de manera únicamente ilustrativa, pues son las marcas de posicionamiento las de interés para monitorear el movimiento de los imanes bajo tierra que se representan como puntos en el pixel donde la intensidad es máxima, mínima o se encuentra entre las dos.

3.5 Recolección de larvas de escarabajo y adaptación de estas a condiciones de laboratorio.

Las larvas de escarabajo que se utilizaron en los experimentos se colectaron de sitios de composteo ubicados en el área del jardín biocultural (figura 31a) de viveros de Coyoacán, ubicado en las coordenadas $19^{\circ} 21' 15''$ N $99^{\circ} 10' 20''$ O (figura 31b). La tierra de donde se realizaron los muestreos de estos insectos se caracteriza por la alta carga orgánica compuesta por hojarasca, ramas, raíces y maleza podada que es almacenada por los responsables de dicho lugar en montículos cubiertos con mantos plásticos para preservar la humedad y favorecer la descomposición y reincorporación de los desechos orgánicos (figura 31d). En medios con alto contenido orgánico como en este caso, se han reportado buenas características de conducción del sonido [97] alcanzando desde los 107 a los 24 m/s y de la electricidad [98], esto principalmente debido a la alta retención de humedad y el tipo de porosidad que poseen. Se recolectaron en total 42 larvas de escarabajo a lo largo de 5 visitas, cada una de las cuales, fueron

clasificadas según su peso, tamaños y etapas de crecimiento como se puede consultar en el anexo B.

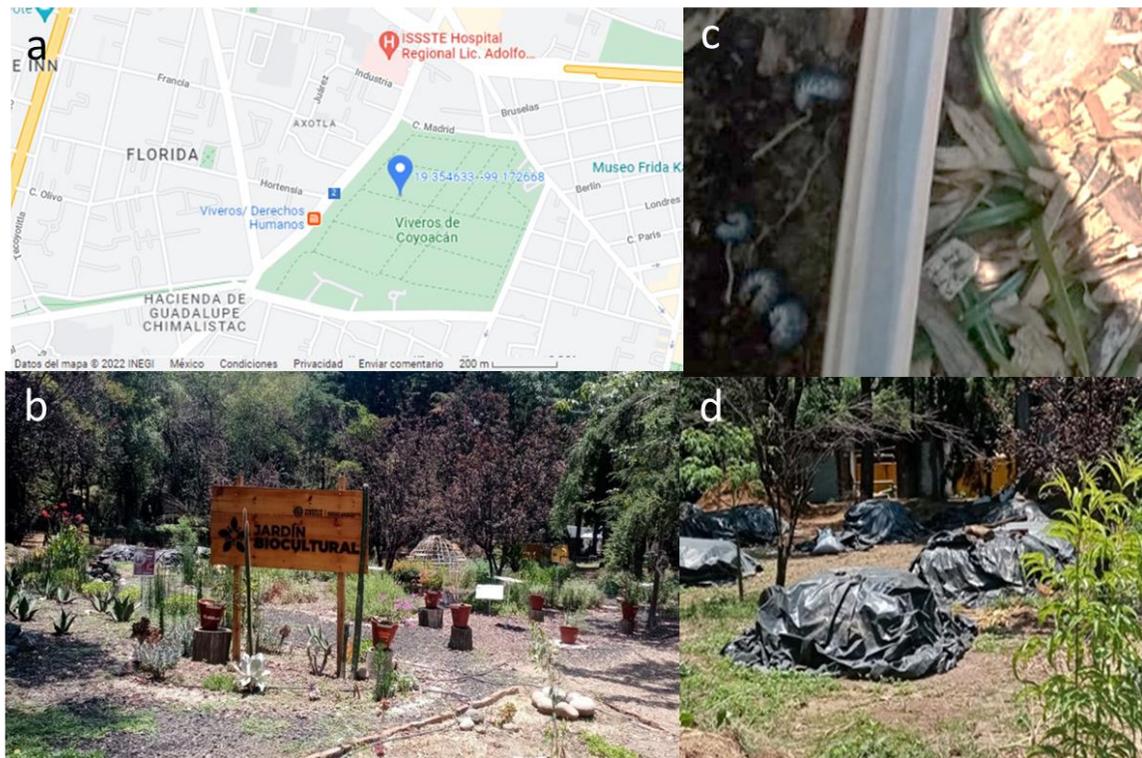


Fig. 31 Sitio de colecta de las larvas de escarabajo. a) Ubicación geográfica del recinto de muestreo “Viveros de Coyoacán”, b) Zona específica de muestreo “Jardín biocultural”, c) Algunos ejemplares muestreados d) Lugar en donde se reportó una alta presencia de larvas de escarabajo y designado para la recolección para no dañar a los cultivos.

Para el transporte y almacenamiento, se siguieron las recomendaciones descritas en [99], para lo cual, se recibió un curso de cría de escarabajos impartido por el Lic. Francisco Cuevas, responsable del centro de crianza “El escarabajario”, Zapopan, Jalisco. En dicho curso se impartieron desde los fundamentos básicos de cría de escarabajos en todas sus etapas, las acciones para prevenir y lidiar con las larvas que pudieran amenazar a los insectos, así como el establecimiento de espacios adecuados y las condiciones de temperatura, humedad y composición del sustrato para la cría.

Al transportar las larvas colectadas, se siguieron las recomendaciones de espacio y composición mínima del curso antes mencionado, esto para evitar agresiones o incluso canibalismo entre las larvas colectadas, así como para evitar el estrés del traslado en la medida de lo posible. Dichas recomendaciones, indican que debe haber una proporción 1:3 de sustrato por espacio libre, cubierto por una capa de ramas que no supere la mitad del espacio ocupado por el sustrato, además, se debe considerar un espacio mínimo de 3 unidades corporales de escarabajo adulto a lo largo y ancho por cada larva, dichas proporciones se esquematizan en la figura 32. Tomando en cuenta que los escarabajos adultos de la subfamilia Melolonthidae miden en promedio 2.2 cm de largo y 0.7 cm de alto, se establecieron los límites de la cantidad de larvas máximas por colecta y las dimensiones de los recipientes.



Fig. 32 Dimensiones y proporción de elementos recomendados para el traslado de escarabajos.

Finalmente, se optó por recipientes plásticos de 23 cm de largo, 20 cm de ancho y 16 cm de profundidad, en los que se transportaron no más de 10 larvas por recipiente con sus respectivos orificios de ventilación y de drenaje. La tierra o materia orgánica fue tomada directamente de las cercanías de donde se colectó cada larva, cuidando descartar tanto el espécimen como la tierra alrededor de larvas con indicios de algún tipo de patógeno o con una movilidad demasiado reducida para evitar así la contaminación del muestreo.

Una vez tomadas las muestras se procede a transportarlas al laboratorio lo más pronto posible, donde fueron pesadas y fotografiadas.

Con la finalidad de una mayor capacidad de almacenamiento y para favorecer la adaptación a condiciones más convenientes para las plantas en las que se probó la interacción, el almacenamiento de las larvas se consolidó en cajas de polipropileno de 30 cm de alto 45 cm de largo 38 cm de ancho con capacidad para hasta 23 larvas. La temperatura de la tierra, se reguló mediante un módulo de control de temperatura WI-209 (figura 33) de sensor NTC sumergible, configurado a un rango de 24 a 28 °C conectado a un foco incandescente de 250 W, esto proveyó tanto de calor como de luz al terrario que contuvo tanto larvas como plantas en crecimiento.

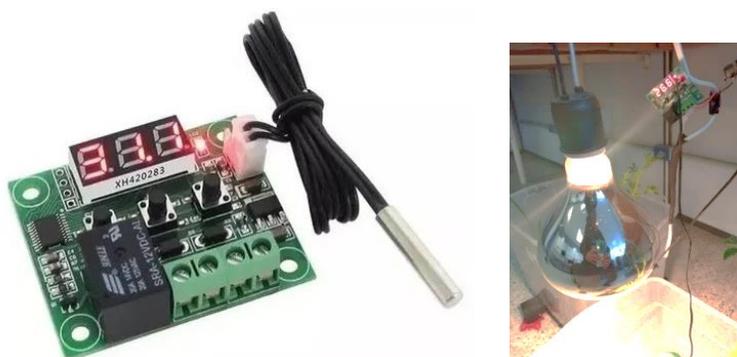


Fig. 33 Sistema de control de temperatura y luminosidad mediante el módulo de control de temperatura WI-209 y una bombilla de 250W.

El monitoreo de la humedad se realizó tres veces al día (10 am, 2pm y 6pm) cuidando que esta se encuentre entre 60 y 70% (parámetros recomendados para la crianza de larvas de escarabajos) utilizando el sensor “Soil tester” de la marca Tokwell (figura 34).



Fig. 34 Higrómetro de tierra “Soil tester” en funcionamiento para el control de humedad del terrario de crianza de larvas de escarabajos.

3.6 Especies vegetales utilizados

Para tener cultivos disponibles que funjan como atractores de las larvas de escarabajo, así como método de selección de especies rizófagas, fueron sembradas plantas maíz (*Zea mays*) y papa (*Solanum tuberosum* L). Estas plantas fueron seleccionadas al ser de ciclo rápido y de las que se ha reportado una alta vulnerabilidad al grupo de las gallinas ciegas, cuyo interés permanece latente en México [100, 101].

Las semillas de maíz, fueron adquiridas de paquetes comerciales de la marca “Vita” con la premisa de no incluir insecticidas o fertilizantes que puedan alterar el comportamiento de las larvas SM. Por otro lado, las papas fueron adquiridas en una tienda de conveniencia, a lo que se esperó a que dieran sus primeros brotes para ser sembradas.

En total se obtuvieron 10 plantas de maíz y 2 de papa, de las cuales 5 plantas de maíz y una de papa fueron usadas para alimentar a las larvas de escarabajo y el resto se utilizaron para las pruebas de estimulación eléctrica y sonora y fueron sembradas en un recipiente idéntico, pero sin la presencia de larvas (figura 35a). A diferencia del terrario de cría, este cuenta con dos soportes de madera sobre deslizadores de plástico (para evitar alguna posible interacción magnética con los soportes) y así poder ajustar la posición del terrario en función del movimiento de las larvas SM en caso de que estas se salgan del límite de detección de la matriz, las dimensiones del soporte se especifican en la figura 35b.

Por la fragilidad de las plántulas de maíz, se decidió trasplantar las semillas a penas germinaran al terrario de experimentación, en el cual se realizaron pruebas solo hasta que la germinado alcanzara los 10 cm de altura. Por otro lado, el cultivo de papa se trasladó al terrario de experimentación cuando los brotes emergieron de la tierra.

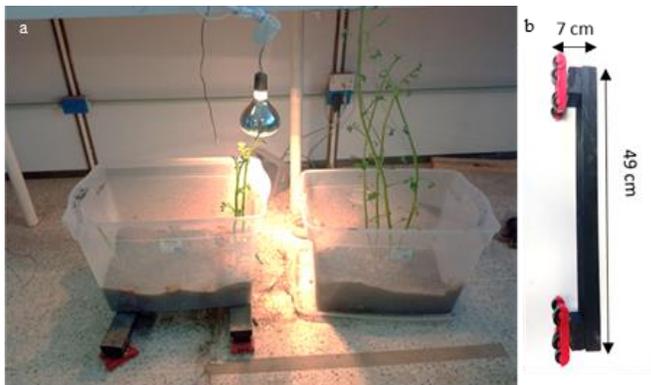


Fig. 35 a) Terrarios de experimentación (izquierda) y de cría de larvas (derecha) b) Dimensiones de las bases móviles para ajustar la posición del terrario.

3.7 Marcado de las larvas de la subfamilia *Melolonthinae*

Para poder monitorear las larvas de escarabajo bajo tierra fue necesario adherir los imanes de neodimio a estas, este procedimiento se consiguió utilizando pegamento dérmico a base de cianoacrilato. El imán fue adherido en el noveno segmento de la larva como se muestra en la figura 36, cuidando que el polo norte siempre apunte hacia arriba.

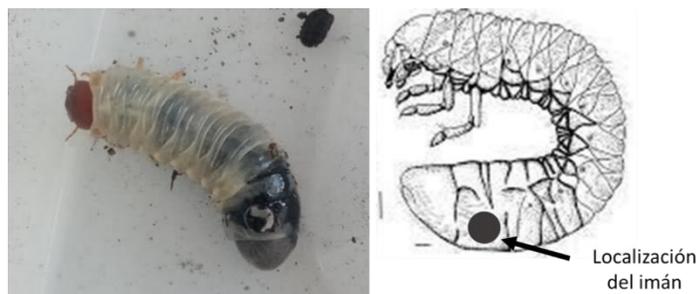


Fig. 36 Posición en la que se adhirió el imán de neodimio en el noveno segmento de las larvas con las que se experimentó.

Se consideró esta posición tomando en cuenta la menor movilidad de los pliegues, así como por ser el sitio donde almacena la tierra que ingiere, siendo donde al añadir peso resultaría menos estresante para el insecto.

4 Pruebas

4.1 Caracterización de los imanes

Para cerciorar que la densidad de flujo puede ser debidamente captado por la matriz de sensores magnéticos, es necesario caracterizar los imanes que se usarán como marcadores. Tomando en cuenta los 15 cm que suelen excavar los escarabajos y larvas de la subfamilia Melolonthinae por debajo de la tierra, como se señala en [32], es importante considerar estimaciones que cubran dicha longitud. A partir de la tabla 2, se sabe que los imanes N35 adquiridos tienen una fuerza de inducción remanente (B_r) de 1.17 a 1.22 Teslas.

De esta forma, podemos calcular la densidad de flujo magnético a una distancia Z empleando la ecuación 4, como se esquematiza en la figura 37 [102].

$$B_x = \frac{B_r}{2} \left[\frac{h+z}{\sqrt{r^2 + (h+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right] \quad (4)$$

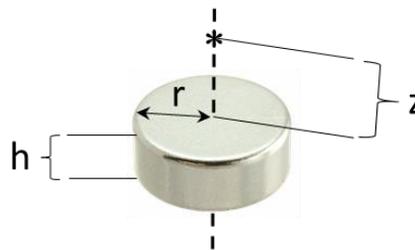


Fig. 37 Dimensiones relevantes para el cálculo del flujo magnético a una distancia z .

Donde:

B_r = Inducción residual del imán (véase en tabla 2).

h = grosor del imán

r = radio del imán

z = distancia a la que se desea saber la densidad del flujo magnético

De esta forma, podemos obtener los datos esperados de flujo magnético y compararlos con los valores medidos por un magnetómetro como se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Intensidad del flujo magnético calculado, medido y el error estándar de la media de 30 repeticiones

z (cm)	Valores calculados (μT)	Valores medidos con el sensor QMC5883L (μT)	Error estándar de la media (n = 30)
15	0.39	0.52	0.13
14	0.47	0.57	0.12
13	0.59	0.65	0.20
12	0.75	0.84	0.08
11	0.98	1.07	0.07
10	1.30	1.72	0.22
9	1.78	1.97	0.19
8	2.52	3.88	0.18
7	3.75	4.18	0.22
6	5.94	6.79	0.12
5	10.21	12.98	0.21
4	19.78	22.54	0.39
3	46.25	51.94	0.42
2	151.74	192.31	5.81
1	1107.88	1204.64	8.78

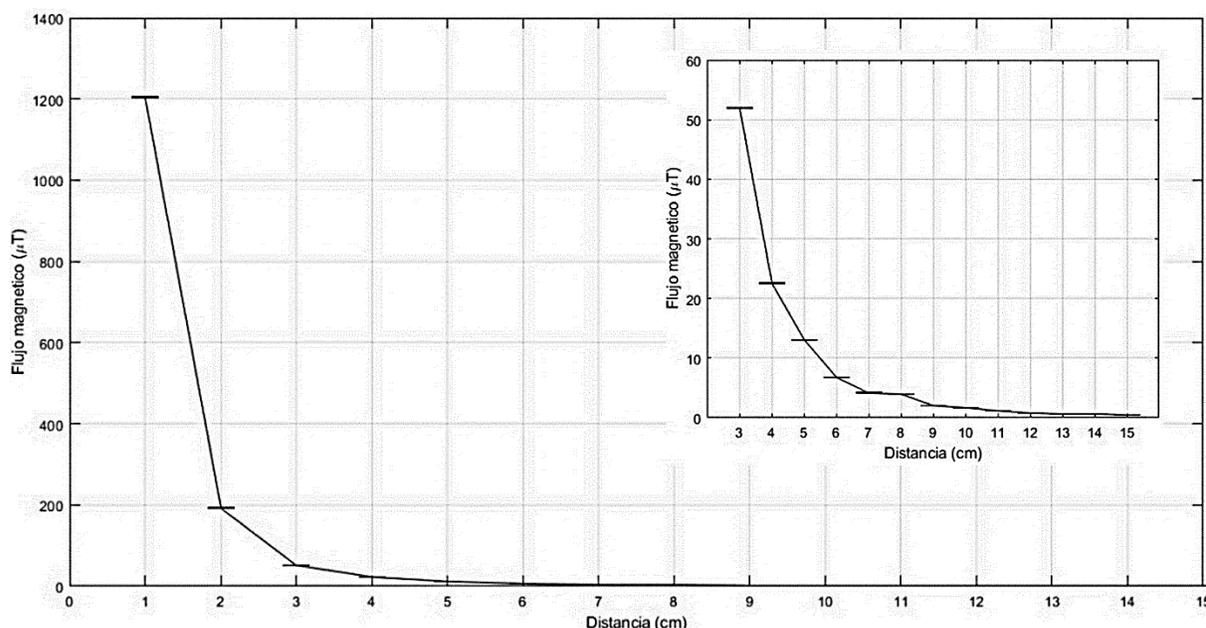


Fig. 38 Respuesta de los sensores QMC5883L al imán N35 seleccionado a diferentes alturas (1 cm -15 cm).

A partir de la figura 38 y la tabla 3, se evidencia la respuesta exponencial de los sensores ante el flujo magnético, así como el incremento del error estándar de la media conforme el imán se acerca a al sensor.

Para llevar a cabo estas mediciones se empleó el sensor magnetorresistivo QMC5883L que permite obtener los datos convertidos en unidades de mili Gauss (mG) con un offset de hasta \pm

10% [94], con lo que bastó con comparar los resultados obtenidos con los calculados por la geometría y características del imán de neodimio (figura 38), para reducir el offset y obtener mediciones bastante precisas.

Como se puede observar en la tabla 3, es posible obtener señales diferenciables del offset hasta los 15 centímetros, con valores de hasta 0.52 micro teslas, estando dentro del rango mínimo de medición de los sensores (5mG) [94], sin embargo, es necesario considerar también la interacción magnética del planeta, que es de 39.94 micro teslas para octubre de 2022 en la ciudad de México como reporta el Servicio Geológico Británico [103] y como se observa en la figura 39.



Fig. 39 Valores de los componentes vectoriales del campo magnético terrestre ubicado en la sección de bioelectrónica del CINVESTAV Zacatenco, adaptado de [103].

Los valores que se describen en la figura 39 indican las componentes vectoriales con los que se puede calcular la intensidad total del campo magnético detectado en ese momento, estos se abrevian con D para la declinación, I para la inclinación, X para la intensidad norte del campo magnético, Y para la este, H para la intensidad horizontal, Z para la vertical y F para la intensidad total. Las componentes vectoriales (X, Y, H, Z y F) están expresadas en micro teslas, mientras

que la declinación (D) e inclinación (I) se miden en ángulos. En cuanto a las fórmulas que establecen las relaciones entre las componentes vectoriales, se incluyen en el anexo C.

4.2 Precisión del posicionamiento de la marca magnética

Debido a que el posicionamiento de las lecturas que pueden realizarse con la matriz está limitado por el número y orden de los sensores, resultó necesario definir un método de focalización de los datos que permitiera determinar la ubicación de la marca magnética con precisión. De esta forma, se optó por promediar las coordenadas de ubicación del marcador magnético por cada nueve lecturas, consiguiendo una alta focalización de las coordenadas respectivas a los sensores en lapsos de menos de 10 segundos.

Para las pruebas de precisión de posicionamiento de campo magnético máximo, se utilizó una impresora 3D de la marca Creality, modelo Ender 5 debido a la facilidad con la que se pueden generar desplazamientos de hasta 0.1 mm con una alta precisión. Colocando la matriz de sensores por debajo de la boquilla, a la que se le adhirió un imán de neodimio con las características antes mencionadas, esto se puede apreciar en la figura 40.



Fig. 40 Determinación de la posición de marcas magnéticas con ayuda de impresora 3D, en la figura de la derecha se muestra el sistema y en el de la izquierda al extrusor con el imán adherido.

A continuación, fue accionando el desplazamiento programable centímetro a centímetro y tomando lecturas para comparar las posiciones en las que debía encontrarse el imán y la distancia en centímetros con respecto al origen, que se estableció como la esquina inferior izquierda de la matriz. En la figura 41 se aprecia la comparación entre el mapa de intensidades

magnéticas con la posición a la que se les atribuye de acuerdo a la posición o los sensores que detectan el valor máximo durante 10 segundos (20 lecturas). Los datos de error con respecto a la posición esperada y de dispersión a 7, 9, 11, 13 y 15 cm de altura, dando como resultado las desviaciones en cm que se presentan en la tabla 4.

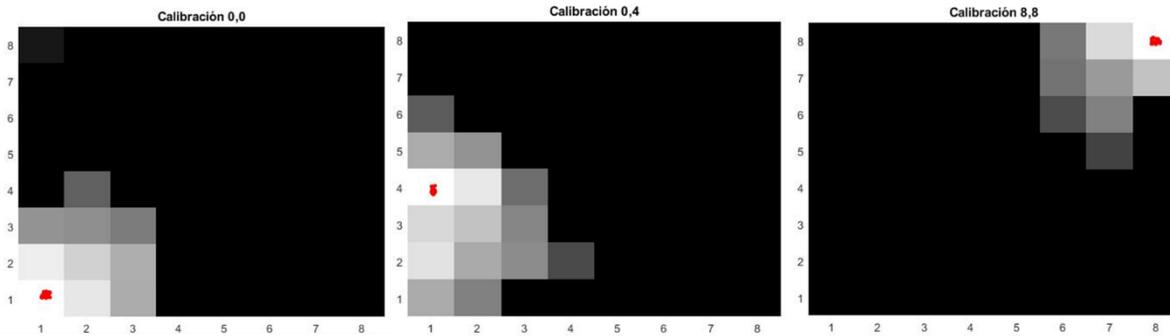


Fig. 41 Posiciones de las intensidades de flujo magnético captadas por la matriz al acercarle un imán de neodimio adherido al extrusor de la impresora 3D de la marca Creality modelo Ender 5 a 7cm de distancia.

Tabla 4. Desviación de la posición del objetivo a diferentes alturas (cm)

Altura	Coordenadas							
	(0,0)		(0,8)		(8,8)		(8,0)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
7	0.11±0.08	0.10±0.04	0.09±0.03	0.12±0.05	0.12±0.06	0.14±0.07	0.10±0.06	0.12±0.05
9	0.14±0.05	0.12±0.08	0.12±0.05	0.13±0.04	0.13±0.05	0.14±0.09	0.15±0.05	0.13±0.08
11	0.17±0.07	0.15±0.06	0.13±0.07	0.19±0.05	0.16±0.07	0.19±0.06	0.17±0.07	0.19±0.06
13	0.28±0.06	0.29±0.07	0.23±0.06	0.26±0.07	0.31±0.06	0.27±0.08	0.32±0.10	0.29±0.07
15	0.58±0.12	0.51±0.10	0.53±0.11	0.55±0.13	0.56±0.09	0.60±0.15	0.53±0.09	0.62±0.10

5 Resultados

5.1 Supervivencia de las larvas de escarabajo y adherencia de la marca magnética

La tasa de adaptación al terrario de almacenamiento de las larvas SM colectadas fue variada a lo largo de los muestreos, de 77.7 % a 87.5%, esto se debió principalmente a la pérdida de larvas muy jóvenes (4 casos), a la contaminación por *Beauveria* spp. (3 casos) o posiblemente no eran una especie rizófaga (se sospecha de 2 casos). En total, se pudieron hacer experimentos en 42 larvas de escarabajo.

A partir de las larvas que fueron marcadas magnéticamente, se pudo obtener un ejemplar adulto vivo (figura 42), el cual tiene una rugosidad en el élitro derecho, aunque esto pudiera atribuirse al marcado, también puede deberse a las condiciones de estrés a las que fue sometido. Por las características morfológicas, la temporada de captura de la larva (25 de mayo) y la zona en la que fue muestreado el ejemplar, se presume que se trata de un escarabajo del género *Phyllophaga*, uno de los géneros más comunes que compone al grupo “gallina ciega”. Las pruebas de adherencia del imán fallaron en 4 casos, por larvas que perdían el imán (3) o el caso de una larva que murió 3 días después de que se le haya adherido el imán.



Fig. 42 Perspectivas ventral, dorsal y lateral del escarabajo criado en el laboratorio 5, del que se presume pertenece al género *Phyllophaga*.

5.2 Estimulación eléctrica y sonora en larvas no marcadas con imanes

Para tener registros de la respuesta de las larvas SM sin marcar, se realizaron pruebas eléctricas y sonoras tan pronto fueron colectadas. Las pruebas de monitoreo ante estímulos sonoros mostraron un desplazamiento de las larvas hacia la bocina (la cual se encontraba enterrada a 19 cm de ambos lados de la parte corta del terrario, en donde se simboliza en la figura 43), en este caso, se marcó únicamente de manera superficial el sitio del terrario donde se encontraron a las larvas tras desenterrarlas cuidadosamente cada 10 minutos y aumentando la frecuencia sonora gradualmente de 20 a 1000 Hz.

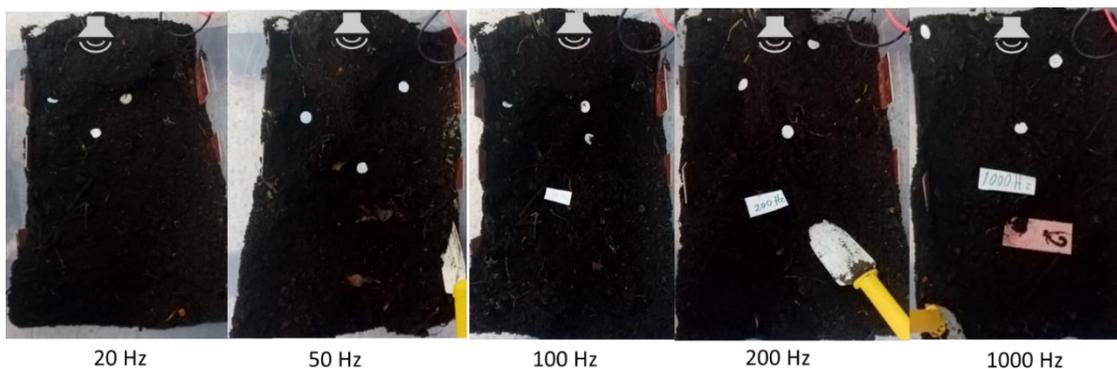


Fig. 43 Ubicación de 3 larvas de escarabajo tras la estimulación sónica a frecuencias de 20 Hz a 1000 Hz.

Por otro lado, el impacto eléctrico en las larvas de escarabajo se pudo percibir desde la superficie, de donde emergieron larvas de escarabajo aturcidas al aplicar corriente eléctrica de entre 48.66 V_{RMS} a 9.59 V_{RMS} y de 9.86 a 50 Hz, induciendo una corriente de 17 a 5 mA, enclavando los electrodos a una distancia de 38 cm de distancia entre sí, y a 22.5 cm de ambos extremos de la parte larga del terrario. El espécimen pudo volver a enterrarse a partir de los 9 V_{RMS} y 5.77 mA, sin embargo, al volver a aumentar el voltaje, este volvía a emerger. Este caso fue singular, debido a la cercanía a la que se encontraba en la larva a los electrodos, como se puede observar en la figura 44, sin embargo, sirvió de antecedente para fijar valores mínimos sobre los que se tuvo noción para estimular eléctricamente a las larvas SM.



Fig. 44 Larva SM siendo aturdida eléctricamente a 1 cm del electrodo, emergiendo a 48.5 VRMS (16 mA) y volviendo a enterrarse a 9.59 VRMS (5.77 mA)

5.3 Estimulación eléctrica y sonora en larvas marcadas con imanes

Conociendo los valores de voltaje y frecuencia en los que es posible aturdir a las larvas de escarabajo, se limitaron las pruebas monitoreadas bajo esos parámetros, consiguiendo así la evasión de la fuente de dichos estímulos incluso cuando se encontraban presentes cultivos de maíz y papa cerca, hacia los que se observó una reacción de atracción, sobre todo cuando la plántula había sido trasplantada al terrario de experimentación previamente.

Como se observa en la figura 45a, fue posible detectar el movimiento de larvas SM bajo tierra e incluso moverse tras ser estimuladas eléctricamente con los electrodos distanciados a 38 cm justo a la mitad de la parte larga del terrario, es decir, a 22.5 de ambos extremos (recuadros marrones), dicha larva se movió tanto tratando de evitar el paso de la corriente eléctrica, que rebasó los límites de la zona de que abarcaba la matriz de sensores (figura 45b), por lo que el terrario tuvo que ser movido 3 cm para poder volver a captar a la larva oculta.

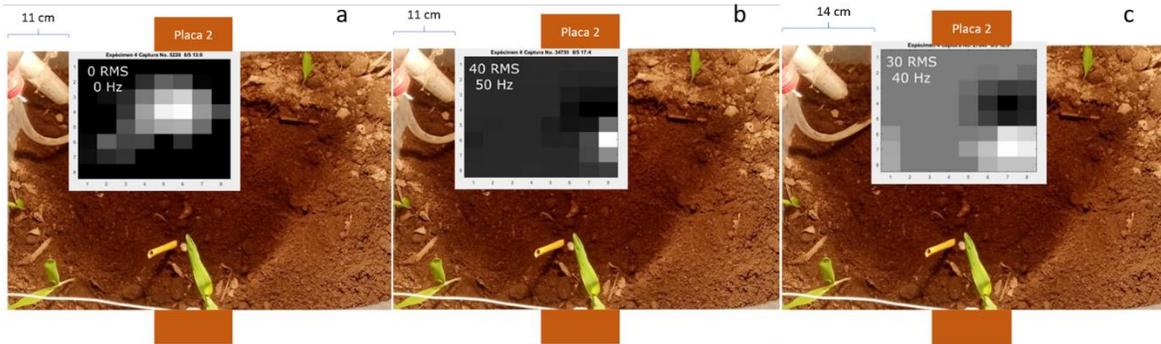


Fig. 45 Monitoreo del movimiento de una larva de escarabajo tras ser aturdida con electricidad. a) momento antes de la aplicación de corriente eléctrica, b) momento en el que la larva se aleja del área de estimulación eléctrica, c) momento en el que es movido el terrario 3 cm para poder volver a detectar a la larva de escarabajo con claridad.

5.4 Seguimiento de la larva ante estímulos intermitentes

Posteriormente, se implementó el algoritmo de posicionamiento descrito anteriormente con lo que la interpretación de la posición de las larvas se simplificó a una serie de puntos que podían acumularse, formándose un trazo, el cual fue ajustado a las dimensiones del terrario y de esta forma pudo interpretarse como la trayectoria de las larvas SM. En la figura 46, se muestra como la larva SM número 38 cambia su trayectoria tras percibir el cambio de frecuencia sonora de 60 Hz a 70 Hz, esto se repitió en el intervalo de frecuencias de entre 30 y 217 Hz, remarcándose en los cambios de frecuencia, hasta los 217 Hz, al final, la larva se colocó en la orilla del recipiente, permaneciendo allí hasta que fue desenterrada.



Fig. 46 Desplazamiento de una larva tras estimulación sonora a) a 60 Hz, b) a 70 Hz después de 2 minutos. El punto blanco indica la posición de la última toma c) a 217 Hz, después de 4 horas y 29 minutos de constante estimulación sonora. La bocina se posicionó a 19 cm de ambos lados de la parte corta como se simboliza.

Las pruebas de estimulación eléctrica fueron repetidas acercando los electrodos a las plántulas de maíz a una distancia de 15 cm sobre el extremo de la esquina inferior izquierda como se puede observar en la figura 47b. Tras un periodo de estabilización, en el que las larvas SM se adaptaron y aproximaron a las plántulas, fueron suministradas descargas eléctricas intermitentes a estas, observando no solo que la larva se alejaba de la plántula cuando se aplicaba corriente (90 V_{RMS} 116 Hz 32 mA), sino que esta regresaba a la plántula una vez que ocurría lo contrario.



Fig. 47 Trayectoria de la larva SM al ser estimulada eléctricamente a) periodo de adaptación, sin corriente b) se aplican 90 V a 116 Hz, la larva se retira de la fuente de alimento. El punto blanco indica la última posición hasta ese conjunto de tomas c) se apaga la corriente y se retiran los electrodos, la larva regresa a la plántula.

El experimento se replicó una vez más, pero usando una plántula de papa, que, debido a su grosor, pudo ser sostenida con un caimán directamente del tallo haciendo de terminal neutra del sistema de estimulación y colocando al electrodo de fase a 20 cm de distancia como se observa en la figura 48, con esto se observó que la estimulación eléctrica actuó como protección parcial de la planta, pues la larva SM permaneció alejada de la planta solo cuando se accionaba la energía eléctrica, mientras que cuando era apagada, la larva regresaba a las cercanías de la planta, de manera similar a con la plántula del maíz.

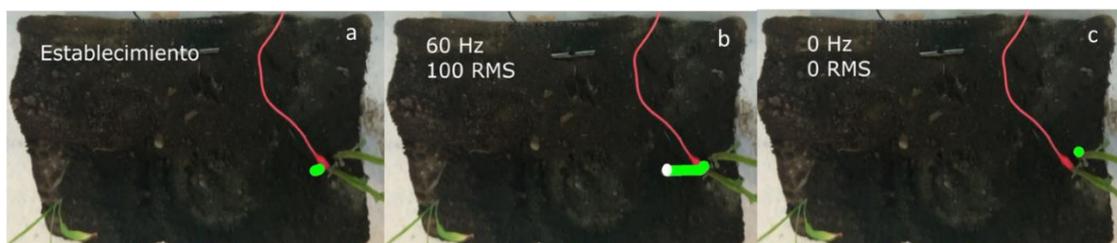


Fig. 48 Trayectoria de la larva SM al ser estimulada eléctricamente en presencia de una planta de patata de la cual uno de sus tallos fue conectado directamente al neutro del sistema de estimulación a) periodo de establecimiento, sin corriente b) se aplican 100 V a 60 Hz, la larva se retira de la fuente de alimento, el punto blanco indica la última posición hasta ese conjunto de tomas c) se apaga la corriente y se retiran los electrodos, la larva regresa a la plántula.

De esta forma, se integran los elementos de monitoreo y estimulación de las larvas SM, proponiéndose al marcado magnético de insectos subterráneos como una opción viable para establecer metodologías de estudio experimental de control de plagas de este tipo. Cabe mencionar que después de la experimentación con las larvas fue necesario sacrificarlas por medio de congelación, como es recomendado en [99] para evitar la reintroducción de estas al medio y terminar con el estrés que la estimulación sónica y eléctrica y el proceso de marcaje les pudo haber causado. Así mismo, las plantas en las que se hicieron experimentos se mantuvieron en observación por 2 semanas, en las que no presentaron signos de deterioro o marchitamiento.

6 Discusión

La proyección del campo magnético en imágenes bidimensionales ha permitido obtener información valiosa de las características ferromagnéticas de los materiales, sin embargo, recientemente, con la popularización de todo tipo de sensores al alcance comercial, como el caso de los magnetómetros AMR, ha sido posible explorar nuevas aplicaciones en dichas proyecciones para propósitos alejados de los convencionales pero que no dejan de ser ingeniosos, como se han propuesto en [91-93], trabajos en los que se incentiva la explotación de las capacidades de los sensores magnéticos en el área de la visión artificial.

Paralelamente, en el presente trabajo, se usó como herramienta a las imágenes de los campos magnéticos emitidos por un imán lo suficientemente pequeño como para ser portado por una larva de escarabajo, es decir, con ayuda de la visión artificial fue posible localizar y percibir el movimiento de un insecto debajo de la tierra, lo que suele ser un serio impedimento para los estudios entomológicos de estos insectos.

Para solventar este problema se ha recurrido a métodos altamente especializados, como es la tomografía computacional 3D [12], lo que habla de hasta dónde se puede llegar para detallar la vida de una larva.

Si bien, en el trabajo de Booth et al (2021) se obtuvieron imágenes de alto detalle del trayecto de la larva, pudiendo incluso diferenciar los espacios de aire que dejaban al moverse, las limitaciones que implican el uso de rayos X, sigue siendo un problema grave a considerar, sobre todo si de observar seres vivos de manera continua se trata, en contraste, el uso de métodos menos exigentes como los marcadores magnéticos, a pesar no aportar información del medio que rodea a la larva, si posee la ventaja de arrojar información de la posición de estas de manera continua, durante periodos prolongados sin dañar al espécimen o al usuario de la técnica, siendo una alternativa para profundizar en el comportamiento estos insectos ante estímulos de atracción o repulsión, como se exploró en este trabajo.

Un trabajo con bastante similitud a este, es el de Bont et al 2017, en el cual, por medio de detectores de metal, registraron la posición de larvas *M. melolonthidae* para determinar su reacción ante la presencia de ejemplares de *T. officinale* (diente de león) comunes y modificados genéticamente para que dejaran de producir un repelente [13]. Las larvas evitaron contacto con las plantas que emitían el repelente natural, pero solo parcialmente, pues después de un tiempo,

continuaron consumiendo las raíces de la planta, de manera similar, en este trabajo se observó que, ante impulsos eléctricos, las larvas de escarabajo eran aturdida, pero se reincorporaban a sus actividades rápidamente una vez cedía la descarga. Un caso similar ocurre con los piretinoides, pesticidas en vías de aprobación para la aplicación en larvas de escarabajo, el cual ha mostrado una acción reversible en larvas de *Agriotes sp.*, pues actúan bien cuando las concentraciones de estos son altas, pero al trasladar a la larva a un medio libre del pesticida, estos vuelven a la normalidad [62]. Estos resultados apuntan a que las larvas de escarabajo poseen una capacidad de adaptación notable y una tolerancia al estrés remarcable, por lo que resulta interesante la implementación de nuevas tecnologías que den luz al comportamiento de insectos subterráneos bajo condiciones de cultivo.

7 Conclusiones y perspectivas

Se diseñó e implementó un dispositivo capaz de determinar la posición y movimiento de un marcador magnético a partir de un arreglo de sensores magnetorresistivos, de forma tal que permite añadir bloques de sensores de manera versátil, así como permite hacer monitoreos de larga duración (26 horas) con una frecuencia de muestreo de 2Hz. El rastreo de la marca magnética permitió simplificar al conjunto de datos del mapa de intensidades de flujo magnético a puntos en un eje coordenado a la posición de los sensores, permitiendo establecer trayectorias, que permitieron agilizar el análisis del movimiento de las larvas SM.

Fue posible establecer un ambiente en el que las larvas de escarabajo pudieron permanecer hasta la experimentación e incluso, se pudo dar pie a la identificación taxonómica de un ejemplar que completó su metamorfosis, estimando que efectivamente se estuvo trabajando con larvas rizófagas de la subfamilia *Melolonthidae*.

Se determinó que las larvas con las que se estuvo trabajando reaccionan al sonido en el rango de frecuencias en un rango de entre 20 Hz y 1000 Hz y de electricidad, a partir de 10 V_{RMS} hasta 100 V_{RMS} y de 30 Hz a 217 Hz, variando su respuesta dependiendo de lo cerca que se encuentren a los electrodos y a las proporciones de la larva de estudio. Adicionalmente, ninguna planta mostró algún daño o marchitamiento después de la aplicación de los estímulos sónicos o eléctrico.

Se pudieron capturar las trayectorias de evasión a estímulos eléctricos y sonoros con el dispositivo de monitoreo de marcas magnéticas, consiguiendo determinar los rangos en los que las larvas interrumpen sus actividades herbívoras.

Con todo lo antes expuesto, se concluye que es viable marcar larvas SM y monitorear el movimiento de estas a profundidades de hasta 15 cm bajo tierra con los instrumentos mencionados en este trabajo, utilizando imanes de neodimio, los cuales son seguros para el ambiente, el usuario, incluso para la larva por periodos de 12 a 20 días si esta es etiquetada adecuadamente. Sin embargo, la aplicación de este método en condiciones experimentales de marcado de plagas hay detalles que se deben perfeccionar, por lo que se plantean las siguientes perspectivas:

- La implementación del sistema en áreas abiertas de cultivo.
- La experimentación con diferentes cultivos vegetales.

- La valoración de la trayectoria de distintas especies de insectos subterráneos en combinación a otros cultivos vegetales.
- El monitoreo interpolado de sensores más alejados entre sí para poder abarcar mayores áreas.
- El diseño de interfases gráficas portátiles que le permitan al dispositivo prescindir del procesamiento de una PC.
- Diseñar un dispositivo inalámbrico similar al propuesto en este trabajo, con la posibilidad de recorrer la superficie de sembradíos a cielo abierto.
- Plantear maneras diversas de estimular a los insectos, sin limitarse a los ya expuestos en este trabajo.

8 Referencias

- [1] L. P. Pedigo, M. E. Rice, and R. K. Krell, *Entomology and pest management*: Waveland Press, 2021.
- [2] K. J. Boote, W. D. Batchelor, J. W. Jones, H. Pinnschmidt, and G. Bourgeois, "Pest damage relations at the field level," *Systems approaches for agricultural development: Proceedings of the International Symposium on Systems Approaches for Agricultural Development, 2–6 December 1991, Bangkok, Thailand*, F. P. de Vries, P. Teng and K. Metselaar, eds., pp. 277-296, Dordrecht: Springer Netherlands, 1993.
- [3] J. C. Polanco Mendoza, and C. L. Miceli Méndez, *Patogenicidad de aislamientos nativos de hongos entomopatógenos sobre el complejo gallina ciega (Coleoptera: melolonthidae) de Los Altos de Chiapas, México*, 2008.
- [4] J. Ruiz, E. Bravo, G. Ramírez, A. Báez, M. Álvarez, J. Ramos, U. Nava, and K. Byerly, "Plagas de importancia económica en México: aspectos de su biología y ecología," *J Libro Técnico*, no. 2, pp. 256, 2013.
- [5] I. Nyamwasa, K. Li, A. Rutikanga, D. Rukazambuga, S. Zhang, J. Yin, C. Ya-Zhong, X. Zhang, and X. Sun, "Soil insect crop pests and their integrated management in East Africa: a review," *J Crop Protection*, vol. 106, pp. 163-176, 2018.
- [6] J. R. Hagler, and C. G. Jackson, "Methods for marking insects: current techniques and future prospects," 2001.
- [7] S. N. Johnson, M. Erb, and S. E. Hartley, "Roots under attack: contrasting plant responses to below-and aboveground insect herbivory," *J New Phytologist*, vol. 210, no. 2, pp. 413-418, 2016.
- [8] P. Kapse, R. Ahire, P. J. J. o. P. Deshmukh, and Phytochemistry, "Knowledge and adoption of integrated management of white grub among the farmers," vol. 7, no. 5, pp. 1100-1103, 2018.
- [9] C.-M. Görres, and D. Chesmore, "Active sound production of scarab beetle larvae opens up new possibilities for species-specific pest monitoring in soils," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, pp. 10115, 2019/07/12, 2019.
- [10] R. Mankin, D. Hagstrum, M. Guo, P. Eliopoulos, and A. Njoroge, "Automated Applications of Acoustics for Stored Product Insect Detection, Monitoring, and Management," *Insects*, vol. 12, no. 3, Mar 19, 2021.
- [11] B. Wang, Y. Mao, I. Ashry, Y. Al-Fehaid, A. Al-Shawaf, T. K. Ng, C. Yu, and B. S. Ooi, "Towards Detecting Red Palm Weevil Using Machine Learning and Fiber Optic Distributed Acoustic Sensing," *Sensors (Basel)*, vol. 21, no. 5, Feb 25, 2021.
- [12] S. Booth, B. Kurtz, M. I. de Heer, S. J. Mooney, and C. J. Sturrock, "Tracking wireworm burrowing behaviour in soil over time using 3D X-ray computed tomography," *J Pest Management Science*, vol. 76, no. 8, pp. 2653-2662, 2020.
- [13] Z. Bont, C. Arce, M. Huber, W. Huang, A. Mestrot, C. J. Sturrock, and M. Erb, "A herbivore tag-and-trace system reveals contact-and density-dependent repellence of a root toxin," *J Journal of Chemical Ecology*, vol. 43, no. 3, pp. 295-306, 2017.
- [14] M. Fedrizzi, M. Pagano, M. Guerrieri, R. Tomasone, S. Musmeci, S. Arnone, R. Sasso, M. Cristofaro, F. Antonucci, and E. Santangelo, "Electrocution and containment methods to reduce the activity of red palm weevil (*Rhynchophorus ferrugineus*, Ol.)," *Spanish journal of agricultural research*, vol. 18, no. 4, pp. 10, 2020.
- [15] K. Niamouris, and P. Psirofonia, "Preliminary study in the use of electric current for the control of *Rhynchophorus ferrugineus*," *ENTOMOLOGIA HELLENICA*, vol. 23, no. 2, pp. 52-58, 2014.
- [16] Y. Matsuda, Y. Takikawa, and T. Nonomura, "Selective electrostatic eradication of *Sitophilus oryzae* nesting in stored rice," *J Food Technol Pres*, vol. 1, no. 2, pp. 15-20, 2018.
- [17] A. P. Jinham, S. Kiruba, J. T. T. Kumaran, and S. S. M. Das, "Efficacy of audible sound waves in Inflicting Tissue Damage and Mortality in *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) Larvae," *Agricultura Tropica et Subtropica*, vol. 45, no. 1, pp. 32-36, 2012.
- [18] G. I. Sokol, T. S. Molnar, and A. V. Sokol, "Acoustic Method of Colorado Beetle Elimination: Experimental Results," *New Trends in Physical Science Research Vol. 7*, pp. 61-72, 07/22, 2022.

- [19] D. J. Horn, "Ecological Measures," *Insect Pest Management: Techniques for Environmental Protection*, pp. 3-7, Boca Raton NY: CRC Lewis Publishers, 2000.
- [20] V. Stern, R. Smith, R. van den Bosch, and K. Hagen, "The integration of chemical and biological control of the spotted alfalfa aphid: the integrated control concept," *Hilgardia*, vol. 29, no. 2, pp. 81-101, 1959.
- [21] L. G. Higley, and L. P. Pedigo, *Economic thresholds for integrated pest management*: U of Nebraska Press, 1996.
- [22] S. Prasad, R. Prasad, M. Yadav, A. Kumar, and Jeyakumari, *Evolving Concepts of Integrated Pest Management*, p. 7, Dhanbad, India: Parmar Publications, 2022.
- [23] D. Dent, and R. H. Binks, "Yield Loss," *Insect pest management*, pp. 48-80, NY, United States: Cabi, 2020.
- [24] G. L. Cramer, "An introduction to The Routledge Handbook of Agricultural Economics," *The Routledge Handbook of Agricultural Economics*, pp. 1-9: Routledge, 2018.
- [25] C. B. Barrett, and D. R. Just, *Handbook of agricultural economics*: Elsevier, 2022.
- [26] D. Onstad, *Economics of host-plant resistance*: CABI International, 2019.
- [27] C. Mejia, and N. Mesa, *Entomología económica y manejo de plagas*: Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- [28] J. Ruiz, E. Bravo, G. Ramírez, A. D. Báez, M. Álvarez, J. Ramos, U. Nava, and K. Byerl, "Plagas de importancia económica en México: aspectos de su biología y ecología," *Libro Técnico*, no. 2, 2013.
- [29] S. A. Agroasemex. "Las plagas producen pérdidas de hasta un 40 por ciento en la producción agrícola, revela estudio de la FAO.," 26 de noviembre, 2021; <https://www.gob.mx/agroasemex/articulos/las-plagas-producen-perdidas-de-hasta-un-40-por-ciento-en-la-produccion-agricola-revela-estudio-de-la-fao?idiom=es>.
- [30] G. A. Lugo-García, M. Á. Morón, M. Aragón-Sánchez, Á. Reyes-Olivas, B. H. Sánchez-Soto, and C. P. Saucedo-Acosta, "Especies de "gallina ciega"(Coleoptera: Melolonthidae) en el cultivo de ajonjolí (*Sesamum indicum* L.) en Sinaloa, México," *J Agrobiología*, vol. 51, no. 7, pp. 799-811, 2017.
- [31] M. A. Morón, "Larvas de escarabajos del suelo en México (Coleoptera: Melolonthidae)," *Acta Zoológica Mexicana*, pp. 111-130, 2001.
- [32] D. A. Potter, and D. W. Held, "June Beetles," *Encyclopedia of insects*, V. H. Resh and R. T. Cardé, eds., pp. 540-541, London, United Kingdom: Academic press, 2009.
- [33] A. Marín Jarillo, and R. Bujanos Muñiz, "Especies del complejo "gallina ciega" del género *Phyllophaga* en Guanajuato, México," *Agricultura técnica en México*, vol. 34, no. 3, pp. 349-355, 2008.
- [34] J. L. Capinera, "Soil Inhabitants: Root-Infesting Insects," *Encyclopedia of entomology*, J. L. Capinera, ed., Springer Science & Business Media, 2008, pp. 3971-3972.
- [35] M. A. Pavao-Zuckerman, "Soil Ecology," *Encyclopedia of Ecology (Second Edition)*, B. Fath, ed., pp. 600-605, Oxford: Elsevier, 2008.
- [36] J. L. Capinera, *Encyclopedia of entomology*, p. 2293-2298: Springer Science & Business Media, 2008.
- [37] W. Schroeder, W. Mitchell, and R. Miyabara, "Dye-induced changes in melon fly behavior," *J Environmental entomology*, vol. 3, no. 3, pp. 571-571, 1974.
- [38] R. Gast, and M. J. J. o. E. E. Landin, "Adult boll weevils and eggs marked with dye fed in larval diet," vol. 59, no. 2, pp. 474-475, 1966.
- [39] D. Dent, and R. H. Binks, *Sampling, monitoring and forecasting*: CABI International, 2020.
- [40] A. T. Showler, "Marking Insects for Studying Ecology and Behavior," *Encyclopedia of Entomology*, J. L. Capinera, ed., Springer Netherlands, 2008, pp. 2293-2298.
- [41] R. L. McIntosh, "Technique for labeling individual *Pissodes strobi* (Coleoptera: Curculionidae) for mark-recapture studies," *J The Canadian Entomologist*, vol. 131, no. 1, pp. 131-136, 1999.
- [42] T. Southwood, "Absolute population estimates using marking techniques," *Ecological methods*, pp. 70-129: Springer, 1978.
- [43] R. Gast, and M. Landin, "Adult boll weevils and eggs marked with dye fed in larval diet," *J Journal of Economic Entomology*, vol. 59, no. 2, pp. 474-475, 1966.
- [44] O. Lindig, G. Wiygul, J. E. Wright, J. Dawson, and J. Roberson, "Rapid method for mass-marking boll weevils," *J Journal of Economic Entomology*, vol. 73, no. 3, pp. 385-386, 1980.

- [45] H. Graham, and C. Mangum, "Larval diets containing dyes for tagging pink bollworm moths internally," *J Journal of Economic Entomology* vol. 64, no. 2, pp. 376-379, 1971.
- [46] J. Coppedge, J. Spencer, H. Brown, C. Whitten, J. Snow, and J. Wright, "A new dye marking technique for the screwworm," *J Journal of Economic Entomology*, vol. 72, no. 1, pp. 40-42, 1979.
- [47] W. B. Showers, R. B. Smelser, A. J. Keaster, F. Whitford, J. F. Robinson, J. D. Lopez, and S. E. J. E. E. Taylor, "Recapture of marked black cutworm (Lepidoptera: Noctuidae) males after long-range transport," vol. 18, no. 3, pp. 447-458, 1989.
- [48] R. J. Argauer, and W. Cantelo, "Spectrofluorometric Determination of Fluorescein-Tagged Tobacco Hornworms," *J Journal of Economic Entomology*, vol. 65, no. 2, pp. 539-542, 1972.
- [49] D. Akey, J. Hayes, and S. Fleischer, *Use of elemental markers in the study of arthropod movement and trophic interactions*: Southwestern Entomological Society, 1991.
- [50] W. Berry, M. Stimmann, and W. Wolf, "Marking of native phytophagous insects with rubidium: a proposed technique," *J Annals of the Entomological Society of America*, vol. 65, no. 1, pp. 236-238, 1972.
- [51] M. Stimmann, "Marking insects with rubidium: imported cabbageworm marked in the field," *J Environmental Entomology*, vol. 3, no. 2, pp. 327-328, 1974.
- [52] E. S. Dantas, R. Gurgel-Gonçalves, R. Maciel-de-Freitas, and F. A. Monteiro, "Simultaneous external and internal marking of *Triatoma sordida* nymphs: trace element efficacy and microgeographic dispersal in a peridomestic Brazilian Cerrado rural household," *Parasites & Vectors*, vol. 15, no. 1, pp. 325, 2022/09/14, 2022.
- [53] S. Fleischer, J. Bridges, F. Ravlin, and W. Thoeny, "Elemental marking in deciduous and coniferous tree systems," *J Supplement to the southwestern entomologist*, 1991.
- [54] L. Guillebeau, J. All, F. Nutter Jr, and C. J. J. o. E. S. Kuhn, "Comparison of foliar and soil-drench applications of aqueous rubidium chloride solutions to plants for marking feeding aphids (Homoptera: Aphidae)," vol. 28, no. 4, pp. 370-375, 1993.
- [55] N. E. Gary, "Magnetic retrieval of ferrous labels in a capture-recapture system for honey bees and other insects," *Journal of Economic Entomology*, vol. 64, no. 4, pp. 961-965, 1971.
- [56] J. Hayes, and K. Hopper, "Trace element labelling of *Heliothis* spp: labelling of individual eggs from moths reared on treated host plants."
- [57] S. Fleischer, M. Gaylor, N. Hue, and L. Graham, "Uptake and elimination of rubidium, a physiological marker, in adult *Lygus lineolaris* (Hemiptera: Miridae)," *J Annals of the Entomological Society of America*, vol. 79, no. 1, pp. 19-25, 1986.
- [58] A. Corbett, B. C. Murphy, J. A. Rosenheim, and P. Bruins, "Labeling an egg parasitoid, *Anagrus epos* (Hymenoptera: Mymaridae), with rubidium within an overwintering refuge," *J Environmental Entomology*, vol. 25, no. 1, pp. 29-38, 1996.
- [59] O. A. Fernandes, R. J. Wright, K. H. Baumgarten, and Z. Mayo, "Use of rubidium to label *Lysiphlebus testaceipes* (Hymenoptera: Braconidae), a parasitoid of greenbugs (Homoptera: Aphididae), for dispersal studies," *J Environmental entomology*, vol. 26, no. 5, pp. 1167-1172, 1997.
- [60] J. Cheshire Jr, A. Keaster, R. Ward, and S. Koirtzohann, "Seed treatment with rubidium for monitoring wireworm (Coleoptera: Elateridae) feeding on corn," *J Environmental entomology*, vol. 16, no. 2, pp. 475-480, 1987.
- [61] D. E. Legg, and H. Chiang, "Rubidium marking technique for the European corn borer (Lepidoptera: Pyralidae) in corn," *J Environmental entomology*, vol. 13, no. 2, pp. 579-583, 1984.
- [62] C. Ritter, and E. Richter, "Control methods and monitoring of *Agriotes* wireworms (Coleoptera: Elateridae)," *Journal of Plant Diseases and Protection*, vol. 120, no. 1, pp. 4-15, 2013/02/01, 2013.
- [63] N. Schallhart, M. J. Tusch, K. Staudacher, C. Wallinger, and M. Traugott, "Stable isotope analysis reveals whether soil-living elaterid larvae move between agricultural crops," *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 43, no. 7, pp. 1612-1614, 2011/07/01/, 2011.
- [64] W. G. van Herk, R. S. Vernon, and S. McGinnis, "Response of the dusky wireworm, *Agriotes obscurus* (Coleoptera: Elateridae), to residual levels of bifenthrin in field soil," *J Journal of pest science*, vol. 86, no. 1, pp. 125-136, 2013.

- [65] B. M. Quinby, J. C. Creighton, and E. A. Flaherty, "Stable isotope ecology in insects: a review," *J Ecological Entomology*, vol. 45, no. 6, pp. 1231-1246, 2020.
- [66] S. N. Johnson, J. W. Crawford, P. J. Gregory, D. V. Grinev, R. W. Mankin, G. J. Masters, P. J. Murray, D. H. Wall, and X. Zhang, "Non-invasive techniques for investigating and modelling root-feeding insects in managed and natural systems," *J Agricultural Forest Entomology*, vol. 9, no. 1, pp. 39-46, 2007.
- [67] A. Showler, R. Knaus, and T. Reagan, "The versatility of radiotracer methods for studying insect ethology and ecology," *J Florida Entomologist*, pp. 554-580, 1988.
- [68] D. Ettelt, "Conception et fabrication d'un magnétomètre à jauge de contrainte," Grenoble, 2012.
- [69] D. Murzin, D. J. Mapps, K. Levada, V. Belyaev, A. Omelyanchik, L. Panina, and V. Rodionova, "Ultrasensitive magnetic field sensors for biomedical applications," *J Sensors*, vol. 20, no. 6, pp. 1569, 2020.
- [70] H. Hadi, and N. Vahid, "Magnetoresistive Sensors," *Magnetic Sensors for Biomedical Applications*, pp. 57-111: IEEE, 2020.
- [71] H. Hadi, and N. Vahid, "Magnetic Sensors Based on Hall Effect," *Magnetic Sensors for Biomedical Applications*, pp. 33-56: IEEE, 2020.
- [72] J. Cui, J. Ormerod, D. Parker, R. Ott, A. Palasyuk, S. McCall, M. P. Paranthaman, M. S. Kesler, M. A. McGuire, I. C. Nlebedim, C. Pan, and T. Lograsso, "Manufacturing Processes for Permanent Magnets: Part I—Sintering and Casting," *JOM*, vol. 74, no. 4, pp. 1279-1295, 2022/04/01, 2022.
- [73] R. Cervantes-Osornio, R. A. Ramírez, L. V. C. Mota, W. Ojeda-Bustamante, and O. R. Álvarez, "PRONÓSTICO DE TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS MENSUALES, CON SERIES DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN 09071, EN CDMX."
- [74] E. Mands, B. Sanner, U. G. D. E. Mands, and D.-G. M. J. A. Sauer, Editorial UbeG, "Energía geotérmica a poca profundidad," 2010.
- [75] J. Cui, M. Kramer, L. Zhou, F. Liu, A. Gabay, G. Hadjipanayis, B. Balasubramanian, and D. Sellmyer, "Current progress and future challenges in rare-earth-free permanent magnets," *Acta Materialia*, vol. 158, pp. 118-137, 2018/10/01/, 2018.
- [76] C. Yuksel, S. Ankarali, and N. A. Yuksel, "The use of neodymium magnets in healthcare and their effects on health," *North Clin Istanbul*, vol. 5, no. 3, pp. 268-273, Sep, 2018.
- [77] J. Ormerod, "Permanent magnet markets and applications," *Modern Permanent Magnets*, J. Croat and J. Ormerod, eds., pp. 403-434, Tennessee, (USA): Woodhead Publishing, 2022.
- [78] R. Smith, R. Van den Bosch, W. Kilgore, and R. Douth, "Pest Control: Biological, Physical, and Selected Chemical Methods," Academic Press New York, 1967, pp. 295-340.
- [79] R. Prokopy, and M. Kogan, "Integrated pest management," *Encyclopedia of insects*, pp. 523-528: Elsevier, 2009.
- [80] J. E. Rechcigl, and N. A. Rechcigl, *Insect pest management: techniques for environmental protection*: CRC Press, 2016.
- [81] B. Vernon, and W. van Herk, "Chapter 7 - Wireworms as pests of potato," *Insect Pests of Potato (Second Edition)*, A. Alyokhin, S. I. Rondon and Y. Gao, eds., pp. 103-148: Academic Press, 2022.
- [82] C. A. Edwards, *Ecologically based use of insecticides*: Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 2000.
- [83] C. Vincent, G. Hallman, B. Panneton, and F. Fleurat-Lessard, "Management of agricultural insects with physical control methods," *Annual review of entomology*, vol. 48, no. 1, pp. 261-281, 2003.
- [84] K. Thakur, A. Sharma, and K. Sharma, "Management of agricultural insect pests with physical control methods," 2021.
- [85] G. F. y. D. Flagler, "Method and apparatus for eradicating soil borne pests", US 2003/0150156 A1, Agosto 14, 2003.
- [86] J. Garcia-Paniagua, "Method of exterminating insect and animal agricultural pests from infected objects such as plants", US 3 826 035, July 30, 1974.
- [87] W. N. Hess, "The Chordotonal Organs and Pleural Discs of Cerambycid Larvae," *Annals of the Entomological Society of America*, vol. 10, no. 1, pp. 63-74, 1917.
- [88] J. Victorsson, and L.-O. Wikars, "Sound production and cannibalism in larvae of the pine-sawyer beetle *Monochamus sutor* L.(Coleoptera: Cerambycidae)," *Entomologisk Tidskrift*, vol. 117, no. 1-2, pp. 29-33, 1996.

- [89] N. C. Aflitto, and R. W. Hofstetter, "Use of acoustics to deter bark beetles from entering tree material," *Pest Manag Sci*, vol. 70, no. 12, pp. 1808-14, Dec, 2014.
- [90] R. W. Hofstetter, D. D. Dunn, R. McGuire, and K. A. Potter, "Using acoustic technology to reduce bark beetle reproduction," *Pest Manag Sci*, vol. 70, no. 1, pp. 24-7, Jan, 2014.
- [91] C.-W. Liang, E. Balaban, E. Ahmad, Z. Zhang, J. Sexton, and M. Missous, "A real time high sensitivity high spatial resolution quantum well hall effect magnetovision camera," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 265, pp. 127-137, 2017/10/01/, 2017.
- [92] D. Rahmawati, D. Danudirdjo, and A. B. Suksmono, "Magnetic Imaging System Based on HMC5883L Sensor Array." pp. 1-5.
- [93] A. B. Suksmono, D. Danudirdjo, A. D. Setiawan, D. Rahmawati, and R. P. Prastio, "A Magnetic Field Camera for Real-Time Subsurface Imaging Applications," vol. 11, no. 8, pp. 3302, 2021.
- [94] Q. S. T. Corporation, "3-Axis Magnetic Sensor QMC5883L," Feb. 2016.
- [95] A. LLC. "Magnetic-properties," Oct 11, 2022; <https://allianceorg.com/magnetic-materials/>.
- [96] M. Inc. "8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash," Oct, 2022; www.microchip.com/en-us/product/ATmega328P#document-table.
- [97] M. L. Oelze, W. D. O'Brien, and R. G. J. S. S. o. A. J. Darmody, "Measurement of attenuation and speed of sound in soils," vol. 66, no. 3, pp. 788-796, 2002.
- [98] K. A. Klein, J. C. J. J. o. E. Santamarina, and E. Geophysics, "Electrical conductivity in soils: Underlying phenomena," vol. 8, no. 4, pp. 263-273, 2003.
- [99] V. Caltzontzin-Rabell, H. Romero-Zepeda, C. Gutiérrez-Antonio, J. F. García-Trejo, and A. A. Feregrino-Pérez, "Perspectiva ética sobre el uso de insectos en proyectos de investigación," *J Digital Ciencia*, vol. 14, no. 2, pp. 60-69, 2021.
- [100] S. Cruz-Esteban, E. Garay-Serrano, and J. Rojas, "Una gallina ciega, pero voraz <https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000006253.pdf>," *ELEMENTOS*, vol. 28, pp. 41-44, 07/02, 2021.
- [101] M. Mateos-Escudero, H. M. Guzmán-Vásquez, S. Lozano-Trejo, J. A. Sánchez-García, and M. I. Pérez-León, "White grub adults associated with maize (*Zea Mays* L.) at zaachila, Oaxaca, Mexico," *J Southwestern Entomologist*, vol. 46, no. 3, pp. 709-724, 2021.
- [102] J. D. Walecka, "The Magnetic Force and Field," *Introduction to Electricity and Magnetism*, U. College of William and Mary, ed., pp. 101-110, Virginia, Estados Unidos: World Scientific Publishing Company Pte Limited, 2018.
- [103] B. G. Survey. "International Geomagnetic Reference Field (IGRF), 13th Generation Calculator," Oct., 2022; https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/igrf_calc.html.

Apendices

Apéndice A. Variables y gráficas para el cálculo del producto de la energía estática de un imán N35.

Es preciso señalar las variables necesarias para dar con el producto de energía estática abreviado BH, el cual en una curva de desmagnetización (ubicada en el segundo cuadrante de un lazo de histéresis, figura A1) puede ubicarse donde el producto de la densidad de flujo magnético (B) y el campo magnético externo debido a la permeabilidad (H) es máximo para un volumen de imán necesario para proyectar una energía dada mínimo. Sus unidades, como se ha mencionado, son Mega Gauss Oersteds o bien kJ/m^3 , este valor puede ligarse al potencial de energía magnetostática por unidad de volumen del material.

La inducción residual (B_r) por otro lado es el punto de flujo magnético máximo (B) y de campo magnético mínimo en la curva de desmagnetización, mientras que en el bucle de histéresis, es el punto en el que esta es tangente al eje B. Esta constante es proporcional a la fuerza máxima que se puede obtener de un imán.

La fuerza coercitiva (H_c) por el contrario, es la fuerza de desmagnetización que se necesita para obtener un flujo de inducción (B) mínimo una vez que se alcanza la saturación del imán.

La fuerza intrínseca coercitiva (H_{c_j}) es proporcional a la estabilidad térmica y de condiciones de operación dinámica, es decir, es la capacidad del inherente del material a resistir la desmagnetización.

La temperatura de alineación paralela de los momentos magnéticos elementales (T) es aquella en que se incapacita al material a sostener la magnetización.

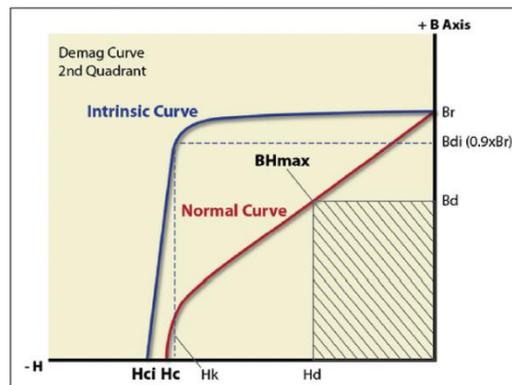


Fig. A1 Lazo de histéresis característico de un imán y la ubicación del producto de energía estática.

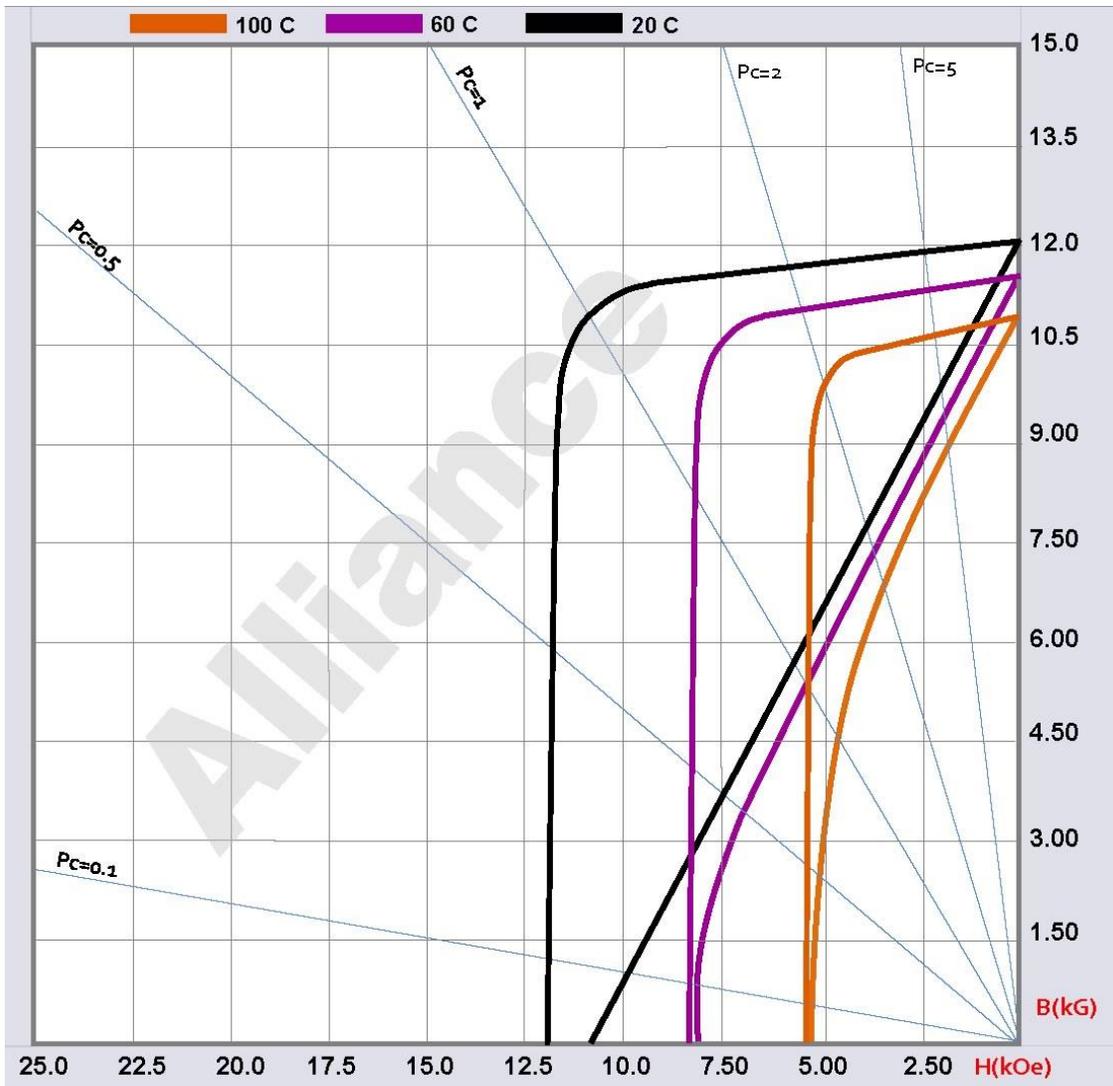


Fig. A2 Lazo de histéresis característico de un imán de neodimio N35

Apéndice B. Medidas y pesos de las larvas colectadas

No.	Etapa larvaria	Peso (g)	Ancho (cm)	Largo (cm)	Supervivencia
1	L1	0.4	0.2	1.1	80%
2	L1	0.5	0.3	1.3	
3	L2	1.5	1.00	2.1	
4	L2	1.9	1.2	2.3	
5	L3	2.5	1.3	3.0	
6	L3	2.8	1.5	3.3	
7	L3	2.9	1.6	4.9	
8	L3	3.2	1.7	4.6	
9	L3	3.4	1.8	5.4	
10	L3	3.4	1.9	5.4	
11	L1	0.1	0.3	1.2	87.5
12	L2	1.51	0.78	3.2	
13	L2	1.55	0.97	3.4	
14	L2	1.91	1.26	4.1	
15	L3	2.60	1.35	4.5	
16	L3	2.97	1.52	4.8	
17	L3	3.17	1.70	5.5	
18	L3	3.47	1.86	3.2	
19	L3	3.5	1.9	4.7	
20	L1	0.2	0.64	2.3	85.7%
21	L2	1.52	0.81	2.7	
22	L2	1.90	1.03	3.3	
23	L2	2.33	1.27	3.4	
24	L3	2.79	1.42	4.2	
25	L3	3.03	1.59	4.5	
26	L3	3.34	1.71	5.4	
27	L3	3.63	1.92	5.5	
28	L2	0.9	0.7	3.7	83.3%
29	L3	3.6	1.3	4.2	
30	L2	1.0	0.8	3.2	
31	L2	1.1	0.6	3.8	
32	L3	3.5	1.9	4.7	
33	L3	3.2	1.3	4.1	
34	L2	0.8	0.7	3.2	77.7%
35	L2	1.2	0.6	3.8	
36	L3	2.8	1.9	4.9	
37	L3	2.9	1.9	4.9	
38	L3	3.2	1.3	4.1	
39	L3	3.3	1.6	5.4	
40	L3	3.4	1.6	5.4	
41	L3	3.5	1.9	4.7	
42	L3	3.5	1.9	4.7	

Apéndice C. Fórmulas y nomenclatura de los componentes del campo magnético

Las componentes del campo magnético se abrevian y describen de la siguiente manera, mientras que, en la figura C1, se muestra la distribución de los vectores:

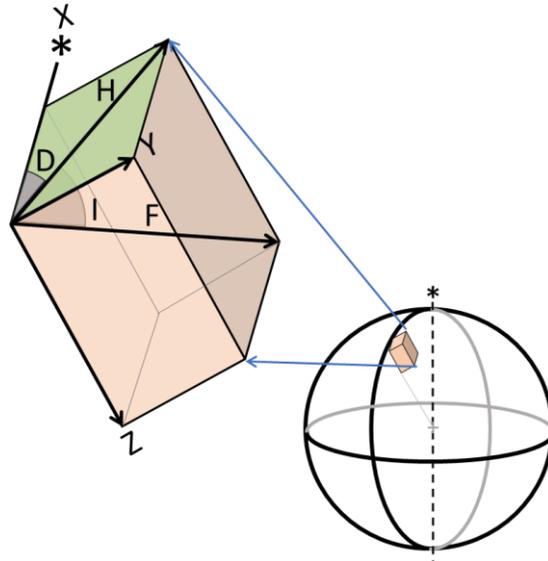


Fig C1. Distribución vectorial de los componentes del campo magnético terrestre.

F = Intensidad total del vector del campo magnético.

H = El componente horizontal del vector del campo magnético.

Z = El componente vertical del vector del campo magnético, por convención, siempre es positivo hacia abajo.

X = El componente norte del campo magnético.

Y = El componente este del campo magnético

D = La declinación magnética, definida como el ángulo entre el norte verdadero y el componente horizontal del campo medido hacia el este desde el norte.

I = Inclinación magnética, definida como el ángulo medido del plano horizontal al vector del campo magnético, hacia abajo es positivo.

Para describir completamente el campo magnético resultante se requieren de al menos tres componentes vectoriales de este, que pueden ser:

X, Y, Z, tres componentes ortogonales.

F, D, I la fuerza magnética total y dos ángulos.

H, Z, D dos componentes de fuerza y un ángulo.

Las relaciones entre estos componentes se pueden generalizar en las siguientes fórmulas.

$$D = \tan^{-1}(Y/X)$$

$$I = \tan^{-1}(Z/H)$$

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$Y = H \cos(D)$$

$$Y = H \sin(D)$$

$$E = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

Cabe mencionar que la declinación y la inclinación se miden en grados, mientras que el resto de elementos se miden en nT (10^{-7} G).

Apéndice D. Programa de adquisición de los datos del microcontrolador

Programa para la adquisición de datos obtenidos por protocolo I²C de cada uno de los sensores y de la frecuencia y amplitud del sistema de estimulación.

```
-----  
//Matriz  
#include <Wire.h> Wire.write(highByte(mask)); Wire.beginTransmission(TCA  
#include <Adafruit_Sensor.h> Wire.endTransmission(); ADDR4);  
#include Wire.beginTransmission(TCA Wire.write(highByte(mask));  
<Adafruit_HMC5883_U.h> ADDR4); Wire.endTransmission(); Wire.beginTransmission(TCA  
#include <MechaQMC5883.h> Wire.write(highByte(mask)); ADDR5);  
#include <FreqCount.h> Wire.endTransmission(); Wire.write(highByte(mask));  
  
#define TCAADDR0 0x70 Wire.beginTransmission(TCA Wire.endTransmission();  
#define TCAADDR1 0x71 ADDR5); Wire.write(highByte(mask));  
#define TCAADDR2 0x72 Wire.write(highByte(mask)); Wire.endTransmission();  
#define TCAADDR3 0x73 Wire.endTransmission(); Wire.beginTransmission(TCA  
#define TCAADDR4 0x74 ADDR6);  
#define TCAADDR5 0x75 Wire.beginTransmission(TCA Wire.write(highByte(mask));  
#define TCAADDR6 0x76 ADDR6); Wire.write(highByte(mask));  
#define TCAADDR7 0x77 Wire.endTransmission(); Wire.endTransmission();  
  
//Amplitud Wire.beginTransmission(TCA  
int maxVal = 0; Wire.beginTransmission(TCA ADDR7);  
uint32_t lastSample = 0; Wire.write(highByte(mask)); Wire.write(highByte(mask));  
 Wire.endTransmission(); delay(1);  
 Wire.endTransmission();  
  
//Frecuencia }  
#define pulse_ip 5 void tcselect2(uint8_t sensor) {  
int ontime,offtime,duty; unsigned int mask = 1 <<  
float freq,period; sensor;  
 if (sensor > 7) return;  
  
void tcselect0(uint8_t sensor) { Wire.beginTransmission(TCA  
 unsigned int mask = 1 << ADDR0);  
sensor; Wire.write(highByte(mask));  
 if (sensor > 7) return; Wire.endTransmission();  
  
Wire.beginTransmission(TCA Wire.beginTransmission(TCA  
ADDR0); Wire.write(highByte(mask)); ADDR1);  
 Wire.write(lowByte(mask)); Wire.write(highByte(mask));  
 Wire.endTransmission(); Wire.endTransmission();  
  
Wire.beginTransmission(TCA Wire.beginTransmission(TCA  
ADDR1); Wire.write(lowByte(mask)); ADDR2);  
 Wire.write(highByte(mask)); Wire.write(lowByte(mask));  
 Wire.endTransmission(); Wire.endTransmission();  
  
Wire.beginTransmission(TCA Wire.beginTransmission(TCA  
ADDR2); Wire.write(highByte(mask)); ADDR3);  
 Wire.write(highByte(mask)); Wire.write(highByte(mask));  
 Wire.endTransmission(); Wire.endTransmission();  
  
Wire.beginTransmission(TCA Wire.write(highByte(mask));  
ADDR3); Wire.endTransmission(); Wire.endTransmission();
```

```

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR4);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR5);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR6);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR7);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();
delay(1);
}

void tcselect3(uint8_t sensor) {
  unsigned int mask = 1 <<
sensor;
  if (sensor > 7) return;

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR0);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR1);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR2);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR3);
Wire.write(lowByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR4);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR5);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR6);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR7);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();
delay(1);
}

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR4);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();
delay(1);
}

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR6);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

void tcselect5(uint8_t sensor) {
  unsigned int mask = 1 <<
sensor;
  if (sensor > 7) return;

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR0);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR1);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR2);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR3);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR4);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR5);
Wire.write(lowByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR6);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(TCA
ADDR7);
Wire.write(highByte(mask));
Wire.endTransmission();
delay(1);
}

void tcselect6(uint8_t sensor) {

```


FreqCount.begin(1000);		qmc37.init();
	tcselect1(2);	tcselect6(1);
tcselect0(0);	qmc19.init();	qmc38.init();
qmc1.init();	tcselect1(3);	
	qmc20.init();	tcselect6(2);
tcselect0(1);		qmc39.init();
qmc2.init();	tcselect3(1);	
	qmc21.init();	tcselect6(3);
tcselect0(2);		qmc40.init();
qmc3.init();	tcselect3(0);	
	qmc22.init();	tcselect4(4);
tcselect0(3);		qmc41.init();
qmc4.init();	tcselect3(2);	
	qmc23.init();	tcselect4(5);
tcselect2(0);		qmc42.init();
qmc5.init();	tcselect3(3);	
	qmc24.init();	tcselect4(6);
tcselect2(1);		qmc43.init();
qmc6.init();	tcselect1(5);	
	qmc25.init();	tcselect4(7);
tcselect2(2);		qmc44.init();
qmc7.init();	tcselect1(4);	
	qmc26.init();	tcselect6(4);
tcselect2(3);		qmc45.init();
qmc8.init();	tcselect1(6);	
	qmc27.init();	tcselect6(5);
tcselect0(4);		qmc46.init();
qmc9.init();	tcselect1(7);	
	qmc28.init();	tcselect6(6);
tcselect0(5);		qmc47.init();
qmc10.init();	tcselect3(5);	
	qmc29.init();	tcselect6(7);
tcselect0(6);		qmc48.init();
qmc11.init();	tcselect3(4);	
	qmc30.init();	tcselect5(1);
tcselect0(7);		qmc49.init();
qmc12.init();	tcselect3(6);	
	qmc31.init();	tcselect5(0);
tcselect2(4);		qmc50.init();
qmc13.init();	tcselect3(7);	
	qmc32.init();	tcselect5(2);
tcselect2(5);		qmc51.init();
qmc14.init();	tcselect4(0);	
	qmc33.init();	tcselect5(3);
tcselect2(6);		qmc52.init();
qmc15.init();	tcselect4(1);	
	qmc34.init();	tcselect7(1);
tcselect2(7);		qmc53.init();
qmc16.init();	tcselect4(2);	
	qmc35.init();	tcselect7(0);
tcselect1(1);		qmc54.init();
qmc17.init();	tcselect4(3);	
	qmc36.init();	tcselect7(2);
tcselect1(0);		qmc55.init();
qmc18.init();	tcselect6(0);	

```

tcselect7(3);
qmc56.init();

tcselect5(5);
qmc47.init();

tcselect5(4);
qmc58.init();

tcselect5(6);
qmc59.init();

tcselect5(7);
qmc60.init();

tcselect7(5);
qmc61.init();

tcselect7(4);
qmc62.init();

tcselect7(6);
qmc63.init();

tcselect7(7);
qmc64.init();
}

void loop() {

//Matriz

sensors_event_t event;

int xq1,yq1,zq1;
tcselect0(0);

qmc1.read(&xq1,&yq1,&zq1);

int xq2,yq2,zq2;
tcselect0(1);

qmc2.read(&xq2,&yq2,&zq2);

int xq3,yq3,zq3;
tcselect0(2);

qmc3.read(&xq3,&yq3,&zq3);

int xq4,yq4,zq4;
tcselect0(3);

qmc4.read(&xq4,&yq4,&zq4);

int xq5,yq5,zq5;
tcselect2(0);

qmc5.read(&xq5,&yq5,&zq5);

int xq6,yq6,zq6;
tcselect2(1);

qmc6.read(&xq6,&yq6,&zq6);

int xq7,yq7,zq7;
tcselect2(2);

qmc7.read(&xq7,&yq7,&zq7);

int xq8,yq8,zq8;
tcselect2(3);

qmc8.read(&xq8,&yq8,&zq8);

int xq9,yq9,zq9;
tcselect0(4);

qmc9.read(&xq9,&yq9,&zq9);

int xq10,yq10,zq10;
tcselect0(5);

qmc10.read(&xq10,&yq10,&zq10);

int xq11,yq11,zq11;
tcselect0(6);

qmc11.read(&xq11,&yq11,&zq11);

int xq12,yq12,zq12;
tcselect0(7);

qmc12.read(&xq12,&yq12,&zq12);

int xq13,yq13,zq13;
tcselect2(4);

qmc13.read(&xq13,&yq13,&zq13);

int xq14,yq14,zq14;
tcselect2(5);

qmc14.read(&xq14,&yq14,&zq14);

int xq15,yq15,zq15;

tcselect2(6);

qmc15.read(&xq15,&yq15,&zq15);

int xq16,yq16,zq16;
tcselect2(7);

qmc16.read(&xq16,&yq16,&zq16);

int xq17,yq17,zq17;
tcselect1(1);

qmc17.read(&xq17,&yq17,&zq17);

int xq18,yq18,zq18;
tcselect1(0);

qmc18.read(&xq18,&yq18,&zq18);

int xq19,yq19,zq19;
tcselect1(2);

qmc19.read(&xq19,&yq19,&zq19);

int xq20,yq20,zq20;
tcselect1(3);

qmc20.read(&xq20,&yq20,&zq20);

int xq21,yq21,zq21;
tcselect3(1);

qmc21.read(&xq21,&yq21,&zq21);

int xq22,yq22,zq22;
tcselect3(0);

qmc22.read(&xq22,&yq22,&zq22);

int xq23,yq23,zq23;
tcselect3(2);

qmc23.read(&xq23,&yq23,&zq23);

int xq24,yq24,zq24;
tcselect3(3);

```

qmc24.read(&xq24,&yq24,&zq24);	qmc33.read(&xq33,&yq33,&zq33);	qmc42.read(&xq42,&yq42,&zq42);
int xq25,yq25,zq25; tcselect1(5);	int xq34,yq34,zq34; tcselect4(1);	int xq43,yq43,zq43; tcselect4(6);
qmc25.read(&xq25,&yq25,&zq25);	qmc34.read(&xq34,&yq34,&zq34);	qmc43.read(&xq43,&yq43,&zq43);
int xq26,yq26,zq26; tcselect1(4);	int xq35,yq35,zq35; tcselect4(2);	int xq44,yq44,zq44; tcselect4(7);
qmc26.read(&xq26,&yq26,&zq26);	qmc35.read(&xq35,&yq35,&zq35);	qmc44.read(&xq44,&yq44,&zq44);
int xq27,yq27,zq27; tcselect1(6);	int xq36,yq36,zq36; tcselect4(3);	int xq45,yq45,zq45; tcselect6(4);
qmc27.read(&xq27,&yq27,&zq27);	qmc36.read(&xq36,&yq36,&zq36);	qmc45.read(&xq45,&yq45,&zq45);
int xq28,yq28,zq28; tcselect1(7);	int xq37,yq37,zq37; tcselect6(0);	int xq46,yq46,zq46; tcselect6(5);
qmc28.read(&xq28,&yq28,&zq28);	qmc37.read(&xq37,&yq37,&zq37);	qmc46.read(&xq46,&yq46,&zq46);
int xq29,yq29,zq29; tcselect3(5);	int xq38,yq38,zq38; tcselect6(1);	int xq47,yq47,zq47; tcselect6(6);
qmc29.read(&xq29,&yq29,&zq29);	qmc38.read(&xq38,&yq38,&zq38);	qmc47.read(&xq47,&yq47,&zq47);
int xq30,yq30,zq30; tcselect3(4);	int xq39,yq39,zq39; tcselect6(2);	int xq48,yq48,zq48; tcselect6(7);
qmc30.read(&xq30,&yq30,&zq30);	qmc39.read(&xq39,&yq39,&zq39);	qmc48.read(&xq48,&yq48,&zq48);
int xq31,yq31,zq31; tcselect3(6);	int xq40,yq40,zq40; tcselect6(3);	int xq49,yq49,zq49; tcselect5(1);
qmc31.read(&xq31,&yq31,&zq31);	qmc40.read(&xq40,&yq40,&zq40);	qmc49.read(&xq49,&yq49,&zq49);
int xq32,yq32,zq32; tcselect3(7);	int xq41,yq41,zq41; tcselect4(4);	int xq50,yq50,zq50; tcselect5(0);
qmc32.read(&xq32,&yq32,&zq32);	qmc41.read(&xq41,&yq41,&zq41);	qmc50.read(&xq50,&yq50,&zq50);
int xq33,yq33,zq33; tcselect4(0);	int xq42,yq42,zq42; tcselect4(5);	int xq51,yq51,zq51; tcselect5(2);

```

qmc51.read(&xq51,&yq51,&zq
51);

int xq52,yq52,zq52;
tcselect5(3);

qmc52.read(&xq52,&yq52,&zq
52);

int xq53,yq53,zq53;
tcselect7(1);

qmc53.read(&xq53,&yq53,&zq
53);

int xq54,yq54,zq54;
tcselect7(0);

qmc54.read(&xq54,&yq54,&zq
54);

int xq55,yq55,zq55;
tcselect7(2);

qmc55.read(&xq55,&yq55,&zq
55);

int xq56,yq56,zq56;
tcselect7(3);

qmc56.read(&xq56,&yq56,&zq
56);

int xq57,yq57,zq57;
tcselect5(5);

qmc57.read(&xq57,&yq57,&zq
57);

int xq58,yq58,zq58;
tcselect5(4);

qmc58.read(&xq58,&yq58,&zq
58);

int xq59,yq59,zq59;
tcselect5(6);

qmc59.read(&xq59,&yq59,&zq
59);

int xq60,yq60,zq60;
tcselect5(7);

qmc60.read(&xq60,&yq60,&zq
60);

int xq61,yq61,zq61;
tcselect7(5);

qmc61.read(&xq61,&yq61,&zq
61);

int xq62,yq62,zq62;
tcselect7(4);

qmc62.read(&xq62,&yq62,&zq
62);

int xq63,yq63,zq63;
tcselect7(6);

qmc63.read(&xq63,&yq63,&zq
63);

int xq64,yq64,zq64;
tcselect7(7);

qmc64.read(&xq64,&yq64,&zq
64);

// Frecuencia
if (FreqCount.available()) {
    unsigned long count =
    FreqCount.read();
    Serial.print(zq1);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq2);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq3);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq4);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq5);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq6);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq7);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq8);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq9);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq10);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq11);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq12);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq13);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq14);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq15);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq16);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq17);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq18);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq19);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq20);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq21);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq22);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq23);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq24);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq25);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq26);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq27);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq28);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq29);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq30);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq31);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq32);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq33);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq34);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq35);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq36);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq37);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq38);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(zq39);
}

```

```

Serial.print("\t");
Serial.print(zq40);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq41);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq42);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq43);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq44);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq45);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq46);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq47);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq48);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq49);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq50);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq51);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq52);

```

```

Serial.print("\t");
Serial.print(zq53);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq54);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq55);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq56);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq57);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq58);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq59);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq60);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq61);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq62);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq63);
Serial.print("\t");
Serial.print(zq64);
Serial.print("\t");

```

```

Serial.print(count);
Serial.print("\t");
Serial.println(maxVal);
}

//Amplitud

if (millis() - lastSample >
9000) { // Every 100ms:
lastSample = millis();

maxVal = 0;
}
int reading = analogRead(0);
if (reading > maxVal) {
maxVal = reading;
}

//Impresión
delay(200);
}

```

Apéndice E. Programa de interfaz gráfica del mapa de intensidades magnéticas

Programa en código de
MATLAB para recibir los
datos del microcontrolador
y permitir su visualización
en un mapa de
intensidades magnéticas

```

-----
-----
-----
-----
% Lectura de matriz de sensores
magnéticos
% Frecuencia y amplitud del
estimulador
clc
clear all
if ~isempty(instrfind)
    fclose(instrfind);
    delete(instrfind);
end
close all
clc

% Abrir puerto serial
s = serial('COM5');
s.DataBits = 8;
s.StopBits = 1;
s.BaudRate = 9600;
s.Parity = 'none';
s.BytesAvailableFcn =
{@callbackSerial};
count = 0;
fopen(s);
a = fscanf(s);

% Barra de paro;
wb = waitbar(0,'-
','Name','Espera...','CreateCance
lBtn','delete(gcf)');
k = 0;
i = 1;

```

```

%intdata(i,:) = 0;
while(1)

    tic

    g = 1;

    format shortg;
    [c] = clock; %
    Registrar fecha y hora de
    captura
    cacum(i,:) = c;
    intdata =
    str2num(convertCharsToString
    s(fscanf(s))); % Adquirir de
    datos
    if length(intdata)~=66
    % Depurar adquisición en caso
    de fallo
        cdata(i,:) = zeros(1,66);
    else
        cdata(i,:) = intdata; %
        Selección de los datos de la
        matriz y de la frecuencia y
        amplitud del estimulador
        data_day(i,:) = [cdata(i,:) c];

        Zdata(i,:) = cdata(i,[1:64]);
        Zdatat(i,:) = [i Zdata(i,:)];

        Frec(i,:) = cdata(i,65);
        RMS(i,:) = cdata(i,66);

        data(i,:) = Zdata(i,:);

        if i > 10 %
        Promediar 10 muestras
            acumdata =
            mean(Zdata(1:10,:));
            acumFrec = mean(Frec(i-
            10:i,:));
            acumRMS = max(RMS(i-
            3:i,:));

            resdata = mean(Zdata(i-
            10:i,:)) - acumdata; % Eliminar
            FMT por substracción

            for u = 1:64 %
            Umbralizar
                if resdata(u) <=
                3*std(cdata(i-10:i,u)) &&

```

```

resdata(u) >= -3*std(cdata(i-
10:i-1,u))

            Zacumdataumbral(u)= 0;
            else
            Zacumdataumbral(u) =
resdata(u);
            end

        end

        M =
        reshape(Zacumdataumbral,[8,8
        ]); % Acomodar los datos de los
        sensores en matriz

        toc
        T(:,i) = M; %
        Almacenar datos de la matriz

        imagesc(M) %
        Visualizar mapa de intensidades
        del campo magnético
        colormap(gray)

        title( ['Especimen 4 Captura
        No. ' num2str(i) ' '
        num2str(c(2)) '/' num2str(c(3)) '
        ' num2str(c(4)) ':' num2str(c(5))
        ' Frec ' num2str(acumFrec) '
        RMS
        num2str(acumRMS/10)]);

        end

        pause(0.01);
        i = i+1;

        %_____
        _____
        if ~ishandle(wb)
            break
        else
            waitbar(k/10,wb,['num: '
            num2str(k)]);
            end
            k = k+1;
            %_____
            _____

        end

    end
end

```

Apéndice F. Programa de procesamiento del mapa de intensidades de campo magnético

Programa para asignar una coordenada al valor máximo, mínimo o al punto medio entre ambos del mapa de intensidades de campo magnético

```

-----
-----
-----
promptini = "Inicio de la lectura: ";
inicio = input(promptini)
promptfin = "Fin de la lectura: ";
fin = input(promptfin)
for n = inicio:fin

    Valmax = max(T(:,n),[],'all');
    Valmin = min(T(:,n),[],'all');

    if Valmax == 0 && Valmin == 0 %Calcular las posiciones de los valores máximos y mínimos de la matriz
        xmax = 0;
        ymax = 0;
        xmin = 0;
        ymin = 0;
        Color = [0 0 0];
    elseif Valmax ~= 0 && Valmin > 5 %uT % Detectar la orientación del imán
        [xmax,ymax] = find(T(:,n) == max(T(:,n),[],'all'));
        xmin = 0;
        ymin = 0;
        Color = [1 0 0];
    
```

```

        elseif Valmax < 5 && Valmin ~= 0 && Valmin > 5 %uT
            [xmin,ymin] = find(T(:,n) == min(T(:,n),[],'all'));
            Color = [0 0 1];
        elseif Valmax ~= 0 && Valmin ~= 0 && abs(Valmax + Valmin) > 5 %T
            [xmax,ymax] = find(T(:,n) == max(T(:,n),[],'all'));
            [xmin,ymin] = find(T(:,n) == min(T(:,n),[],'all'));
            Color = [0 1 0];
        end

        if n > 9

            if length(xmax) > 1 || length(xmax) > 1 % Ponderar datos en caso de haber dos o más datos máximos o mínimos iguales
                xmax = (xmax(1)+xmax(2))/2;
                ymax = (ymax(1)+ymax(2))/2;
            elseif length(ymin) > 1 || length(ymin) > 1
                xmin = (xmin(1)+xmin(2))/2;
                ymin = (ymin(1)+ymin(2))/2;
            elseif Valmax ~= 0 && Valmin == 0
                xM(n,:) = xmax;
                yM(n,:) = ymax;
            elseif Valmax == 0 && Valmin ~= 0
                xM(n,:) = xmin;
                yM(n,:) = ymin;
            else
                xM(n,:) = ((xmax+xmin)/2);
                yM(n,:) = ((ymax+ymin)/2);
            end

            ColorL(n,:) = Color;
            % Almacenar y asignar los colores azul para polo sur, rojo
    
```

para el polo norte y verde para el punto medio entre ambos polos

```

        sz = 100;
        promxM(n,:) = mean(xM(n-9:n)); % Promediar el valor de 9 lecturas por vez
        promyM(n,:) = mean(yM(n-9:n));

        c = linspace(1,1.1,length(promxM));
        suave = linspace(8,0,40); % Acomodar digitalmente en caso de movimiento sobre la matriz
        if n > 13900
            posx = 16;
            posy = 8;
        elseif n > 13949
            posx = 16;
            posy = suave(n-13899);
        else
            posx = 0;
            posy = 0;
        end

        gfc = scatter(promxM(n-9:n),promyM(n-9:n),sz,Color,'filled') % Visualizar la posición de la marca magnética

        set(gcf, 'Position', [1, 1, 1366, 768]) % Ajustar el tamaño al de el tarrario experimental

        title(['Título' ]) % Asignar algún título

        xlim([1 8])
        ylim([1 8])

        pause(0.000005)

        end
    end
end

```