Chelonia
GLOBAL NATURE CONSERVATION

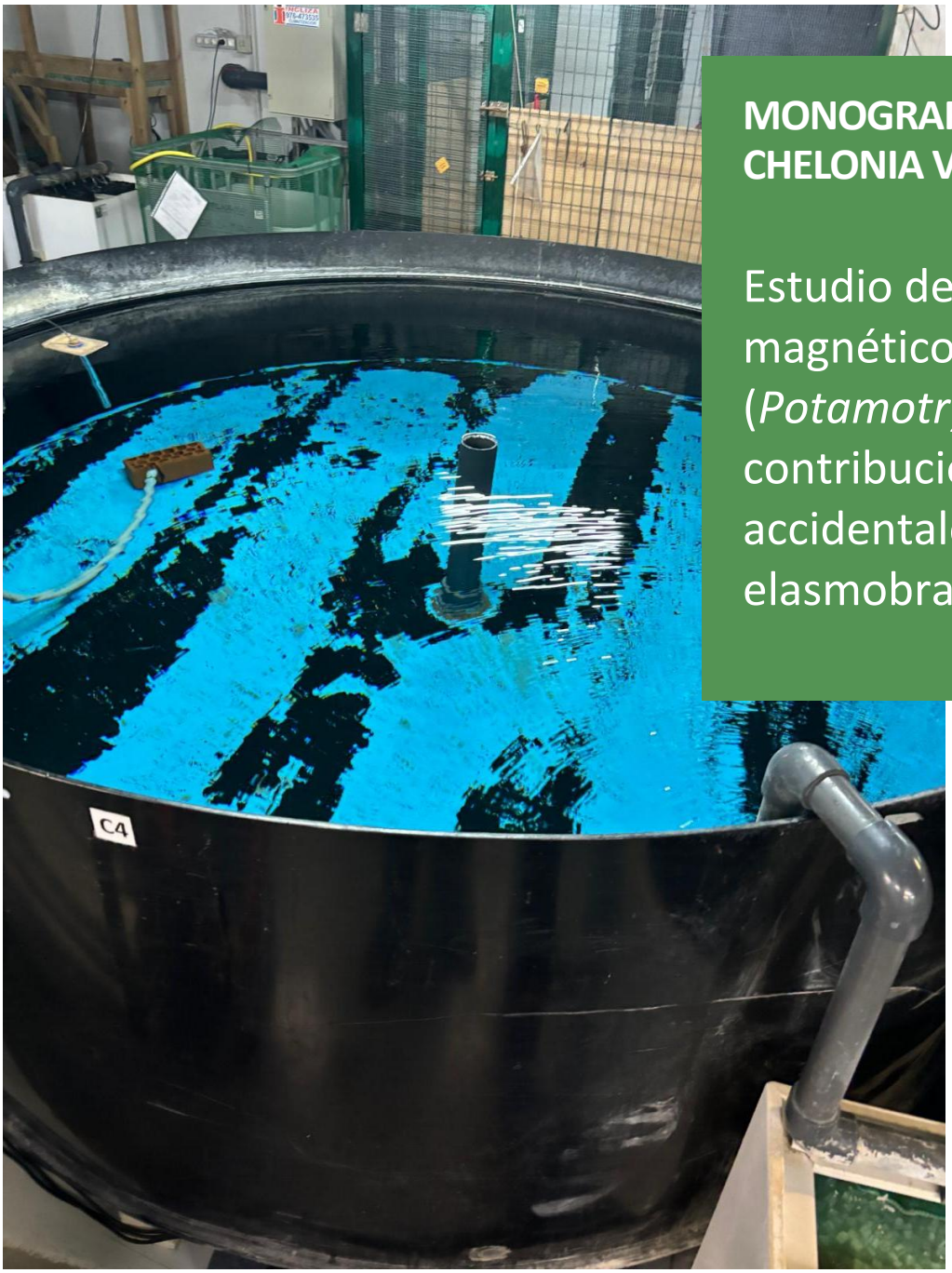
MONOGRAFÍAS DE LA ASOCIACIÓN CHELONIA

VOL XXII

Acuario de Zaragoza

Estudio del efecto de campos magnéticos en la raya motoro (*Potamotrygon motoro*): contribución a la reducción de capturas accidentales de elasmobranquios

Jesús David Párraga Méndez



MONOGRAFÍAS DE LA ASOCIACIÓN CHELONIA VOL XXII

Estudio del efecto de campos magnéticos en la raya motoro (*Potamotrygon motoro*): contribución de capturas accidentales en elasmobranquios

Edita: Asociación Chelonia, Madrid (España)
©Asociación Chelonia, 2025
Autor: Jesús David Párraga Méndez

AUTOR
EQUIPO EDITORIAL
COLABORADORES

Jesús David Párraga Méndez. *Autor*. Máster en Zoología, Universidad Complutense de Madrid.

Dr. Manuel Merchán Fornelino. *Director de proyecto*. Presidente de la Asociación Chelonia. Universidad Alfonso X El Sabio (Madrid, España).

MSc. Patricia Ureña Imedio. *Equipo editorial*. Coordinadora de Medio Ambiente de la Asociación Chelonia.

Sara Mozo Chaves. *Equipo editorial.* Asesora Científica de la Asociación Chelonia.

Cita recomendada: Párraga Méndez, J. D. 2025 Estudio del efecto de campos magnéticos en la raya motoro (Potamotrygon motoro): contribución de capturas accidentales en elasmobranquios. Monografías de la Asociación Chelonia. Volumen XXII. Madrid: Asociación Chelonia. 50 p.

Primera edición, septiembre de 2025
www.chelonia.es
chelonia@chelonia.es
ISBN: 978-84-09-79449-2

Comprobación de las cámaras de grabación con el equipo del acuario. *Fotografía propia.*

Índice

	RESUMEN	09
	1. INTRODUCCIÓN	10
	1.1. Los elasmobranquios, importancia ecológica y estado de conservación	10
	1.2. Pesca y capturas accidentales	12
	1.3. Soluciones basadas en la sensorialidad	13
	1.4. Antecedentes y proyectos de investigación	14
	1.5. Objetivos e hipótesis	16
	2. MATERIAL Y MÉTODOS	18
	2.1. Especie y lugar de estudio	18
	2.2. Procedimiento experimental	18
	2.3. Recogida, procesamiento de datos y tratamiento de datos faltantes	20
	2.4. Análisis estadístico	23
	3. RESULTADOS	25
	3.1. Resultados de la eliminación de los "missing data"	25
	3.2. Resultados de la imputación mediante el punto del área no visible	26
	3.3. Resultados del método de remuestreo "bootstrap"	28
	4. DISCUSIÓN	30
	4.1. Discusión de los resultados desde el enfoque metodológico y estadístico	30
	4.2. Discusión desde el enfoque biológico	32

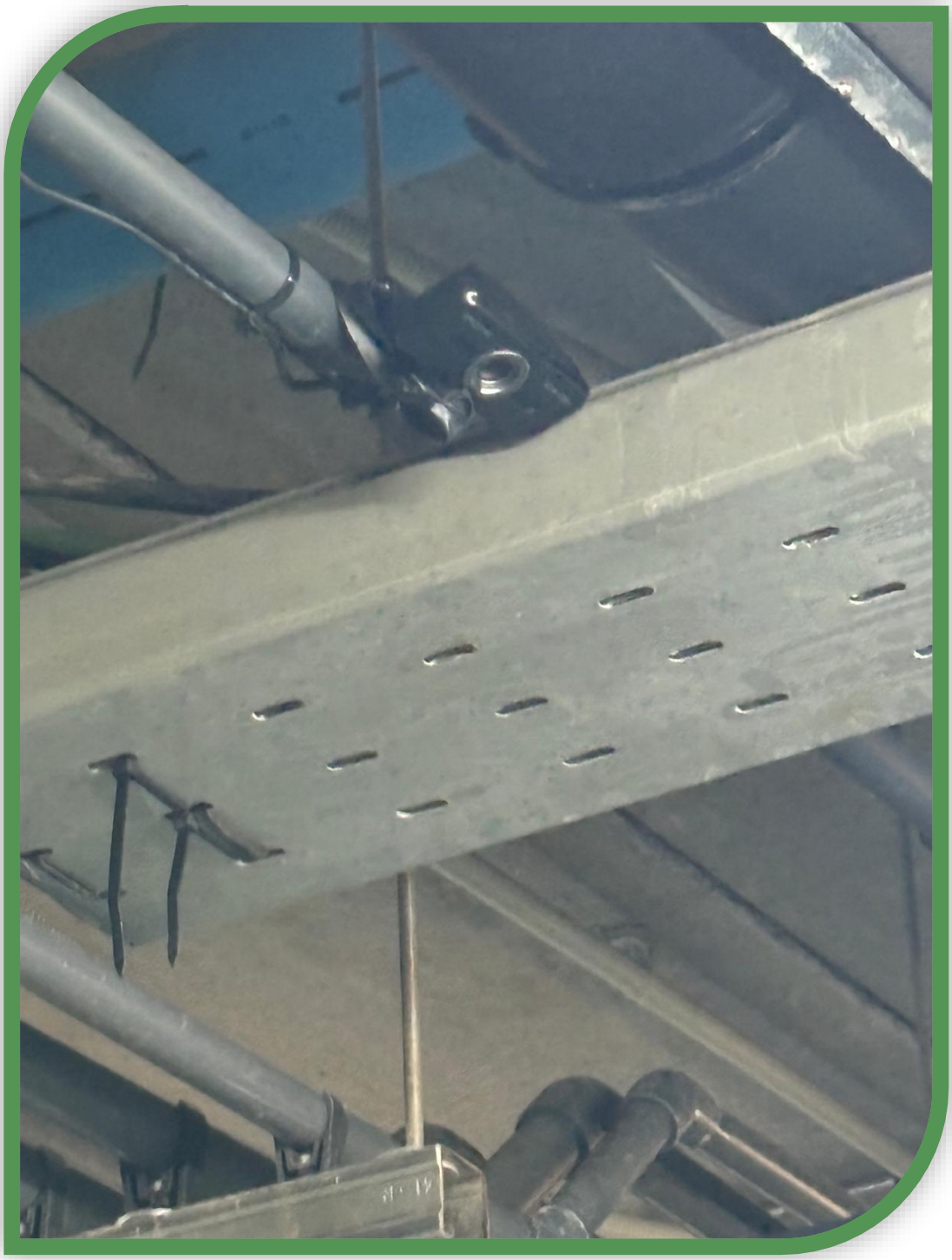
	5. CONCLUSIONES	34
	AGRADECIMIENTOS	35
	BIBLIOGRAFÍA	37
	ANEXOS	44
	Anexo 1. Tabla 1: Características del imán de neodimio	44
	Anexo 2. Tabla 2: Cronograma de grabaciones	45
	Anexo 3. Estimulación simulada de la atenuación del campo magnético	46

Índice de figuras

	Figura 1. Hocico de tiburón mostrando las ampollas de Lorenzini	13
	Figura 2. Grabación “Control 1” de P. motoro (25/10/2024)	19
	Figura 3. Grabación “Alimentación sin imán 1” de P. motoro (25/10/2024)	19
	Figura 4. Grabación “Alimentación con imán 1” de P. motoro (27/10/2024)	20
	Figura 5. Esquema de la visibilidad del tanque del Acuario de Zaragoza. Siluetas de P. motoro obtenidas de Phylopic	22
	Figura 6. Distancia media final al centro del tanque (cm) en las tres condiciones experimentales tras eliminar los datos faltantes (en 5 y 3 minutos de grabación). Las letras indican diferencias significativas según el test de Tukey ($p < 0,05$)	26
	Figura 7. Distancia media final al centro del tanque (cm) en las tres condiciones experimentales tras eliminar los datos faltantes (en 5 y 3 minutos de grabación). Las letras indican diferencias significativas según el test de Dunn ($p < 0,05$)	27
	Figura 8. A) Distribución de densidades de distancia al centro del tanque en cada condición experimental tras 1.000 simulaciones “bootstrap” (5 y 3 minutos de grabación). Se aprecia una clara separación entre la condición “Control” (gris) y las condiciones de “Alimentación sin imán” (verde) y “Alimentación con imán” (violeta). B) Histograma de las diferencias de distancia media entre las condiciones de “Alimentación sin imán” (AL) y “Alimentación con imán” (IM) tras 1.000 simulaciones “bootstrap”. La línea negra representa la media de la diferencia de -3,165 cm a 5 minutos y de - 3,709 cm a 3 minutos, mientras que la línea roja punteada indica el valor nulo.	29

Índice de tablas

	Tabla 1. Medias totales por evento en 5 minutos y 3 minutos de grabación utilizando la eliminación de los “missing data”	25
	Tabla 2. Medias totales por evento en 5 minutos y 3 minutos de grabación utilizando la imputación de los “missing data”	26
	Tabla 3. Medias totales, desviaciones estándar e intervalos de confianza al 95%, por evento en 5 minutos y 3 minutos de grabación utilizando el método de remuestreo “bootstrap”	28



Cámara colocada encima de la instalación. *Fotografía propia.*

RESUMEN

La captura accidental de elasmobranquios en pesquerías de palangre constituye una de las principales amenazas para su conservación a nivel global. Este estudio explora el uso de campos magnéticos como posible medida disuasoria, aprovechando la sensibilidad de estos animales a este tipo de estímulos a través de las ampollas de Lorenzini. El estudio se enmarca en un proyecto de conservación de la Asociación Chelonia y evalúa si un imán de neodimio (grado N35) puede modificar la conducta alimentaria de cinco individuos de la dulceacuícola raya motoro (Potamotrygon motoro, Müller & Henle, 1841) en condiciones de cautiverio. Se diseñó un experimento con grabaciones de comportamiento bajo tres condiciones ("Control", "Alimentación sin imán" y "Alimentación con imán") y se aplicaron tres estrategias metodológicas para el tratamiento de "missing data", generados por la visibilidad parcial del tanque. De este modo, se busca generar evidencias experimentales que apoyen el desarrollo de un protocolo técnico y eficaz, orientado a la aplicación real de disuasores magnéticos como herramienta selectiva y no invasiva para reducir las capturas accidentales de elasmobranquios.

Palabras clave: Elasmobranquios, ampollas de Lorenzini, captura accidental, campos magnéticos, disuasión sensorial, *Potamotrygon motoro*, conservación.

ABSTRACT

Bycatch of elasmobranchs in longline fisheries constitutes one of the main global threats to their conservation. This study explores the use of magnetic fields as a potential deterrent, taking advantage of the sensitivity of these animals to such stimuli through their ampullae of Lorenzini. The research is part of a conservation project by the Asociación Chelonia and evaluates whether a neodymium magnet (N35 grade) can modify the feeding behaviour of five individuals of the freshwater motoro stingray (Potamotrygon motoro, Müller & Henle, 1841) Potamotrygon under captive conditions. A behavioural experiment was designed with video recordings under three conditions ("Control", "Feeding without Magnet", and "Feeding with Magnet"), and three methodological strategies were applied to manage missing data generated by partial tank visibility. In this way, the study aims to generate experimental evidence to support the development of an effective and transferable technical protocol for the real-world application of magnetic deterrents as a selective and non-invasive tool to reduce the elasmobranch bycatch.

Keywords: Elasmobranchs, ampullae of Lorenzini, bycatch, magnetic fields, sensory deterrence, *Potamotrygon motoro*, conservation.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Los elasmobranquios, importancia ecológica y estado de conservación

Los Chondrichthyes (condrictios), también conocidos como peces cartilaginosos, representan una clase taxonómica que actualmente posee 1.293 especies descritas (World Register of Marine Species, n.d). Esta clase se divide en dos subclases principales, cuya separación evolutiva se originó en el periodo predevónico, los Holocephali (holocéfalos) o quimeras, actualmente representadas por un único orden (Chimaeriformes) y los Elasmobranchii (elasmobranquios), que agrupan a las especies tradicionalmente conocidas como tiburones y rayas (Compagno, 2001). Una de las hipótesis filogenéticas clásicas sobre los elasmobranquios, que tradicionalmente se han basado en caracteres morfológicos, es la hipótesis de Hypnosqualea (De Carvalho & Maisey, 1996) la cual sostiene que los batoideos (rayas y especies afines) derivan de un grupo de tiburones, en el que se encuentra también los peces sierra y los angelotes. Según esta hipótesis, las rayas son el grupo hermano de los peces sierra y este a su vez, es el grupo hermano de los angelotes. Sin embargo, estudios filogénicos más recientes, basados en datos moleculares, han rechazado la hipótesis de Hypnosqualea, ya que evidencian que los batoideos forman un clado monofilético que es hermano de todos los tiburones modernos, (también monofiléticos) en lugar de constituir un linaje derivado de estos (da Cunha et al., 2017). Por lo tanto, actualmente se reconocen la existencia de dos clados hermanos dentro de Elasmobranchii: Selachii (tiburones) y Batoidea (rayas, torpedos y peces sierra) (Amaral et al., 2018).

Los elasmobranquios desempeñan un papel clave en el equilibrio de los ecosistemas marinos, ya que muchas especies influyen directamente en las redes tróficas al actuar como meso-depredadores o depredadores cúspide (García et al., 2025). No obstante, su diversidad ecológica va más allá, desarrollando un gran abanico de estrategias alimentarias, desde grandes filtradores hasta pequeños depredadores altamente especializados. Esta amplia variedad funcional, en gran parte resultado de su elevada variabilidad morfológica y su capacidad para adaptarse a distintos hábitats, contribuye a que los elasmobranquios cumplan varias funciones en el ecosistema, como la regulación de presas y otros depredadores, la alteración del comportamiento o distribución de especies y la estructuración de las comunidades en las que se integran (Dedman et al., 2024). En este

contexto, los elasmobranquios se consideran componentes fundamentales para la estabilidad de los ecosistemas, actuando como reguladores de las redes tróficas, por tanto, alteraciones en su abundancia o función ecológica pueden extenderse a través de toda la red, generando desequilibrios que afectan a la composición y a las relaciones interespecíficas, provocando cambios en la dinámica y conectividad del ecosistema (Heithaus et al., 2008).

Pese a su elevada importancia ecológica, los elasmobranquios enfrentan una situación crítica de conservación. Según la Lista Roja de Especies Amenazadas de la IUCN (2025) el 42,4% de las especies de condrictios, que incluyen tanto a elasmobranquios como a quimeras, se encuentran a nivel global en alguna categoría de amenaza: casi amenazado (NT), vulnerable (VU), en peligro (EN) o en peligro crítico (CR). Esta situación se agrava en el caso de España, donde el 68,2% de las especies registradas en aguas nacionales, se encuentran en alguna de estas categorías. Entre 1970 y 2018 la abundancia mundial de elasmobranquios se redujo un 71,1%, con una pérdida media del 18,2% por década. Esta disminución de fauna, impulsada en gran medida por la sobrepesca y la captura accidental, afecta directamente al mal estado de las poblaciones de elasmobranquios e incrementa el riesgo de extinción de muchas especies (Pacoureau et al., 2021). Su elevada vulnerabilidad a la presión pesquera se debe a su madurez sexual tardía y sus bajas tasas de fecundidad. Ambas características biológicas limitan su capacidad de recuperación poblacional (Myers & Worm, 2025), en comparación con la de otros animales como los peces teleósteos. Estos últimos gracias a sus ciclos de vida caracterizados por elevadas tasas de reproducción, junto a una elevada mortalidad, poseen una capacidad de recuperación poblacional mucho más efectiva que la de los elasmobranquios, ya que pueden compensar reducciones en el tamaño poblacional incluso cuando la densidad (entendida como el número de individuos por área) es baja, lo que favorece una recuperación más rápida si cesa la presión pesquera (Stevens et al., 2000).

Pese a su elevada importancia ecológica, los elasmobranquios enfrentan una situación crítica de conservación. Según la Lista Roja de Especies Amenazadas de la IUCN (2025) el 42,4% de las especies de condrictios, que incluyen tanto a elasmobranquios como a quimeras, se encuentran a nivel global en alguna categoría de amenaza: casi amenazado (NT), vulnerable (VU), en peligro (EN) o en peligro crítico (CR). Esta situación se agrava en el caso de España, donde el 68,2% de las especies registradas en aguas nacionales, se encuentran en alguna de estas categorías. Entre 1970 y 2018 la abundancia mundial de elasmobranquios se redujo un 71,1%, con una pérdida media del 18,2% por década. Esta disminución de fauna, impulsada en gran medida por la sobrepesca y la captura accidental, afecta directamente al mal estado de las poblaciones de elasmobranquios e incrementa el riesgo de extinción de muchas especies (Pacoureau et al., 2021). Su elevada vulnerabilidad

a la presión pesquera se debe a su madurez sexual tardía y sus bajas tasas de fecundidad. Ambas características biológicas limitan su capacidad de recuperación poblacional (Myers & Worm, 2025), en comparación con la de otros animales como los peces teleósteos. Estos últimos gracias a sus ciclos de vida caracterizados por elevadas tasas de reproducción, junto a una elevada mortalidad, poseen una capacidad de recuperación poblacional mucho más efectiva que la de los elasmobranquios, ya que pueden compensar reducciones en el tamaño poblacional incluso cuando la densidad (entendida como el número de individuos por área) es baja, lo que favorece una recuperación más rápida si cesa la presión pesquera (Stevens et al., 2000).

1.2. Pesca y capturas accidentales

La legislación pesquera española se recoge dentro del Real Decreto 502/2022, de 27 de junio, por el que se regula las artes de pesca permitidas en los caladeros nacionales (en adelante, R.D. 502/2022). Entre ellas se encuentran el arrastre de fondo, palangre de fondo, volanta, cerco, rasco y artes menores. Cada una de estas técnicas presenta un potencial de impacto diferente en los elasmobranquios. El palangre de fondo, por ejemplo, consiste en una línea madre que se sitúa sobre el fondo marino, con anzuelos cebados sujetos a brazoladas. Este método se emplea principalmente para la captura de especies demersales como la merluza (R.D 502/2022). Sin embargo, el palangre de fondo provoca un elevado número de capturas accidentales, en las que la mayoría de las especies capturadas no tienen interés comercial y presentan altas tasas de mortalidad tras su captura (Morgan & Carlson, 2010). Un ejemplo claro en el mar Mediterráneo son las capturas accidentales la noriega (*Dipturus batis*, Linnaeus, 1758, en Peligro Crítico [CR]), el pez guitarra común (*Rhinobatos rhinobatos*, Linnaeus, 1758, en Peligro [EN]) y la raya blanca (*Rostroraja alba*, Lacepède, 1803, en Peligro [EN]). Estas especies carecen de interés comercial, presentan altas tasas de captura accidental y están estrictamente protegidas al figurar en el Anexo II del Protocolo SPA/BD del Convenio de Barcelona, pese a lo cual continúan apareciendo como captura accidental en pesquerías de la región (Di Lorenzo et al., 2022).

La normativa comunitaria intenta abordar esta problemática. El Reglamento 2024/257 del Consejo de Europa, de 10 de enero, establece las normas de pesca de la Unión Europea y recomienda evitar la captura de elasmobranquios debido a su grave estado de conservación (en adelante, Regl.[UE] 2024/257). Aunque algunas especies sí pueden ser capturadas con fines comerciales, bajo condiciones estrictas, el reglamento incluye varias listas de prohibiciones. Por ejemplo, entre otras muchas especies, está completamente

vetada la pesca de especies del género Alopias (tiburones zorro), de la familia Sphyrnidae (tiburones martillo, salvo alguna excepción), así como del tiburón de punta blanca (*Carcharhinus longimanus*, Poey, 1861), el tiburón sedoso (*Carcharhinus falciformis*, Bribon, in Müller & Henle, 1839) o del marrajo (*Isurus oxyrinchus*, Rafinesque, 1810) en el Atlántico septentrional. Del mismo modo se prohíbe la captura de Rajiformes en la zona CIAT (Región del Pacífico oriental donde la Comisión Interamericana del Atún Tropical [CIAT] ejerce su autoridad para la conservación y protección de poblaciones de atunes y otras especies marinas asociadas) y la de tiburones de aguas profundas, además de imponer restricciones a embarcaciones de terceros países que se encuentren en aguas comunitarias (Regl.[UE] 2024/257; Inter-American Tropical Tuna Commission [IATTC], s.f.).

Pese a estas medidas, su efectividad se ve comprometida por la captura accidental, que escapa al control directo de las normativas. El "bycatch" (captura accidental), representa uno de los principales factores de declive de las poblaciones de elasmobranquios, (Molina & Cooke 2012; Gallagher et al., 2014). Se estima que aproximadamente la mitad de los elasmobranquios capturados a nivel mundial provienen de capturas accidentales, y que en torno al 70% de estas provienen de la pesca de palangre, lo que la convierte en la principal causa de mortalidad en elasmobranquios. Además, muchas de estas capturas no se registran, no se identifican correctamente por especie o bien se subestiman, lo que conlleva una infravaloración significativa de la mortalidad real (Bonfil, 1994). Aunque la captura accidental se ha abordado tradicionalmente desde una perspectiva ecológica, sus consecuencias económicas, sobre las pesquerías comerciales, resultan igualmente relevantes, Hall et al. (2000) señalan que la captura accidental de especies no objetivo puede llevar a restricciones pesqueras con limitaciones en el esfuerzo de la pesca, cierres temporales de caladeros o incluso suspensión de campañas. Esto afecta a la rentabilidad del sector y puede generar conflictos entre distintas flotas. Un punto especialmente delicado son las capturas accidentales de juveniles o individuos por debajo del tamaño mínimo legal y comercial, ya que compromete la recuperación poblacional y la sostenibilidad de las capturas a futuro.

1.3. Soluciones basadas en la sensorialidad

Frente al desafío que supone reducir las capturas accidentales de elasmobranquios en la pesca de palangre, cobra especial importancia la Asociación Chelonia. Esta entidad, fundada en 1997 en la Universidad Complutense de Madrid, lleva a cabo desde 2012 una

línea de investigación centrada en el uso de campos magnéticos, como posible estrategia disuasoria frente a tiburones y rayas, con el fin de mitigar su captura no intencionada. Esta línea de investigación se fundamenta en la capacidad sensorial de los elasmobranquios para detectar campos eléctricos, mediada por unos órganos sensoriales conocidos como ampollas de Lorenzini (*Figura 1*).

Figura 1. Hocico de tiburón mostrando las ampollas de Lorenzini. *Imagen de Albert Kok/Science Learning Hub).*

La ampollas de Lorenzini fueron descritas por primera vez por el fisiólogo italiano Stefano Lorenzini. Pese a ello, su naturaleza electro sensorial fue descubierta tres siglos después por el biólogo Adrianus Johannes Kalmijn, cuando en 1971 público su estudio "The electric sense of sharks and rays" en el que descubrió que tiburones y rayas son capaces de percibir campos eléctricos generados de manera natural por otros organismos. Este descubrimiento supuso la confirmación de una nueva modalidad sensorial, hasta entonces desconocida y marcó un hito en el estudio del comportamiento de elasmobranquios (Hopkins, 2010). Para demostrar la función de las ampollas de Lorenzini, Kalmijn llevó a cabo una serie de ensayos conductuales con ejemplares de pintarroja (Scyliorhinus canicula, Linnaeus, 1768) en condiciones de cautiverio. El objetivo de estos experimentos fue comparar distintos tipos de estímulos (eléctricos, químicos, visuales y mecánicos), con el fin de determinar con cuáles de ellos el tiburón conseguía localizar mejor a la presa. Sus resultados confirmaron que las ampollas de Lorenzini no solo consiguen detectar campos eléctricos, sino que son fundamentales para la localización de presas, particularmente en contextos de baja visibilidad o de escasa disponibilidad de otros estímulos.

1.4. Antecedentes y proyectos de investigación

La capacidad sensorial de los elasmobranquios, especialmente su sensibilidad a los campos eléctricos y magnéticos del entorno ha despertado un creciente interés por su posible aplicación en la reducción de capturas accidentales en pesquerías (O'Connell et al., 2011). Basándose en esta premisa, la Asociación Chelonia ha puesto en marcha el proyecto "Reducción de capturas accidentales de elasmobranquios mediante el uso de dispositivos electromagnéticos en pesquerías de palangre", con el objetivo de explorar si los campos magnéticos generados por imanes pueden inducir una respuesta de evitación en estas especies. El proyecto se desarrolla en varios acuarios de España, entre ellos el Acuario de Zaragoza, el Bioparc Acuario de Gijón, el Atlantis Aquarium de Madrid, el Aquarium Costa de Almería, el Aquarium de San Sebastián y el Oceanogràfic de Valencia. En condiciones de cautividad, se han llevado a cabo pruebas en tanques circulares de cuarentena con individuos de pintarrojas, en las que se observó una respuesta conductual de evitación ante el estímulo magnético. Por el contrario, en ensayos realizados con tiburones grises (*Carcharhinus plumbeus*, Nardo, 1827) en tanques de exhibición y alimentados mediante pinzas, no se detectaron diferencias significativas en su comportamiento. También se han iniciado pruebas en mar abierto desde el puerto de Vigo, con embarcaciones de la flota palangrera, para verificar estas hipótesis en condiciones reales. Aunque se registró una ligera disminución en la captura accidental de individuos de tintorera (*Prionace glauca*, Linneanus, 1758), el tamaño muestral resultó insuficiente para poder extraer conclusiones sobre la eficacia del imán.

De manera paralela a la realización de este Trabajo Fin de Master, se replicaron las condiciones y el protocolo experimental con 6 individuos de pastinaca (*Dasyatis pastinaca*, Linnaeus, 1758), en condiciones de cautividad en el Atlantis Aquarium. En este estudio se observó una pequeña diferencia de distancias entre eventos de alimentación con y sin imán, aunque sin poder establecer diferencias significativas entre ambas condiciones. Estos dos son los únicos estudios centrados específicamente en batoideos hasta la fecha. Todos los estudios llevados a cabo en el marco del proyecto, tanto en acuarios como en condiciones de mar abierto, están dirigidos al mismo objetivo final, que es elaborar un protocolo técnico que pueda presentarse a las autoridades competentes para el establecimiento de una normativa que regule la implementación de estos dispositivos en las flotas españolas y europeas.

Investigaciones previas han planteado que los campos magnéticos pueden interferir con la percepción sensorial de los elasmobranquios, afectando a su capacidad para detectar campos eléctricos (O'Connell et al., 2011; Courtney et al., 2015). Por ejemplo, la colocación

de imanes en pesca de palangre, ha demostrado una disminución en la tasa de capturas de la raya látigo-americana (*Dasyatis americana*, Hildebrand & Schroeder, 1928) y el tiburón de punta negra (*Carcharhinus limbatus*, Müller & Henle 1839), mientras que el uso de imanes en pesca con caña y anzuelo reduce la captura de especies como el cazón de playa (*Rhizoprionodon terraenovae*, Richardson, 1836) o la musola pintada (*Mustelus canis*, Mitchill, 1815) (O'Connell et al., 2011). Sin embargo, la captura de teleósteos no se ve reducida con estas medidas, ya que carecen de ampollas de Lorenzini, aunque existe la evidencia de que algunas especies de teleósteos tienen cierto grado de magnetorrecepción (Courtney et al., 2015).

Se han propuesto dos mecanismos principales de magnetorrecepción en elasmobranquios. La magnetorrecepción directa, basada en cristales de magnetita biogénica (Kirschvink et al., 2001; Courtney et al., 2015) y la magnetorrecepción indirecta, por inducción electromagnética captada a través de las ampollas de Lorenzini (Kalmijn, 1971; O'Connell et al., 2012; Courtney et al., 2015). La hipótesis de los cristales de magnetita biogénica está mucho más estudiada y respaldada en teleósteos, como la trucha arcoíris (Oncorhynchus mykiss, Walbaum, 1792) o la anguila japónica (*Anguilla japónica*, Schlegel, 1850) (Driebel et al., 2000; Nishi et al., 2004). En elasmobranquios como la raya de cola corta (Dasyatis brevicaudata, Hutton, 1875) o el tiburón martillo común (*Sphyrna lewini*, Griffith & Smith, 1834), se ha demostrado que tienen la capacidad de poder emplear ambos mecanismos (Hodson, 2001; Klimley, 1993).

Ensayos en pesca recreativa y en pesca de palangre han demostrado que imanes de neodimio-boro-hierro pueden provocan una respuesta selectiva de evitación en algunas especies de elasmobranquios como el cazón de playa o la musola pintada (O'Connell et al., 2011). En otras especies como la mielga (*Squalus acanthias*, Linnaeus, 1758) ciertos estudios revelan una reducción en su aproximación a los cebos en presencia de imanes (Stoner & Kaimmer, 2008; Kaimmer & Stoner, 2008), mientras que otros muestran resultados contradictorios (Tallack & Mandelman, 2009). Estas discrepancias podrían estar influenciada por factores como el nivel de saciedad o la densidad poblacional (Kaimmer & Stoner, 2008). Además, la configuración de los imanes y la orientación de su campo magnético juegan un papel importante, pudiendo proporcionar mayor variabilidad en los resultados (O'Connell et al., 2011). Otros factores, como el tamaño corporal que está relacionado con la longitud de los canales ampulares, también influyen en la respuesta ante estos estímulos (Sisneros & Tricas, 2000).

En vista del potencial mostrado por los imanes para reducir la captura accidental de elasmobranquios, en los estudios precedentes, se destaca la importancia de continuar desarrollando y probando dispositivos de disuasión magnética en diferentes condiciones,

con el objetivo de conseguir establecer una efectividad clara de distintos imanes tanto en cautiverio como en alta mar (Rigg et al., 2009). Este Trabajo Fin de Máster se enmarca en esta línea de investigación y representa una contribución directa al proyecto de la Asociación Chelonia. El estudio se centra en el análisis de 5 individuos de raya motoro (*Potamotrygon motoro*, Müller & Henle, 1841), aplicando un diseño metodológico protocolario desarrollado en las instalaciones del Acuario de Zaragoza. Su propósito es aportar datos adicionales que complementen los resultados generales del proyecto, ayudando a establecer una base sólida para la aplicación práctica de imanes como herramienta para reducir la captura accidental de elasmobranquios.

1.5. Objetivos e hipótesis

Partiendo de la base de su sistema sensorial eléctrico, se plantea un enfoque experimental que permite valorar si los campos magnéticos generados por imanes presentan un efecto disuasorio en la especie objetivo (*P. motoro*).

Hipótesis de trabajo: Los campos magnéticos emitidos por imanes interferirán en la percepción eléctrica de *P. motoro* al alterar las señales captadas por las ampollas de Lorenzini. Se plantea que esta sobreestimulación provocará un comportamiento disuasorio,

lo que resultará en un aumento de la distancia media entre los individuos y la fuente de alimento.

Objetivos del estudio:

1) Analizar si la presencia de campos magnéticos modifica la conducta alimentaria de P. motoro en condiciones controladas.

2) Comparar las reacciones de los ejemplares cuando están expuestos al estímulo magnético y cuando no lo están, con el fin de determinar si existe una diferencia significativa en su respuesta al alimento.

3) Proponer una posible aplicación de los imanes en artes de pesca para minimizar la interacción no deseada con estas especies.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Especie y lugar de estudio

Mediante grabaciones de video, se registró el comportamiento de 5 individuos de raya motoro (*P. motoro*) nacidos en cautividad, ante distintas condiciones experimentales. La raya motoro, es una especie de agua dulce que se encuentra ampliamente distribuida en los ríos Atlánticos y de la cuenca amazónica de América del sur, y que pertenece a una de las familias (Potamotrygonidae) más diversas dentro del orden de los Myliobatiformes. Una de sus caracterices más llamativas es la posesión de uno a tres aguijones en la base de la cola, capaces de causar laceraciones defensivas. Además, es un animal muy estudiado por su veneno, ya que posee muchas propiedades inmunológicas y tóxicas (Magalhães et al., 2008; Lameiras et al., 2019). Las grabaciones tuvieron lugar entre octubre de 2024 y enero de 2025, en un tanque circular de 290 cm de diámetro, dentro del área de cuarentena del Acuario de Zaragoza. Previamente, se estableció un periodo de adaptación para los individuos en la zona de cuarentena; todas las grabaciones y eventos de alimentación fueron supervisadas por personal del acuario.

2.2. Procedimiento experimental

Se aplicó un protocolo riguroso de grabaciones y de toma de datos, siguiendo las pautas establecidas para el resto de las especies y grabaciones del proyecto de la Asociación Chelonia, el cual se describe con mayor detalle en el siguiente apartado. Este protocolo consistió en grabaciones de tres condiciones experimentales diferentes: una de control y dos de alimentación con distintas condiciones.

- Grabaciones “Control” (CO): en estas grabaciones no se introduce ningún estimulo, pudiendo observar la distribución aleatoria de los individuos alrededor del tanque (*Figura 2*).

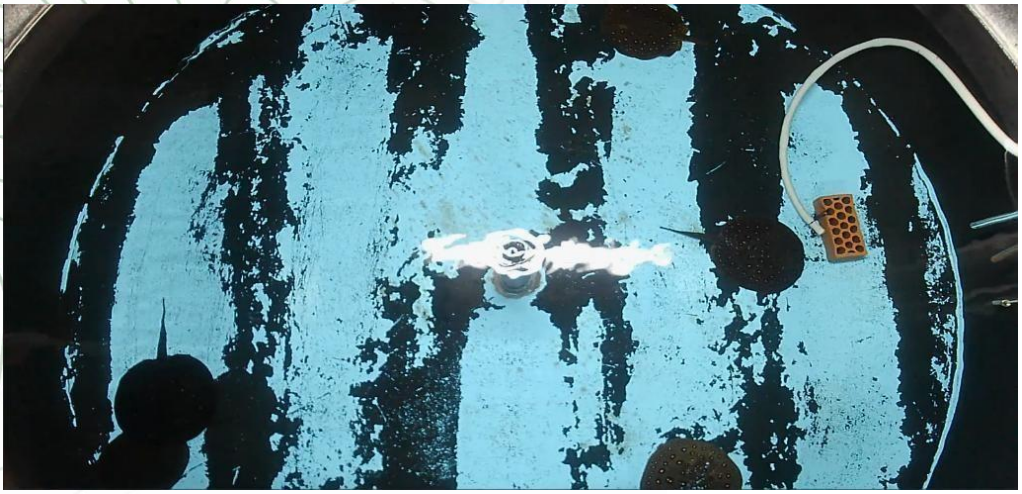


Figura 2. Grabación "Control 1" de *P. motoro* (25/10/2024). *Imagen propia.*

- Grabaciones de "Alimentación sin imán" (AL): se introduce el alimento en el centro del tanque, mediante un tubo de PVC, permitiendo registrar la respuesta de los animales frente al estimulo de la comida (*Figura 3*).

Figura 3. Grabación "Alimentación sin imán 1" de *P. motoro* (25/10/2024). *Imagen propia.*

- Grabaciones de "Alimentación con imán" (IM): se introduce en el centro del tanque, tanto el alimento como un imán de neodimio (ver Anexo I. "Tabla 1: Características del imán de neodimio"), permitiéndonos evaluar la posible influencia del campo magnético frente al estimulo de la comida (*Figura 4*).

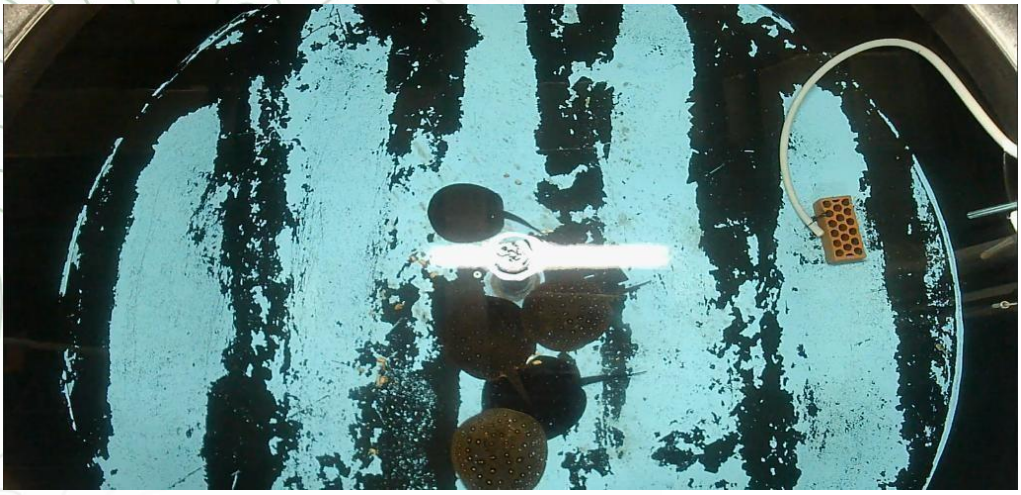


Figura 4. Grabación "Alimentación con imán 1" de *P. motoro* (27/10/2024). *Imagen propia.*

La planificación de las grabaciones se organizó por bloques para reducir al mínimo posible el estrés de los animales. Cada bloque consistió en tres grabaciones: una grabación "Control", seguida el mismo día de una grabación de "Alimentación sin imán" y dos días después, de una grabación de "Alimentación con imán". Este protocolo se repitió 12 veces, generando 12 bloques diferentes de grabaciones, asegurando un tiempo de descanso mínimo de 2 días entre bloques (ver Anexo II. "Tabla 2: Cronograma de grabaciones"). En total, se realizaron 36 grabaciones.

2.3. Recogida, procesamiento de datos y tratamiento de datos faltantes

Inicialmente, el análisis del comportamiento de los individuos se realizó sobre los primeros 5 minutos de la grabación de cada condición experimental (CO, AL, IM). En el proceso de recogida de los datos, se observó que a medida que trascurría el tiempo de grabación en cada evento de alimentación, la distancia media de los individuos al centro del tanque tendía a aumentar. Esto se atribuyó, a la disminución progresiva de alimento en el tanque ya que estaba siendo consumido. Para evitar un posible sesgo relacionado con la duración de los vídeos, se optó por realizar un nuevo set de datos considerando únicamente los 3 primeros minutos de grabación. Por tanto, se analizaron dos tiempos de grabación diferentes: los datos en el intervalo de los 5 primeros minutos, tal y como estaba propuesto

inicialmente en el protocolo, pero también los datos de los 3 primeros minutos, con el objetivo de comprobar si el tiempo de grabación podría tener efectos en los resultados.

Cada grabación se pausaba cada 15 segundos (en los segundos: 0, 15, 30 y 45 de cada uno de los minutos generados), generando un total de 20 fotogramas (muestreos de barrido) por vídeo. En cada fotograma se midió la distancia del hocico de cada individuo al centro del tanque. De este modo, por cada vídeo se obtuvieron 100 datos de distancias (20 distancias por cada uno de los 5 individuos) Al analizar las 36 grabaciones, fueron un total de 3.600 datos de distancias.

Las mediciones sobre las imágenes se transformaron a escala real (diámetro de tanque 290 cm, diámetro en pantalla 32 cm). Una vez ajustadas, se organizaron en 12 hojas de Excel, una por cada bloque o repetición y cada una de ellas a su vez con tres tablas correspondientes a las grabaciones "Control", "Alimentación sin imán" y "Alimentación con imán". A partir de esta base de datos, para cada una de las 12 hojas se calcularon las distancias medias (la media de las distancias de los cinco individuos del estudio) de cada fotograma y partiendo de estas, se calcularon las distancias medias totales para cada grabación, agrupadas por tipo de condición experimental (CO, AL, IM). Posteriormente, se calculó la media final de cada condición, promediando las medias de las 12 repeticiones correspondientes a esa condición.

Durante la toma de datos, se produjo un error en las grabaciones que impidió captar todo el tanque. El eje X se grabó por completo, pero en el eje Y solo se grabaron los primeros 86,1 cm del radio (que medía 145 cm en total). Esto provocó la creación de dos zonas, la zona visible y la zona no visible, que comprendía una franja entre los 86,1 cm y los 145 cm del radio de eje Y, en la cual no se pudo determinar la posición de los individuos, porque no se le podía ver (*Figura 5*).

Esta limitación a la hora de poder observar todo el tanque, provocó una serie de datos faltantes o "missing data" en cada uno de los tres eventos, aunque el impacto fue más evidente en las grabaciones del evento "Control", debido a que en los eventos de "Alimentación sin imán" y "Alimentación con imán" los individuos tendieron a acercarse más al centro del tanque (zona visible) gracias al estímulo de la comida, reduciendo en gran medida los "missing data". Para tratar esta situación, se aplicaron tres estrategias diferentes:

- Eliminación de los "missing data": la primera estrategia consistió en eliminar de las bases de datos los "missing data", considerando solo los registros de las zonas visibles. De esta manera el análisis estadístico se realizó exclusivamente con los datos de los que se tenía certeza. Este enfoque es el más sencillo y conservador, ya

que evita introducir suposiciones o estimaciones. Sin embargo, con este método hay que tener en cuenta, por un lado, la reducción del tamaño muestral y por el otro, la distribución de los "missing data", ya que si los datos ausentes no se distribuyen de forma aleatoria (por ejemplo, hay mayor número de datos en la zona no visible del evento "Control"), podrían generarse sesgos en los resultados.

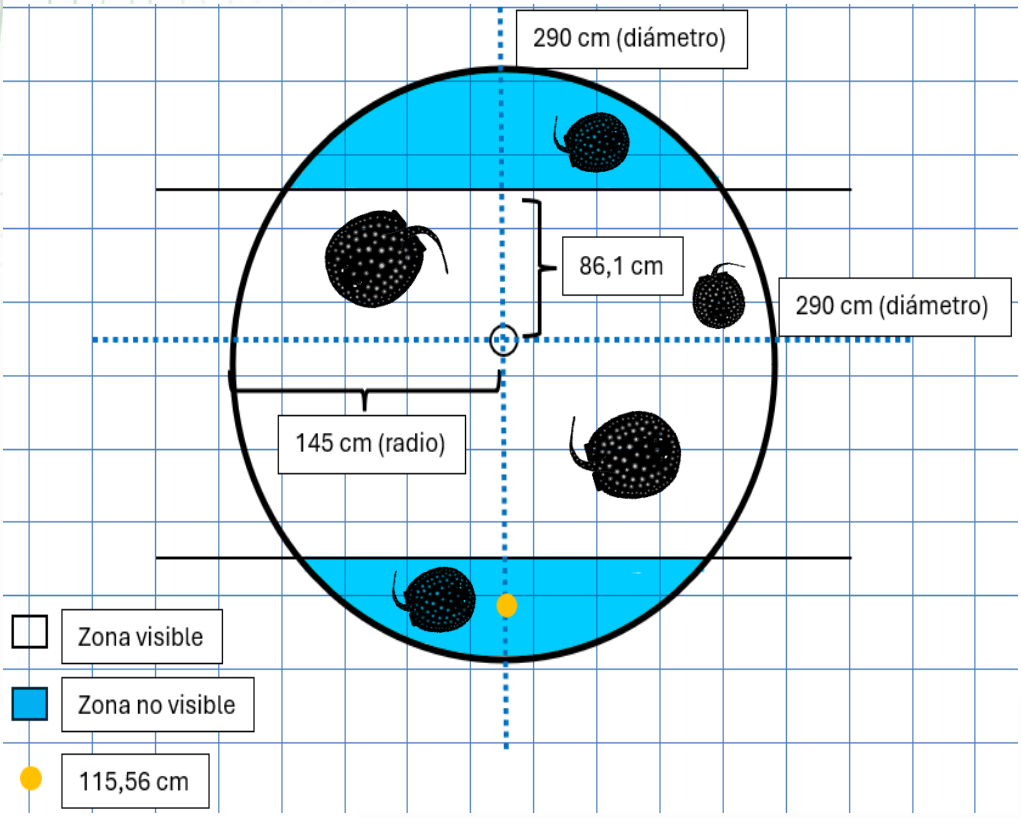


Figura 5. Esquema de la visibilidad del tanque del Acuario de Zaragoza. Siluetas de *P. motoro* obtenidas de Phylopic. Elaboración propia.

- Imputación de los "missing data" mediante el punto medio del área no visible (115,56 cm): esta segunda estrategia consistió en sustituir el valor de los "missing data" por el promedio de las distancias de la zona no visible (115,56 cm). Con este método, conseguimos mantener el tamaño muestral , evitando la pérdida de información y utilizando un valor medio razonable. Aun así, esta estrategia tiende a simplificar la realidad al asumir que todos los individuos ausentes se sitúan exactamente en el mismo punto, lo que reduce la variabilidad natural de las posiciones aleatorias de los individuos.

- Método de remuestreo "bootstrap": la tercera estrategia se trata de la técnica estadística del "bootstrap", basada en el remuestreo aleatorio con reemplazo. Este método proporciona estimaciones robustas, medias de cada condición, desviaciones estándar e intervalos de confianza (Hernández-Abreu & Martínez-Pérez, 2012), requiere de una mayor complejidad computacional y depende de que la muestra inicial sea representativa, para evitar sesgos (FasterCapital, 2025). Este método se basa en repetir el análisis en múltiples simulaciones, generando muestras a partir de los datos originales. En cada repetición se calcula el valor del estadístico, en este caso, la distancia media de los individuos al centro del tanque. Al reunir todos estos datos se construye una distribución que refleja cómo podría variar ese estadístico en condiciones similares. Esta distribución empírica permite extraer conclusiones sin necesidad de asumir que los datos siguen una distribución que cumple la normalidad o que las varianzas sean homogéneas. El análisis se centró en tres aspectos: las medias globales de cada condición, la diferencia de medias entre "Alimentación sin imán" y "Alimentación con imán" (AL - IM) y la estimación del tamaño del efecto mediante la d de Cohen. También se calcularon los intervalos de confianza al 95 % para todas estas.

2.4. Análisis estadístico

El análisis estadístico se llevó a cabo en Rstudio (versión 2024.12.0+467), a partir de las mediciones de distancias de los individuos al centro del tanque en los tres eventos y aplicando en los análisis las tres estrategias de tratamiento de "missing data". El trabajo se apoyó en scripts en R estructurados en bloques funcionales, empleando paquetes como readxl, dplyr, tidyr y ggplot2 y ggpubr, entre otros. Estos scripts incluyen funciones para la importación de datos desde archivos Excel, su transformación al formato largo y manipulación previa al análisis estadístico y la visualización. Se estableció como variable dependiente la distancia media de individuos al centro del tanque, mientras que como variable independiente se consideró el tipo de condición experimental, con tres niveles: "Control", "Alimentación sin imán" y "Alimentación con imán".

En la estrategia de eliminación de datos faltantes, se calcularon las medias finales totales de las distancias correspondientes a cada evento a los 5 y 3 minutos de grabación. Tras importar y restructurar los datos, se aplicó un enfoque paramétrico, se evaluaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante la función shapiro_test del paquete rstatix y la función leveneTest del paquete car. Al cumplirse estos supuestos,

se aplicó un ANOVA de una vía mediante la función aov, para comparar las medias entre las 3 condiciones, y se realizaron comparaciones múltiples con la función Tukey HSD. Para esta magnitud de las diferencias, se calculó el tamaño del efecto global (η2) usando funciones del paquete effectsize. Las representaciones graficas se generaron con los paquetes ggplot2 y ggpubr mediante Box-Plots con anotaciones de significación.
En la estrategia de imputación fija, también se calcularon las medias finales totales de las distancias de los individuos al centro del tanque para cada evento a 5 y 3 minutos de grabación, pero al no cumplirse el supuesto de normalidad, se aplicaron varias transformaciones: logarítmica, raíz cuadrada, raíz cúbica, inversa y Box-Cox, esta última mediante la función boxcox del paquete MASS. Al no corregirse la distribución del grupo "Control", se adoptó un enfoque no paramétrico, aplicando la función kruskal_test del paquete rstatix y la función dunnTest del paquete FSA. Los tamaños del efecto globales se estimaron mediante la función kruskal_effsize del paquete rstatix, y las representaciones gráficas se generaron con los paquetes ggplot2 y ggpubr, mediante Box-Plots con anotaciones de significación.

En la estrategia del método del remuestro "bootstrap", se desarrollaron scripts con los paquetes readxl, dyplyr, tidyr y ggplot2 , se realizaron 1.000 simulaciones con imputación aleatoria acotada (rango 86,1-145 cm) a partir de los datos originales, obteniendo las medias correspondientes para cada evento, con las que se calculó la diferencia entre condiciones de "Alimentación sin imán" y "Alimentación con imán", se generaron intervalos de confianza al 95 % para esta diferencia, se determinó el porcentaje de simulaciones en las que las medias asociadas a la condición alimento eran mayores a las de la condición alimento con imán y se calculó el tamaño del efecto mediante la d de Cohen's. Los gráficos incluyeron histogramas de diferencias entre condiciones y curvas de densidad por evento, generadas con funciones del paquete ggplot2, como geom_histogram y geom_density.

3. RESULTADOS

3.1. Resultados de la eliminación de los "missing data"

Las distancias medias finales de los individuos al centro del tanque para cada condición experimental, tanto a los 5 minutos como a los 3 minutos de grabación, tras eliminar los registros que no se encontraban dentro del área visible de las grabaciones obtenidas, se muestran en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Medias totales por evento en 5 minutos y 3 minutos de grabación utilizando la eliminación de los "missing data". *Elaboración propia.*

Condición experimental	Media 5 minutos (cm)	Media 3 minutos (cm)
"Control" (CO)	73,38	71,74
"Alimentación sin imán" (AL)	51,16	47,36
"Alimentación con imán" (IM)	51,77	50,41

Las pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) indicaron que las distribuciones eran compatibles con la normalidad en todos los eventos, CO ($p = 0,99$), AL ($p = 0,13$) e IM ($p = 0,50$) en 5 minutos, y CO ($p = 0,98$), AL ($p = 0,47$) e IM ($p = 0,90$) en 3. El test de Levene confirmo la homogeneidad de varianzas en ambos casos también ($F(2,33) = 1,64$, $p = 0,21$ en 5 minutos; $F(2,33) = 3,1$, $p = 0,06$ en 3 minutos). Los análisis de varianza (ANOVA de una vía) mostraron diferencias significativas entre las distintas condiciones experimentales $F(2,33) = 47,54$, $p = 1,92 \times 10^{-10}$ para 5 minutos y $F(2,33) = 44,91$, $p = 3,82 \times 10^{-10}$ como para 3. En ambos análisis, el tamaño del efecto global fue elevado ($\eta 2 = 0,74$; IC95% [0,60; 1,00] en 5 minutos y $\eta 2 = 0,73$; IC95% [0,59; 1,00] en 3 minutos), lo que sugiere que una parte sustancial de la variabilidad observada se explica por la condición experimental. En el test de comparaciones múltiples de Tukey se reflejó el mismo patrón a los 5 minutos y a los 3 minutos de grabación (*Figura 6*): se observaron diferencias significativas entre la condición "Control" (CO) y las condiciones de "Alimentación sin imán" (AL) y "Alimentación

con imán" (IM) ($p < 1 \times 10^{-3}$), mientras que no hubo diferencias significativas entre las dos condiciones de alimentación ($p = 0,96$ en 5 minutos; $p = 0,52$ en 3 minutos).

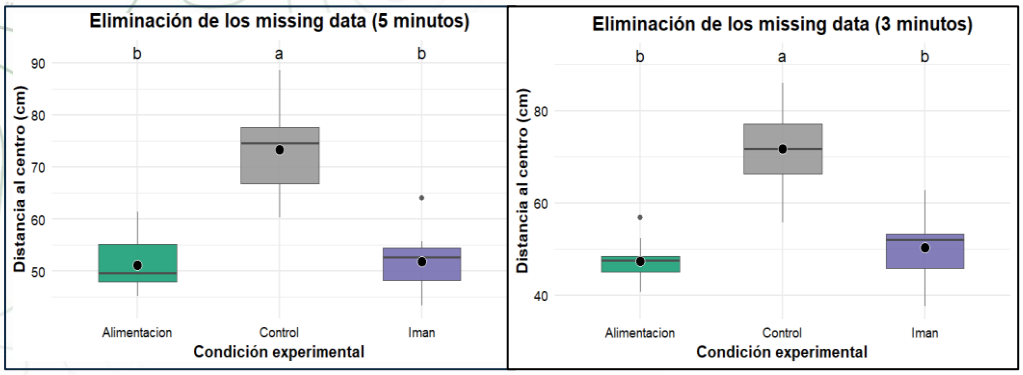


Figura 6. Distancia media final al centro del tanque (cm) en las tres condiciones experimentales tras eliminar los datos faltantes (en 5 y 3 minutos de grabación). Las letras indican diferencias significativas según el test de Tukey ($p < 0,05$). *Elaboración propia.*

3.2. Resultados de la imputación mediante el punto del área no visible

Las distancias medias finales de los individuos al centro del tanque para cada condición experimental, a los 5 y a los 3 minutos de grabación, tras imputar los valores faltantes con el valor medio estimado del área no visible del tanque (115,56 cm), se muestran en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Medias totales por evento en 5 minutos y 3 minutos de grabación utilizando la imputación de los "missing data".*Elaboración propia.*

Condición experimental	Media 5 minutos (cm)	Media 3 minutos (cm)
"Control" (CO)	107,56	106,35
"Alimentación sin imán" (AL)	70,00	62,91
"Alimentación con imán" (IM)	73,33	66,74

Las pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) mostraron que los datos del grupo "Control" no seguían una distribución normal, ni a 5 minutos (CO: $p = 3 \times 10^{-3}$) ni a 3 minutos ($p = 2 \times 10^{-3}$), mientras que las distribuciones de los grupos de "Alimentación sin imán" y "Alimentación con imán" sí eran compatibles con la normalidad (AL: p = 0,09 en 5 minutos, p = 0,88 en 3 minutos; IM: p = 0,81 en 5 minutos, p = 0,62 en 3 minutos). El test de Kruskal-Wallis reveló diferencias estadísticamente significativas entre las condiciones experimentales en ambos tiempos de análisis: $\chi^2(2) = 24{,}4$; $p = 5 \times 10^{-6}$ para 5 minutos, y $\chi^2(2) = 24{,}1$; $p = 6 \times 10^{-6}$ para 3 minutos. El tamaño del efecto, estimado con épsilon al cuadrado, fue elevado en ambos casos ($\varepsilon^2 = 0{,}68$ en 5 minutos y $\varepsilon^2 = 0{,}67$ en 3 minutos), lo que indica una magnitud grande del efecto. Las comparaciones múltiples mediante el test de Dunn (ajustadas por el método de Benjamini-Hochberg) revelaron diferencias significativas entre el grupo "Control" y los otros dos grupos, en ambos análisis, tanto a los 5 minutos (p ajustado = $7{,}50 \times 10^{-6}$ entre "Control" y "Alimentación sin imán") y (p ajustado = $3{,}76 \times 10^{-4}$ entre "Control" y "Alimentación con imán"), sin diferencias entre "Alimentación sin imán" y "Alimentación con imán" (p ajustado = 0,3). Para los 3 minutos, se obtuvieron resultados similares: diferencias entre "Control" y "Alimentación sin imán" (p ajustado = $1{,}09 \times 10^{-5}$) y entre "Control" y "Alimentación con imán" (p ajustado = $2{,}77 \times 10^{-4}$), sin diferencias entre "Alimentación sin imán" y "Alimentación con imán" (p ajustado = 0,37) (*Figura 7*).

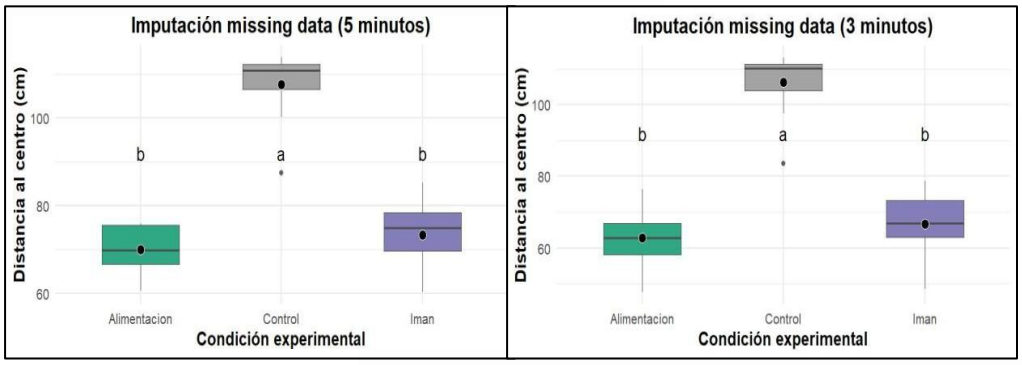


Figura 7. Distancia media final al centro del tanque (cm) en las tres condiciones experimentales tras eliminar los datos faltantes (en 5 y 3 minutos de grabación). Las letras indican diferencias significativas según el test de Dunn ($p < 0{,}05$). *Elaboración propia.*

3.3. Resultados del método de remuestreo "bootstrap"

Las distancias medias finales, sus desviaciones estándar y sus intervalos de confianza al 95% obtenidas, para cada condición experimental, a los 5 y a los 3 minutos de grabación, a partir de las simulaciones de "bootstrap", se muestran en la *Tabla 3*.

Tabla 3. Medias totales, desviaciones estándar e intervalos de confianza al 95%, por evento en 5 minutos y 3 minutos de grabación utilizando el método de remuestreo "bootstrap". *Elaboración propia.*

Condición experimental	Media 5 minutos (cm) ± Desviación estándar	IC 95% (5 minutos)	Media 3 minutos (cm) ± Desviación estándar	IC 95% (3 minutos)
"Control" (CO)	106,04 ± 0,43	105,19 – 106,9	105,07 ± 0,55	104,16 – 105,99
"Alimentación sin imán" (AL)	70,22 ± 0,27	69,72 – 70,76	63,23 ± 0,32	62,63 – 63,83
"Alimentación con imán" (IM)	73,38 ± 0,27	72,24 – 74,04	66,93 ± 0,34	66,27 – 67,61

La diferencia media entre las condiciones de "Alimentación sin imán" y "Alimentación con imán" (AL – IM), a los 5 minutos, fue de -3,17 cm, con un intervalo de confianza que no incluía el valor nulo (IC95% [-3,97; -2,35]. En ninguna de las simulaciones se obtuvo una diferencia positiva (porcentaje de simulaciones donde AL > IM = 0 %), lo que indica que la condición con imán presentó en todas las simulaciones distancias mayores al centro del tanque que la condición "Alimentación sin imán". El tamaño del efecto calculado fue de d = -10,96. La media de la diferencia AL - IM, a los 3 minutos, fue de -3,71 cm, con un intervalo de confianza que tampoco incluía el valor nulo (IC95% [-4,61; -2,82] y nuevamente el porcentaje de simulaciones donde AL fue superior a IM fue del 0 %. El tamaño del efecto estimado mediante la d de Cohen fue incluso mayor que en los 5 minutos, alcanzando un valor de d= -11,21. Los análisis con el método de remuestreo "bootstrap" muestran que tanto a 5 como a 3 minutos, los individuos se situaron más cerca del centro del tanque en las condiciones de "Alimentación con imán" y sistemáticamente aún más cerca del centro sin la presencia del imán. Esto se confirma gracias a los resultados de los intervalos de confianza, la ausencia de solapamiento con el valor nulo y los valores elevados del tamaño del efecto. Las figuras de densidad (*Figura 8.a*) ilustran bien esta distribución, el evento "Control" aparece claramente separada de las otros dos y "Alimentación sin imán" se

diferencia ligeramente de “Alimentación con imán”. Los histogramas de las diferencias AL - IM (*Figura 8.b*) muestran una distribución completamente desplazada hacia valores negativos, con la media marcada en negro y el valor nulo indicado en rojo punteado, no se registraron simulaciones con diferencia positiva.

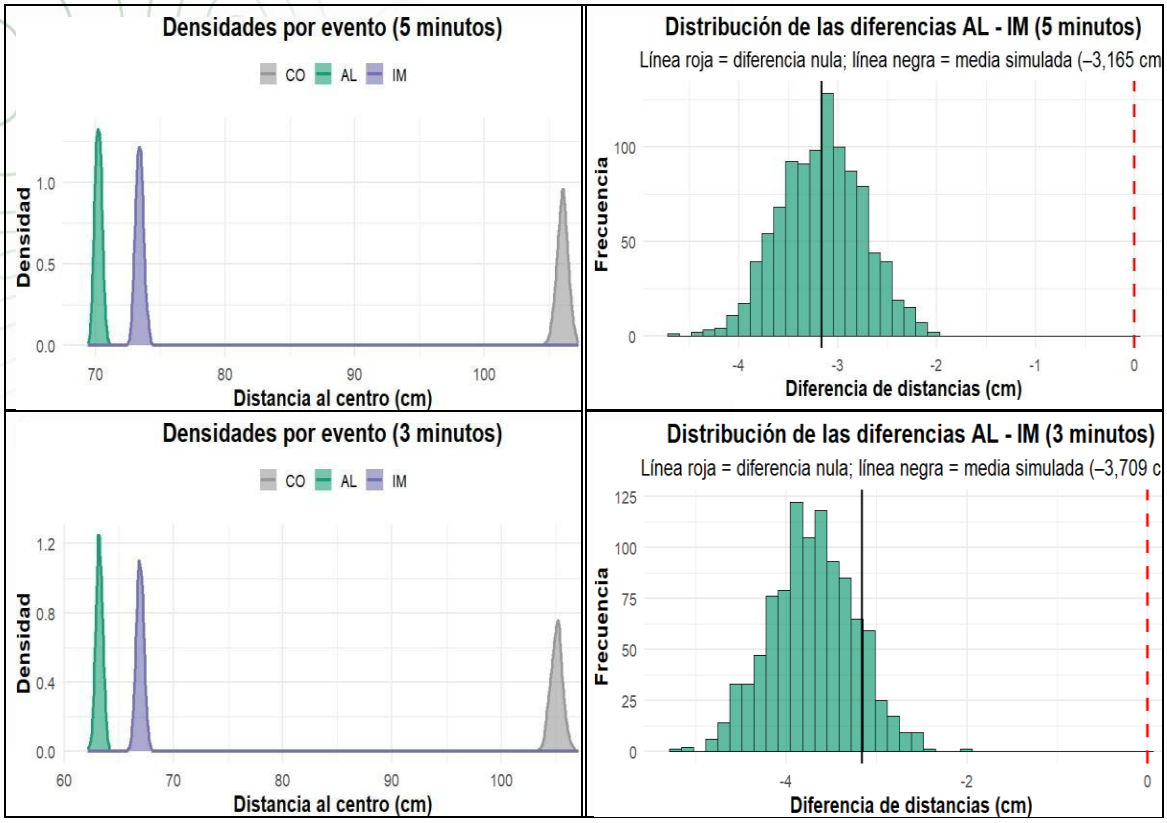


Figura 8. A) Distribución de densidades de distancia al centro del tanque en cada condición experimental tras 1.000 simulaciones “bootstrap” (5 y 3 minutos de grabación). Se aprecia una clara separación entre la condición “Control” (gris) y las condiciones de “Alimentación sin imán” (verde) y “Alimentación con imán” (violeta). B) Histograma de las diferencias de distancia media entre las condiciones de “Alimentación sin imán” (AL) y “Alimentación con imán” (IM) tras 1.000 simulaciones “bootstrap”. La línea negra representa la media de la diferencia de - 3,165 cm a 5 minutos y de - 3,709 cm a 3 minutos, mientras que la línea roja punteada indica el valor nulo. *Elaboración propia.*

4. DISCUSIÓN

4.1. Discusión de los resultados desde el enfoque metodológico y estadístico

El diseño experimental de este estudio se centró en comparar la distancia media al centro del tanque de cinco individuos de *P. motoro* bajo tres condiciones experimentales diferentes: "Control", "Alimentación sin imán" y "Alimentación con imán". Dado que las grabaciones no cubrieron toda la superficie del tanque, fue necesario aplicar tres estrategias para tratar los datos faltantes correspondientes al área no visible. La validez de los resultados obtenidos está directamente condicionada por la correcta elección de dichas estrategias y del enfoque estadístico aplicado.

La eliminación de "missing data" es una práctica común en investigación, a pesar de estar considerada en numerosas ocasiones como una técnica subóptima (Huang & Keller, 2025). Su validez requiere que los datos ausentes estén completamente al azar ("Missing Completely At Random", MCAR), es decir, cuando su ausencia no se relaciona con valores observados ni no observados (Jakobsen et al., 2017). Este supuesto no se cumple en nuestro caso, ya que los datos ausentes no se distribuyeron aleatoriamente entre condiciones. En el evento "Control", la ausencia de estímulos provocó una mayor dispersión de los individuos, por tanto, un mayor número de registros fuera del área visible. En cambio en los eventos de alimentación, la presencia de comida favoreció la permanencia en el centro del tanque, reduciendo así los datos faltantes. Este patrón sugiere una distribución "Missing Not At Random" (MNAR), lo que puede provocar sesgos significativos (Jakobsen et al., 2017). De todas maneras, los análisis bajo esta estrategia cumplieron los supuestos de normalidad (test de Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (test de Levene), lo que permitió realizar un ANOVA de una vía. El análisis reveló diferencias significativas entre condiciones experimentales diferentes, tanto a los 5 como a los 3 minutos. Las comparaciones múltiples mediante el test de Tukey, uno de los métodos más comúnmente utilizados tras un ANOVA cuando se desean comparar todas las parejas de medias entre grupos (Kim, 2015), mostraron diferencias entre el evento "Control" y ambos eventos de alimentación, pero no entre "Alimentación sin imán" y "Alimentación con imán". Este resultado podría interpretarse como ausencia de efecto del imán, aun así, debe considerarse con precaución ya que la distribución desigual de "missing data" entre grupos, puede reducir el poder del análisis para detectar diferencias sutiles (Jakobsen et al., 2017).

El segundo enfoque consistió en imputar los datos ausentes con el punto medio del área no visible del tanque (115,56 cm). Esta técnica permite conservar el tamaño muestral completo, pero introduce una simplificación notable asumiendo que todos los individuos ausentes se encuentran exactamente a esa distancia. Esta suposición reduce la variabilidad interna del grupo pudiendo afectar negativamente a la sensibilidad del análisis (Zhang, 2016). La imputación fija impidió cumplir el supuesto de normalidad en el evento "Control", incluso tras aplicar transformaciones (logarítmica, raíz cuadrada, cúbica, inversa y Box-Cox), por ello se optó por el test no paramétrico de Kruskal-Wallis, que no requiere asumir normalidad (LibreTexts, 2023). Aunque estos tests suelen tener menor potencia que los paramétricos, resultan adecuados en contextos donde la distribución de los datos no puede ajustarse a la normalidad (Politi et al., 2021). El test de Kruskal-Wallis reveló diferencias significativas entre eventos tanto a los 5 como a los 3 minutos. Las comparaciones post hoc mediante el test de Dunn confirmaron diferencias entre el "Control" y ambos eventos de alimentación, pero no entre "Alimentación sin imán" y "Alimentación con imán". Esta metodología al igual que la anterior, sugiere que el efecto del imán no es suficiente como para detectarse significativamente. Desde un punto de vista metodológico, esta estrategia puede ser útil en aproximaciones conservadoras, aunque limitada para evaluar efectos conductuales de baja intensidad.

El tercer enfoque se basó en el método "bootstrap", un método de remuestreo no paramétrico que permite estimar la variabilidad y generar intervalos de confianza sin asumir una distribución específica de los datos (CMU, 2011). En este caso, los "missing data" se imputaron aleatoriamente dentro del área no visible y se realizaron 1.000 simulaciones independientes por evento. A diferencia de los enfoques anteriores, el análisis mediante "bootstrap" detectó diferencias significativas entre "Alimentación sin imán" y "Alimentación con imán" en ambos tiempos. En el 100 % de las simulaciones, la distancia media fue mayor en el evento de "Alimentación con imán". Los intervalos de confianza del 95 % para la diferencia de medias (AL – IM) excluyeron el valor cero, tanto a 5 minutos (IC95%: [-3,97; -2,35]) como a 3 minutos (IC95%: [-4,61; -2,82]), lo que respalda la existencia de un efecto real del imán (Carpenter & Bithell, 2000). Además, el tamaño del efecto estimado con la d de Cohen fue extremadamente alto ($d \approx -11$), muy por encima del umbral para efectos grandes (Lakens, 2013). Este método proporciona una representación más realista de la incertidumbre inherente al comportamiento animal al generar múltiples simulaciones basadas en los datos observados. El "bootstrap" ofrece estimaciones más robustas de la variabilidad y permite extraer conclusiones estadísticamente sólidas incluso con datos faltantes no aleatorios (Schomaker & Heumann, 2018).

4.2. Discusión desde el enfoque biológico

Teniendo en cuenta que el análisis “bootstrap” indica diferencias significativas y tamaños de efecto elevados entre las condiciones de “Alimentación sin imán” y “Alimentación con imán”, hay que destacar como la magnitud práctica de dichas diferencias es bastante reducida. En términos comportamentales, los individuos de P. motoro solo se alejaron unos pocos centímetros del centro del tanque cuando se introdujo el imán. Esta discrepancia entre la estadística y la expresión conductual plantea la necesidad de intentar dilucidar qué factores podrían haber atenuado la respuesta observada. Una posible explicación para la respuesta conductual observada en el estudio podría basarse en la fisiología sensorial de P. motoro. En especies bentónicas, se ha descrito que la distribución de los poros electro sensoriales suele concentrarse en la superficie ventral del cuerpo, con una densidad elevada especialmente en la región de alrededor de la boca, lo que facilitaría la localización de presas enterradas en el sustrato (Jordan et al., 2009; Tricas, 2001). En el caso de P. motoro, su dieta bentónica generalista incluye peces, crustáceos, moluscos e insectos acuáticos (Almeida et al., 2010; Shibuya, 2022), lo que sugiere una especialización sensorial adaptada a ese contexto ecológico.

La sensibilidad de las neuronas aferentes primarias tiende a aumentar con la longitud de los canales ampulares (Sisneros & Tricas, 2000). Por tanto, las especies con canales más cortos, como las del género *Potamotrygon* (Szamier & Bennett, 1980), podrían mostrar un rango de detección más limitado. Esta idea se ve respaldada por los resultados de Harris et al. (2015), quienes evaluaron la sensibilidad electro sensorial de *P. motoro* frente a campos eléctricos generados por dipolos. Según este estudio los individuos comenzaron a reaccionar a una distancia media de 2,73 cm del dipolo, lo que indica un rango de detección muy reducido en comparación con batoideos marinos. Aunque se observó que *P. motoro* es capaz de detectar campos eléctricos débiles (umbral mínimo de 0,20 mV/cm), esta sensibilidad es inferior a la registrada en otras especies marinas, lo que podría explicar parcialmente la débil respuesta conductual observada. Desde esta perspectiva, es posible que la presencia del imán fuera detectada por los individuos, pero dentro de un radio tan limitado que no desencadenara una respuesta conductual clara. La sensibilidad magnética de los individuos al imán no estaría ausente, sino reducida por su fisiología sensorial.

A estas características biológicas se le podría sumar las propiedades físicas del imán utilizado. Se trató de un modelo de neodimio de grado N35, con geometría anular (26 mm de diámetro exterior, 11 mm interior, 4 mm de altura) y un peso de 13,1 g (IMA Magnets, s.f.). Su remanencia magnética mínima se sitúa entre 11.700 y 12.000 Gauss, lo que equivale a un campo de 1,17-1,20 T (K&J Magnetics, 2023), la remanencia magnética representa el campo que conserva un imán en su interior de forma permanente tras ser activado

(Stanford Magnets, s.f.) Aunque este valor es elevado en superficie, la intensidad del campo generado por un imán decae con rapidez, según la ley de potencia inversa del cubo de la distancia (1/r3), tal como describe el modelo físico del dipolo magnético (Kraftmakher, 2007; NASA Goddard Space Flight Center, s.f.). Para explorar esta posibilidad, se incluye en el Anexo III una simulación del comportamiento del campo magnético usando un imán de características similares, debida que no se logró obtener información técnica detallada sobre el imán empleado en este estudio. Los resultados muestran una rápida atenuación, con valores inferiores al campo magnético terrestre a partir de distancias relativamente cortas. Aunque se trata de un modelo aproximado, estos datos apoyan la hipótesis de que el estímulo pudo ser prácticamente imperceptible fuera del área inmediata al centro del tanque, limitando así su eficacia.

Otro aspecto relevante es el tamaño muestral, limitado a cinco individuos (n=5), una cifra habitual en estudios piloto en cautividad, pero insuficiente para capturar la variabilidad biológica de una población (Sorzano et al., 2017). El hecho de que todos los individuos compartieran el mismo tanque introduce un riesgo claro de pseudorreplicación. Todas las medidas provienen de animales expuestos a un entorno físico y social común, lo que puede comprometer la independencia de los datos. En estos contextos recoger un gran volumen de datos no equivale a representar mejor a la población si el número de individuos es bajo (Waller et al., 2013). Se sabe además que muchos animales presentan diferencias individuales en aspectos como la motivación, la exploración o el nivel de estrés, lo que implica que la conducta atípica de uno o dos individuos puede influir significativamente en los resultados del grupo (Kluen et al., 2022).

Finalmente, a estas limitaciones se suma una observación cualitativa que no se ha analizado formalmente. En algunas grabaciones de “Alimentación sin imán”, se observó como los individuos fueron directamente a por el alimento en cuanto se percataron de su presencia, en cambio en presencia del imán, se cree haber observado un comportamiento de merodeo o acecho, en el que los ejemplares permanecían cerca de la comida sin consumirla de inmediato. Este patrón de conducta, en caso de ser cierto, podría interpretarse como una reacción primeriza de rechazo o incertidumbre ante el estímulo del imán e incluso podría estudiarse una posible habituación o desarrollo de tolerancia al campo magnético generado por el imán, fenómeno descrito en otros elasmobranquios tras exposiciones prolongadas (O’Connell et al., 2011).

5. CONCLUSIONES

La elección del método para tratar los datos faltantes influyó notablemente en la detección de diferencias de comportamiento en *P. motoro*. Cuando se aplicaron los enfoques de eliminación directa de "missing data" o imputación fija, no se observaron diferencias significativas entre las condiciones de "Alimentación sin imán" y "Alimentación con imán". Sin embargo, el análisis mediante remuestreo "bootstrap" reveló diferencias estadísticamente significativas entre ambas condiciones, reflejadas en una mayor distancia de los individuos al cebo cuando el imán estaba presente. Aunque este patrón fue constante en todas las simulaciones y estuvo acompañado de tamaños del efecto elevados, las diferencias observadas fueron pequeñas desde un punto de vista práctico. Esto indica que el posible efecto del imán utilizado sobre el comportamiento alimentario podría ser sutil y solo detectable con métodos estadísticos más sensibles.

Este estudio aporta nuevos datos de comportamiento que complementan los ensayos previos del proyecto de la Asociación Chelonia, incorporando por primera vez una especie de raya dulceacuícola. Esta inclusión amplía el espectro taxonómico y permite explorar combinaciones sensoriales no abordadas hasta ahora. En lugar de inducir una evitación clara, el campo magnético podría provocar respuestas intermedias como duda, merodeo o evitación parcial, especialmente en individuos sin experiencia previa con el estímulo. Este patrón abre nuevas líneas de investigación centradas en el papel del historial de exposición, la experiencia individual y la variabilidad interespecífica. Sería especialmente relevante comparar las respuestas de especies marinas y dulceacuícolas, incorporar nuevas variables conductuales como la latencia o la persistencia, aumentar el tamaño muestral y asegurar la independencia entre individuos. Además, explorar diferentes intensidades y tipos de imanes podría ayudar a afinar la interpretación de los efectos observados.

Este TFM, por tanto, se suma al esfuerzo que realiza la Asociación Chelonia por avanzar en la prevención de las capturas accidentales de elasmobranquios en pesquerías, al aportar nuevos datos experimentales, técnicos y conceptuales al proyecto "Reducción de capturas accidentales de elasmobranquios mediante el uso de dispositivos electromagnéticos en pesquerías de palangre". En este proyecto se ha generado evidencia reproducible, se han evaluado herramientas de análisis útiles para futuras investigaciones con limitaciones similares, frecuentes en estudios basados en grabaciones comportamentales y se ha contribuido a definir nuevas líneas de trabajo comportamentales con elasmobranquios ante su exposición a campos magnéticos. Aunque todavía no se pueden establecer

recomendaciones directas sobre el uso de imanes en artes de pesca, se están identificando los factores que condicionan su eficacia y recopilando nuevos datos para orientar futuros trabajos. Existen indicios previos de que este tipo de dispositivos pueden inducir respuestas de evitación en elasmobranquios, pero aún no se ha dado con una estrategia que garantice su éxito en condiciones operativas.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi sincero agradecimiento al Dr. Manuel Merchán Fornelino y a la Asociación Chelonia por confiar en mi e involucrarme en su proyecto. A la Dra. Ainhoa Agorreta Calvo, por sus correcciones y consejos durante la realización de este trabajo. A la Facultad de Ciencias Biológicas de la UCM y sus docentes, por haber sido, durante el grado y el master, un espacio de aprendizaje, crecimiento y disfrute.

Gracias al Acuario de Zaragoza por hacer posible el desarrollo experimental de este trabajo, en especial a Javier González, director del Acuario, Mayte Pozo, directora técnica de la Fundación Acuario de Zaragoza y Carlos Vicente, conservador del Acuario. A mi madre, por su apoyo incondicional y por escucharme leer en voz alta este trabajo una y otra vez. A mi pareja, por estar orgullosa de cada paso que doy, incluso sin entender del todo a veces que es lo que hago. A mis amigos de toda la vida, por tantos años juntos y por los que quedan y en especial a Jorge del Río, que tras ocho horas de jornada laboral encontró tiempo y energía para ayudarme con este TFM. A mis amigos de la carrera, por las horas en el rocódromo que tanto me han ayudado a desconectar. Y por último, a los amigos que me ha regalado este máster, un descubrimiento inesperado que a hecho de este año una experiencia que me llevare para siempre.

BIBLIOGRAFÍA

Almeida, M. P. D., Lins, P. M. D. O., Charvet-Almeida, P., & Barthem, R. B. (2010). Diet of the freshwater stingray Potamotrygon motoro (Chondrichthyes: Potamotrygonidae) on Marajó Island (Pará, Brazil). Brazilian Journal of Biology, 70, 155–162. https://doi.org/10.1590/S1519-69842010000100022

Amaral, C. R., Pereira, F., Silva, D. A., Amorim, A., & de Carvalho, E. F. (2018). The mitogenomic phylogeny of the Elasmobranchii (Chondrichthyes). Mitochondrial DNA Part A, 29(6), 867–878.

Asociación Chelonia. (2012). Memoria técnica final: Reducción de capturas accidentales de elasmobranquios mediante el uso de dispositivos electromagnéticos en pesquerías de palangre. Fundación Biodiversidad y Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Bonfil, R. (1994). Overview of world elasmobranch fisheries. FAO Fisheries Technical Paper 341, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Carpenter, J., & Bithell, J. (2000). Bootstrap confidence intervals: when, which, what? A practical guide for medical statisticians. Statistics in medicine, 19(9), 1141-1164.

CMU Statistics & Data Science. (2011). The Bootstrap (Chapter 11). Carnegie Mellon University. https://www.stat.cmu.edu/~larry/=sml/Boot.pdf

Compagno, L. J. (2001). Sharks of the world: an annotated and illustrated catalogue of shark species known to date (Vol. 1). Food & Agriculture Org.

Courtney, Joshua & Courtney, Ya'el & Courtney, Michael. (2015). Review of Magnetic Shark Deterrents: Hypothetical Mechanisms and Evidence for Selectivity. Aquatic Science and Technology. 3. 10.5296/ast. v3i1.6670.

da Cunha, D. B., da Silva Rodrigues-Filho, L. F., & de Luna Sales, J. B. (2017). A review of the mitogenomic phylogeny of the Chondrichthyes. Chondrichthyes-Multidisciplinary Approach.

de Carvalho, M. R., & Maisey, J. G. (1996). Phylogenetic relationships of the Late Jurassic shark Protospinax Woodward 1919 (Chondrichthyes: Elasmobranchii). In Mesozoic fishes—systematics and paleoecology (pp. 9–46).

Dedman, S., Moxley, J. H., Papastamatiou, Y. P., Braccini, M., Caselle, J. E., Chapman, D. D., ... & Heithaus, M. R. (2024). Ecological roles and importance of sharks in the Anthropocene Ocean. Science, 385(6708), adl2362.

Di Lorenzo, M., Calò, A., Di Franco, A., Milisenda, G., Aglieri, G., Cattano, C., ... & Guidetti, P. (2022). Small-scale fisheries catch more threatened elasmobranchs inside partially protected areas than in unprotected areas. Nature Communications, 13(1), 4381.

Driebel, C.E., Proksch, R., Green, C.R., Neilson, P., & Walker, M.M. (2000). Magnetite Defines a Magnetoreceptor, Nature. 406, 299-302. http://dx.doi.org/10.1038/35018561

FasterCapital. (2025, abril). Método Bootstrap: uso del método Bootstrap para estimar intervalos de confianza. https://fastercapital.com/es/contenido/Metodo-Bootstrap--uso-del-metodo-Bootstrap-para-estimar-intervalos-de-confianza.html

Fundación Biodiversidad. (2012, 29 de julio). Memoria del proyecto. Anexo III: Reducción de capturas accidentales de elasmobranquios mediante el uso de dispositivos electromagnéticos en pesquerías de palangre. Asociación Chelonia.

Gallagher, A. J., Orbesen, E. S., Hammerschlag, N., & Serafy, J. E. (2014). Vulnerability of oceanic sharks as pelagic longline bycatch. Global Ecology and Conservation, 1, 50–59.

Garcia, M. D. J. G., Moll, R. J., Hearn, A., Espinoza, M., & White, E. R. (2025). Inter-specific relationships and their ecological role in an oceanic elasmobranch community.

Hall, M. A., Alverson, D. L., & Metuzals, K. I. (2000). By-catch problems and solutions. Marine Pollution Bulletin, 41(1–6), 204–219.

Harris, L. L., Bedore, C. N., & Kajiura, S. M. (2015). Electroreception in the obligate freshwater stingray, Potamotrygon motoro. Marine and Freshwater Research, 66(11), 1027-1036.

Heithaus, M. R., Frid, A., Wirsing, A. J., & Worm, B. (2008). Predicting ecological consequences of marine top predator declines. Trends in Ecology & Evolution, 23, 202–210.

Hernández-Abreu, E., & Martínez-Pérez, M. (2012). El método bootstrap en la estimación de incertidumbres. Boletín Científico Técnico INIMET, 1, 8–16.

Hodson, R. B. (2001). Magnetoreception in the short-tailed stingray, Dasyatis brevicaudata. University of Auckland, New Zealand. Master's Thesis.

Hopkins, C. (2010). A biological function for electroreception in sharks and rays. The Journal of Experimental Biology, 213, 1005–1007.

Huang, F., Keller, B. Working with missing data in large-scale assessments. Large-scale Assess Educ 13, 13 (2025). https://doi.org/10.1186/s40536-025-00248-9.

Ingemecánica. (s.f.). Conversor de unidades: Campo magnético (Tesla, Gauss, Weber/m²). https://ingemecanica.com/utilidades/unidades-de-medida.html#tesla

Inter-American Tropical Tuna Commission. (s.f.). Antigua Convention. https://www.iattc.org/es-ES/About/Convention

IMA Magnets. (s.f.). Neodimio N35 – Características Intrínsecas. https://imamagnets.com/

Jakobsen, J. C., Gluud, C., Wetterslev, J., & Winkel, P. (2017). When and how should multiple imputation be used for handling missing data in randomised clinical trials–a practical guide with flowcharts. BMC medical research methodology, 17(1), 162.

Jordan, L. K., Kajiura, S. M., & Gordon, M. S. (2009). Functional consequences of structural differences in stingray sensory systems. Part II: electrosensory system. Journal of Experimental Biology, 212(19), 3044–3050. https://doi.org/10.1242/jeb.028738

Kaimmer, S., and A. W. Stoner.2008. Field investigation of rare-earth metal as a deterrent to spiny dogfish in the Pacific halibut fishery. Fish.Res. 94:43–47. Kalmijn, A. J. (1971). The electric sense of sharks and rays. Journal of Experimental Biology, 55, 371–383.

Kim, H. Y. (2015). Statistical notes for clinical researchers: post-hoc multiple comparisons. Restorative dentistry & endodontics, 40(2), 172-176.

Kraftmakher, Y. (2007). Magnetic field of a dipole and the dipole–dipole interaction. European Journal of Physics, 28(3), 409. https://doi.org/10.1088/0143-0807/28/3/003

Klimley, A. P. (1993). Highly directional swimming by scalloped hammerhead sharks, Sphyrna lewini, and subsurface irradiance, temperature, bathymetry, and geomagnetic field. Mar. Biol. (Berlin) 117: 1-22. http://dx.doi.org/10.1007/BF00346421

Kluen, E., Rönkä, K., & Thorogood, R. (2022). Prior experience of captivity affects behavioural responses to 'novel' environments. PeerJ, 10, e13905. https://doi.org/10.7717/peerj.13905

Kirschvink, J. L., Walker, M. M., & Diebel, C. E. (2001). Magnetite-based magnetoreception. Current Opinion in Neurobiology, 11(4), 462-467.

Kolmann, M. (2019, febrero 28). Potamotrygon motoro [Silueta]. PhyloPic. https://phylopic.org/images/db9d25f7-e112-461b-86d2-d3d4dbcb9521/potamotrygon-motoro

Kok, A. (2011). Nose of a shark showing ampullae of Lorenzini [Fotografía]. Science Learning Hub. https://www.sciencelearn.org.nz/images/599-ampullae-of-lorenzini

K&J Magnetics, Inc. (2023). Grades of Neodymium Magnets. https://www.kjmagnetics.com/neomaginfo.asp

Lakens, D. (2013). Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: a practical primer for t-tests and ANOVAs. Frontiers in psychology, 4, 863.

Lameiras, J. L. V., Moura, V. M. D., Dias, L. C., Santos, I. G. C. D., Costa, O. T. F. D., & Dos-Santos, M. C. (2019). Cross-reactivity between Potamotrygon motoro antivenoms and dorsal and stinger extracts of others stingrays (Chondrichthyes: Potamotrygonidae) from the Amazon basin. Toxin Reviews, 38(1), 61–70.

LibreTexts. (2023). 14.11: Removing the normality assumption. En Learning Statistics with R – A tutorial for psychology students and other beginners.

Lorenzini, S. (1678). Osservazioni intorno alle torpedini. Florencia: L'Onofri.

Magalhães, M. R., da Silva Jr, N. J., & Ulhoa, C. J. (2008). A hyaluronidase from Potamotrygon motoro (freshwater stingrays) venom: isolation and characterization. Toxicon, 51(6), 1060–1067.

Molina, J. M., & Cooke, S. J. (2012). Trends in shark bycatch research: current status and research needs. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 22, 719–737.

Morgan, A., & Carlson, J. K. (2010). Capture time, size and hooking mortality of bottom longline-caught sharks. Fisheries Research, 101(1–2), 32–37.

Myers, R. A., & Worm, B. (2005). Extinction, survival or recovery of large predatory fishes. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 360(1453), 13–20.

NASA Goddard Space Flight Center. (s.f.). Properties of Magnetic Dipoles. https://ccmc.gsfc.nasa.gov/static/files/Dipole.pdf

Nishi, T., Kawamura, G., & Matsumoto, K. (2004). Magnetic sense in the Japanese eel, Anguilla japonica, as determined by conditioning and electrocardiography. J. Exp. Biol. 207, 2965–2970. http://dx.doi.org/10.1242/jeb.01131

O'Connell, C. P., Abel, D. C., Gruber, S. H., Stroud, E. M., & Rice, P. H. (2011). Analysis of permanent magnets as elasmobranch bycatch reduction devices in hook-and-line and longline trials. Fishery Bulletin, 109(4), 394-401.

O'Connell, C. P., Abel, D. C., Gruber, S. H., Stroud, E. M., & Rice, P. H. (2011). Response of juvenile lemon sharks, Negaprion brevirostris, to a magnetic barrier simulating a beach net. Ocean & Coastal Management, 54(3), 225–230. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.11.006

O'Connell, C.P., Stroud, E.M., & He, P. (2012). The Emerging Field of Electrosensory and Semiochemical Shark Repellents: Mechanisms of Detection, Overview of Past Studies, and Future Directions. Ocean & Coastal Management.

O'Connell, C. P., Hyun, S.-Y., Gruber, S. H., & He, P. (2014). Effects of barium-ferrite permanent magnets on great hammerhead shark Sphyrna mokarran behavior and implications for future conservation technologies. Endangered Species Research, 26, 255–267. https://doi.org/10.3354/esr00629

Pacoureau, N., Rigby, C. L., Kyne, P. M., Sherley, R. B., Winker, H., Carlson, J. K., ... & Dulvy, N. K. (2021). Half a century of global decline in oceanic sharks and rays. Nature, 589(7843), 567–571.

Politi, M. T., Ferreira, J. C., & Patino, C. M. (2021). Nonparametric statistical tests: friend or foe?. Jornal brasileiro de pneumologia : publicacao oficial da Sociedade Brasileira de Pneumologia e Tisilogia, 47(4), e20210292. https://doi.org/10.36416/1806-3756/e20210292

Real Decreto 502/2022, de 27 de junio, por el que se regula el ejercicio de la pesca en los caladeros nacionales. Boletín Oficial del Estado, 154, de 28 de junio de 2022. https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/06/27/502 BOE

Reglamento (UE) 2024/257 del Consejo, de 10 de enero de 2024, por el que se fijan para 2024, 2025 y 2026 las oportunidades de pesca para determinadas poblaciones de peces aplicables en aguas de la Unión y, para los buques pesqueros de la Unión, en determinadas aguas no comunitarias, y por el que se modifica el Reglamento (UE) 2023/194 Diario Oficial de la Unión Europea, L 2024/257, de 11 de enero de 2024. http://data.europa.eu/eli/reg/2024/257/oj

Regional Activity Centre for Specially Protected Areas. (2018). Annex II: List of endangered or threatened species (SPA/BD Protocol). Barcelona Convention. https://www.rac-spa.org/sites/default/files/annex/annex_2_en_20182.pdf

Rigg, Damian & Peverell, Stirling & Hearnden, Mark & Seymour, Jamie. (2009). Do elasmobranch reactions to magnetic fields in water show promise for bycatch mitigation?. Marine and Freshwater Research. 60. 942-948. 10.1071/MF08180.

RStudio Team. (2024). RStudio: Integrated Development for R (Version 2024.12.0+467). RStudio, PBC.

Shibuya, A. (2022). A review of the ecological role of the Neotropical freshwater stingrays (Chondrichthyes: Potamotrygoninae). Food Webs, 32, e00244. https://doi.org/10.1016/j.fooweb.2022.e00244

Stanford Magnets. (s.f.). What is Remanence (Br)? Recuperado de https://www.stanfordmagnets.com/what-is-remanence-br.html

Schomaker, M., & Heumann, C. (2018). Bootstrap inference when using multiple imputation. Statistics in Medicine, 37(14), 2252–2266. https://doi.org/10.1002/sim.7654

Sisneros, J.A., and T.C. Tricas (2000) Androgen-induced changes in the response dynamics of ampullary electrosensory primary afferent neurons. J. Neurosci., 20: 8586–8595.

Sorzano, C. O. S., Tabas-Madrid, D., Nunez, F., Fernández-Criado, C., & Naranjo, A. (2017). Sample size for pilot studies and precision driven experiments. arXiv preprint arXiv:1707.00222.

Stevens, J. D., Bonfil, R., Dulvy, N. K., & Walker, P. A. (2000). The effects of fishing on sharks, rays, and chimaeras (chondrichthyans), and the implications for marine ecosystems. ICES Journal of Marine Science, 57(3), 476-494.

Stoner A. W., and S. M. Kaimmer.2008. Reducing elasmobranch bycatch: Laboratory investigation of rare earth metal and magnetic deterrents with spiny dogfish and Pacific halibut. Fish. Res. 92:162–168

Szamier, R. B., & Bennett, M. V. L. (1980). Ampullary electroreceptors in the fresh water ray, Potamotrygon. Journal of Comparative Physiology□ A, 138(3), 225-230.

Tallack, S. M., and J. W. Mandelman. 2009. Do rare-earth metals deter spiny dogfish? A feasibility study on the use of electropositive “mischmetal” to reduce the bycatch of Squalus acanthias by hook gear in the Gulf of Maine. ICES J. Mar. Sci. 66:315–322.

The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2025-?. https://www.iucnredlist.org. Accessed on 24/07/2025.

Tricas, T. C. (2001). The neuroecology of the elasmobranch electrosensory world: why peripheral morphology shapes behavior. Environmental Biology of Fishes, 60(1–3), 77–92. https://doi.org/10.1023/A:1007617319985

Waller, B. M., Warmelink, L., Liebal, K., Micheletta, J., & Slocombe, K. E. (2013). Pseudoreplication: A widespread problem in primate communication research. Animal Behaviour, 86(2), 483–488. https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2013.05.038

World Register of Marine Species. (n.d.). World Register of Marine Species. Recuperado el 27 de mayo de 2025, de https://www.marinespecies.org/

Zhang Z. (2016). Missing data imputation: focusing on single imputation. Annals of translational medicine, 4(1), 9. https://doi.org/10.3978/j.issn.2305-5839.2015.12.3

ANEXOS

Anexo . Tabla 1: Características del imán de neodimio

Característica	Descripción
Material base	Neodimio (Nd)
Elemento químico	Nd
Recubrimiento	NiCuNi (níquel-cobre-níquel)
Propiedades del recubrimiento	Protege frente a la corrosión y desgaste del metal, adecuado para uso en agua salada
Protección en medios salinos	Evita la oxidación y el deterioro en ambientes acuáticos
Grado de magnetización	N35
Significado del grado	N = Neodimio, 35 = capacidad máxima de almacenamiento de energía magnética
Energía máxima (BHmax)	33-35 MGOe (millones de Gauss Oersted)
Significado del BHmax	Representa la máxima energía que puede almacenar el imán y su resistencia a desmagnetización
Magnetización	Axial
Geometría	Anular: tipo disco con agujero central
Diámetro exterior	26 mm
Diámetro interior	11 mm
Altura	4 mm
Peso	13,1 gramos
Remanencia magnética (Br)	1,17- 12,1 T o 11.700 – 12.100 Gauss

Anexo 2. Tabla 2: Cronograma de grabaciones

En el cronograma se observa la planificación completa de las grabaciones realizadas para este estudio. La dos fechas marcadas en rojo (del 17 de noviembre de 2024 a el 6 de enero de 2025) indica un periodo de tiempo en el que por cuestiones logísticas ajenas al desarrollo del experimento, no se llevaron a cabo las grabaciones.

Código	IM-12	AL-12	CO-12	IM-11	AL-11	CO-11	IM-10	AL-10	CO-10	IM-9	AL-9	CO-9	IM-8	AL-8	CO-8	IM-7	AL-7	CO-7	IM-6	AL-6	CO-6	IM-5	AL-5	CO-5	IM-4	AL-4	CO-4	IM-3	AL-3	CO-3	IM-2	AL-2	CO-2	IM-1	AL-1	CO-1
25/10/2024																																				
26/10/2024																																				
27/10/2024																																				
28/10/2024																																				
29/10/2024																																				
30/10/2024																																				
31/10/2024																																				
01/11/2024																																				
02/11/2024																																				
03/11/2024																																				
04/11/2024																																				
05/11/2024																																				
06/11/2024																																				
07/11/2024																																				
08/11/2024																																				
09/11/2024																																				
10/11/2024																																				
11/11/2024																																				
12/11/2024																																				
13/11/2024																																				
14/11/2024																																				
15/11/2024																																				
16/11/2024																																				
17/11/2024																																				
06/01/2025																																				
07/01/2025																																				
08/01/2025																																				
09/01/2025																																				
10/01/2025																																				
11/01/2025																																				
12/01/2025																																				
13/01/2025																																				
14/01/2025																																				
15/01/2025																																				
16/01/2025																																				
17/01/2025																																				
18/01/2025																																				
19/01/2025																																				
20/01/2025																																				
21/01/2025																																				
22/01/2025																																				
23/01/2025																																				
24/01/2025																																				
25/01/2025																																				
26/01/2025																																				
27/01/2025																																				
28/01/2025																																				
29/01/2025																																				

Anexo 3. Estimulación simulada de la atenuación del campo magnético

Este anexo se ha desarrollado con el objetivo de estimar de forma teórica cómo disminuye la intensidad del campo magnético a medida que aumenta la distancia respecto al centro de un imán de neodimio.

Esta relación está descrita por la siguiente formula (NASA Goddard Space Flight Center, s.f.) :

$$B_{(r)} = \frac{|M|\sqrt{1 + 3\,cos^2\,\theta}}{r^3}$$

Se contactó con la empresa distribuidora para obtener el valor exacto del momento magnético (|M|),o en su defecto, la intensidad del campo en superficie (Bo), pero no disponían de esa información técnica para este modelo concreto, lo que impidió calcular la atenuación del campo de nuestro imán

Dado que no fue posible obtener directamente el momento magnético (|M|) ni el campo en superficie exacto del imán utilizado en el experimento. se ha optado por realizar una simulación basada en un modelo comercial de referencia cuyas propiedades técnicas son públicas y bien documentadas.

Para ello se ha seleccionado el modelo ZD1 de K&J Magnetics (enlace directo: https://www.kjmagnetics.com/zd1-neodymium-surplus-disc-magnet), un imán de neodimio del tipo N35 con magnetización axial. Este modelo presenta un diámetro de 6 mm y un espesor de 1,5 mm. Su remanencia se sitúa en el rango esperado para los imanes de grado N35, entre 11.700 y 12.000 Gauss. Aunque sus dimensiones difieren de las del imán empleado en el experimento, el modelo ZD1 comparte con este las propiedades clave de composición, grado, orientación magnética y remanencia, por lo que resulta adecuado como referencia técnica para estimaciones comparativas del campo magnético.

El valor de campo en superficie (Bo) especificado por el fabricante para este modelo es de 2.706 Gauss, medido en el eje axial del imán, justo en el centro de una de sus caras. Esta ubicación representa el punto de máxima intensidad del campo en condiciones ideales, y es el que se emplea como base para el modelo de atenuación.

Según la información técnica proporcionada por el fabricante K&J Magnetics, en imanes con forma de disco y magnetización axial, el punto donde el campo magnético es más intenso se encuentra a lo largo del eje central, a una distancia aproximada igual a la mitad del grosor del imán desde su centro. En este caso, dado que el grosor del imán modelo es de 1,5 mm, la distancia de referencia utilizada es:

$$r_o = \frac{1{,}5\ mm}{2} = 0{,}75\ mm = 0{,}00075\ m$$

Con este valor y la fórmula simplificada del modelo dipolar en el eje axial, es posible estimar el momento magnético (|M|). Dado que el ángulo de observación es θ = 0°, se cumple que cos2(θ) = 1, y el factor multiplicador en la ecuación del campo se reduce a:

$$\sqrt{1 + 3\cos^2\theta} = \sqrt{1+3} = 2$$

Por lo que utiliza la siguiente expresión simplificada:

$$B_{o(r)} = \frac{2\,|M|}{ro^3} \Rightarrow |M| = \frac{B_{o(r)}\,ro^3}{2}$$

Sustituyendo los valores conocidos:

$$|M| = \frac{B_{o(r)}\,ro^3}{2} = \frac{0{,}2706 \cdot (0{,}00075)^3}{2} = 5{,}71 \cdot 10^{-11}\ A/m^2$$

Este valor teórico del momento magnético permite calcular la intensidad del campo a distintas distancias desde el centro del imán, bajo el supuesto de un campo dipolar ideal con simetría axial.

$$B_{o(r)} = \frac{2\,|M|}{ro^3}$$

Los valores de intensidad del campo magnético obtenidos mediante la fórmula dipolar se expresan inicialmente en teslas (T), unidad del Sistema Internacional. Dado que la mayoría de la bibliografía técnica sobre disuasores magnéticos en elasmobranquios emplea Gauss (G), se ha realizado una conversión final utilizando el factor: 1 T = 10.000 G

Las estimaciones muestran una rápida disminución de la intensidad del campo magnético con la distancia. A tan solo 1 cm del centro del imán, la intensidad ya se reduce a aproximadamente 1,14 Gauss. A 2 cm, el campo cae a 0,14 Gauss, y a 3 cm desciende aún más, hasta 0,04 Gauss. A 4 cm la intensidad se sitúa en torno a 0,02 Gauss, y a 5 cm el valor cae a 9,1 × 10 -3 Gauss.

A mayores distancias, la atenuación se acentúa notablemente. A 10 cm, el campo es de apenas $1{,}1 \times 10^{-3}$ Gauss, y a 20 cm baja a $1{,}4 \times 10^{-4}$ Gauss. Cuando se alcanzan los 30 cm, la intensidad es de $4{,}2 \times 10^{-5}$ Gauss, y continúa descendiendo, 9×10^{-6} Gauss a 50 cm, 1×10^{-6} Gauss a 100 cm y prácticamente cero a 145 cm.

Estos resultados son coherentes con el comportamiento teórico de un campo dipolar, que decrece según una ley de inverso del cubo (Kraftmakher, 2007; NASA Goddard Space Flight Center, s.f.).

A tan solo 1 cm del centro del imán, el campo se reduce a aproximadamente 1,14 Gauss. A 2 cm, la intensidad ya cae por debajo del campo magnético terrestre (estimado entre 0,25 y 0,65 Gauss según O'Connell et al., 2014). Estos datos reflejan que la capacidad disuasoria del imán depende críticamente de la proximidad del animal al campo generado, lo que plantea limitaciones operativas en contextos reales de pesca.

Aunque esta estimación no se basa en el imán exacto empleado en el experimento, es posible que el campo generado sufriera una atenuación similar. Esta posible rápida pérdida de intensidad podría haber limitado el alcance efectivo del estímulo magnético, lo que explicaría la ausencia de respuestas de mayor magnitud.

Ejemplar de *Potamotrygon leopoldi* del Acuario de Zaragoza. *Fotografía propia.*

Actualmente, las capturas accidentales en el sector pesquero suponen una grave amenaza para los elamosbranquios, lo que no solo afecta a este grupo taxonómico sino también a la degradación de los ecosistemas marinos, ya que cumplen un importante papel en la cadena trófica.

Desde la Asociación Chelonia se está trabajando en un proyecto de conservación para investigar el efecto de la presencia de imanes en el comportamiento de los elamosbranquios, con el objetivo de repeler a estos animales cuando se acerquen a los anzuelos de pesca para evitar que queden atrapados.

En esta monografía, se expone el estudio en cautividad realizado en el Acuario Zaragoza dentro del proyecto de reducción de capturas accidentales de elasmobranquios. Durante todo el estudio se aseguró el bienestar y la seguridad de los animales del acuario.

Chelonia
GLOBAL NATURE CONSERVATION

Acuario de Zaragoza

©Asociación Chelonia, 2025
ISBN: 978-84-09-79449-2