


# ESTUDIO DEL PAISAJE SONORO

## DEL HÁBITAT DE LOS CETÁCEOS E IMPACTOS ANTROPOGÉNICOS EN EL PACÍFICO PANAMEÑO

Informe técnico final | agosto 2026

GOBIERNO NACIONAL
CON PASO FIRME
MINISTERIO DE AMBIENTE
MARVIVA
panacetacea
gef
WWF
Aliados por el manejo sostenible del Pacífico
PNUD

INFORME TÉCNICO FINAL

# ESTUDIO DEL PAISAJE SONORO DEL HÁBITAT DE LOS CETÁCEOS E IMPACTOS ANTROPOGÉNICOS EN EL PACÍFICO PANAMEÑO

**Marco de ejecución**

Proyecto regional “Hacia una gestión conjunta, integrada y basada en los ecosistemas del Gran Ecosistema Marino del Pacífico Costero Centroamericano (GEM PACA).

**Financiado por** Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés)

**Implementado por** el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

**Ejecutado por** el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF Mesoamérica)

**Agencia ejecutora**

Fundación MarViva

**Aliado de implementación**

Panacetacea

**Responsables**

Coordinadora: Dra. Betzi Pérez Ortega

Experta en paisaje acústico: Dra. Laura J. May-Collado

**Fecha de inicio: mayo de 2025**

# AGRADECIMIENTOS

Para todas las personas que contribuyeron al desarrollo de este proyecto, desde la instalación de las grabadoras en cada uno de los sitios de estudio, hasta el procesamiento y análisis de los datos.

**Asistentes Panacetacea**

Andrés Santamaría
Milagros González
Ann Marie Gordón
Madelein Aparicio

**Asistentes ONDAS Lab**

Emma VerGow
Ilaria Coero-Borga

**Buzos**

Abhy Verdurmen (Dirección de Costas y Mares -DICOMAR)
Amister Pérez (CCIMBIO)
Andrés Moreno
Carlos Spragge (Buzos Boca Brava)
Christian Moreno
Erasmo Sánchez (CCIMBIO)
Karen Domínguez (Dirección de Costas y Mares -DICOMAR)
Kevin Sánchez (Dirección de Costas y Mares -DICOMAR)
Luis Bernal (Dirección de Costas y Mares -DICOMAR)
Ramiro Solís (Dirección de Costas y Mares -DICOMAR)
Yomar Machado (Buzos Boca Brava)

**Capitanes**

Algis García
Luis Bernal
Oriel Abrego
Porfirio Saldaña
Luis Vergara (Dirección de Costas y Mares -DICOMAR)
José Prado (Dirección de Costas y Mares -DICOMAR)

**Servicio Nacional Aeronaval (SENAN)**



Fotografía: Shutterstock / Seb c est bien / WWF

# CONTENIDO


1. Introducción 7
2. Objetivos del proyecto 10
   2.1. Objetivo general 10
   2.2. Objetivos específicos (OE) 10
3. Métodos 13
   3.1. Área de estudio 13
      3.1.1. Refugio de Vida Silvestre Isla Boná 13
      3.1.2. Isla Cébaco, Golfo de Montijo 14
      3.1.3. Isla Contreras, Parque Nacional Coiba 14
      3.1.4. Isla Contadora, Archipiélago de las Perlas 14
      3.1.5. Refugio de Vida Silvestre Isla Iguana 14
      3.1.6. Islas Ladrones, Golfo de Chiriquí 15
      3.1.7. Isla Paridas, Parque Nacional Marino Golfo de Chiriquí 15
   3.2. Grabadoras autónomas submarinas 16
   3.3. Composición del paisaje sonoro 17
   3.4. Niveles de ruido bajo el agua 19
   3.5. Patrones espaciales y temporales 20
   3.6. Impacto de botes en la ocurrencia de cantos de ballenas 20
4. Resultados 21
   4.1. Composición del paisaje sonoro 21
   4.2. Patrones espaciales del paisaje sonoros 21
   4.3. Patrones mensuales de la composición del paisaje sonoro 22
   4.4. Patrones diarios de la composición del paisaje sonoro 24
   4.5. Combinación del efecto espacial y temporal en la composición del paisaje sonoro 25
   4.6. Promedios espectrales de largo plazo 27
      4.6.1. Boná 28
      4.6.2. Cébaco 29
      4.6.3. Contreras 30
      4.6.4. Contadora 31

4.6.5. Isla Iguana 32

4.6.6. Ladrones 33

4.6.7. Paridas 34

4.7. Niveles de ruido y asociación con la composición del paisaje sonoro 34

4.8. Impacto de la presencia de botes en cuando al canto de ballenas 36

**5. Futuros análisis 38**

5.1. Detector de ballenas jorobadas basado en aprendizaje profundo (Deep Learning) 38

5.2. Detectores de peces y botes 39

5.3. Detectores facilitarán monitoreo en tiempo real 39

5.4. Impactos del cambio climático global 40

**6. Conclusiones 41**

**7. Recomendaciones 43**

7.1. Mantener y ampliar el programa de monitoreo acústico pasivo a largo plazo 43

7.2. Incorporar el monitoreo acústico en la gestión de áreas marinas protegidas 43

7.3. Fortalecer la gestión del tráfico marítimo en zonas de alta importancia biológica 43

7.4. Continuar apoyando el crecimiento científico y tecnológico 44

**8. Referencias 45**



Fotografía: Carlos Estrada

# 1. Introducción

El paisaje sonoro marino consiste en tres fuentes principales de sonidos: biológico (peces, mamíferos marinos, etc.), abiótico (oleaje, viento, lluvia, temblores, etc.) y antropogénico (ruido de embarcaciones de varios tamaños, exploración petrolera, construcción costera, etc.) (Pijanowski et al., 2011). Los sonidos biológicos son usados para localizar presas, navegar, y como señales de comunicación bajo contextos sociales como cortejo, madre-crías, territorialidad, entre otros (Erbe et al., 2019). Las fuentes de ruido antropogénico en el mar fueron introducidas durante la revolución industrial, con la invención de embarcaciones motorizadas y otras maquinarias que producen sonidos a varias intensidades y frecuencias (Duarte et al., 2021). La maquinaria usada para la construcción costera y exploraciones marinas tienden a generar sonidos 'impulsivos' mientras que el ruido generado por la cavitación de las aspas de motores genera ruidos continuos o intermitentes, dependiendo de las características de las aspas, mantenimiento, y velocidad (Syrjala et al., 2020).

La cavitación de las propelas puede generar ruido de hasta 180 dB en un amplio rango de frecuencias, como resultado de la formación y colapso de burbujas durante la rotación de la hélice. Este ruido puede propagarse hasta 100 km de distancia desde la fuente. Tales niveles se consideran potencialmente letales y, en ambientes terrestres, son comparables al lanzamiento de cohetes o a explosiones de gran magnitud. Embarcaciones de gran tamaño suelen generar ruidos de baja frecuencia (<50 Hz) debido a la rotación lenta de sus propelas, mientras que embarcaciones más pequeñas pueden producir ruido de hasta 20 kHz. Ambos rangos de frecuencia se traslapan con las señales acústicas utilizadas por organismos marinos, poniendo en riesgo sus actividades diarias y su salud (Haviland-Howell et al., 2007; Perez-Ortega et al., 2021; Gagne et al., 2022). Adicionalmente, más recientemente algunas embarcaciones comerciales están reemplazando pintura por dispositivos ultrasónicos para prevenir que crustáceos y algas se adhieran a las superficies de las embarcaciones. Esta nueva tecnología se promociona como no tóxica, pero estudios recientes han demostrado el impacto de esta tecnología en cetáceos que usan frecuencias ultrasónicas, en donde se reduce la detección de presas, interrumpe su comunicación, y resulta en cambios de hábitat (Trickey et al., 2022).



Fotografía: Carlos Estrada

Finalmente, es importante destacar que desde los años 1950s los niveles de ruido bajo el agua han incrementado 3.3 dB por década (Frisk, 2012). Si consideramos este dato como un valor constante, el nivel de incremento se proyecta a ~25 dB en 7.6 décadas, lo que equivale a 300 veces más energía sónica en el océano hoy día que en los años 1950s. Este incremento en el ruido bajo el agua se debe principalmente al tráfico de embarcaciones comerciales que transportan desde alimentos hasta automóviles (Erbe et al., 2019). Los múltiples impactos de este incremento en la vida marina son evidenciados en una multitud de estudios; desde efectos negativos del enmascaramiento auditivo de señales en el comportamiento, en el reclutamiento de larvas de peces e invertebrados marinos en hábitats de arrecifes coralinos –los bosques del mar –, e impactos fisiológicos en la salud reproductiva causados por el incremento de hormonas del estrés. Estos efectos se observan tanto en cetáceos como peces e invertebrados marinos (ej.: camarones, langostas) de valor comercial (Erbe et al. 2016, 2019). Como es de esperar, el impacto del ruido en la vida marina es particularmente crítico en áreas donde el tráfico de embarcaciones está concentrado como marinas y puertos, y rutas preestablecidas de tráfico marítimo. En estos casos la constante presencia de ruido hace que el enmascaramiento esté presente de forma diaria, causando estrés agudo (altos valores de cortisol), principalmente en peces cuya movilidad es más limitada y disminuyendo su habilidad de detectar depredadores (Nichols et al., 2015; McCormick et al., 2019). Sin embargo, altos niveles de cortisol también se han encontrado en cetáceos que viven en hábitats con alto tráfico de embarcaciones (Watt et al., 2020).

El Gran Ecosistema Marino del Pacífico Costero Centroamericano (PACA) se caracteriza por su alta biodiversidad marina, de la cual los mamíferos marinos constituyen un componente fundamental. Esta región alberga aproximadamente el 36 % de las especies de cetáceos descritas a nivel mundial, lo que la convierte en una de las áreas de mayor riqueza para este grupo taxonómico (May-Collado et al., 2017). Sin embargo, las poblaciones de cetáceos enfrentan múltiples amenazas, entre las que destacan la mortalidad incidental en pesquerías, la pérdida y degradación del hábitat, las enfermedades emergentes y asociadas a actividades humanas, así como el crecimiento acelerado de la industria de observación de ballenas y delfines (May-Collado et al., 2017).

Entre las especies de gran importancia ecológica, económica y de conservación para la región se encuentra la ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*). Estas ballenas realizan extensas migraciones desde sus áreas de alimentación en los hemisferios norte y sur hacia las aguas tropicales del Pacífico centroamericano, donde llevan a cabo actividades de reproducción, apareamiento y crianza (Rasmussen et al., 2007; Félix et al., 2011). En Panamá, la población que utiliza con mayor frecuencia las aguas nacionales corresponde a la población del hemisferio sur, conocida como el Segmento Poblacional Distinto (DPS) N°13. Estos individuos llegan a la región a partir de julio y permanecen hasta octubre o noviembre, cuando inician su retorno hacia las áreas de alimentación en Antártica y el Estrecho de Magallanes en Chile. Por otro lado, las ballenas provenientes de la población del hemisferio norte, también conocida como Centroamericana o DPS N°6, se observa con menor frecuencia. Cuando están presentes, suelen registrarse principalmente entre diciembre y enero en el Golfo de Chiriquí (ver Section 4).

Dentro del PACA, el avistamiento de cetáceos, sobre todo alrededor de ballenas jorobadas, se ha consolidado como una de las actividades ecoturísticas más relevantes para las comunidades costeras. Hoyt e Iñíguez (2008) estimaron que los ingresos asociados a esta actividad en Panamá alcanzaban los US$3.14 millones, posicionando al país dentro de una de las industrias turísticas de más rápido crecimiento, con una tasa anual estimada del 53 % (O'Connor et al., 2009). Este crecimiento a ocurrido de forma desorganizada y sin ningún tipo de ordenamiento ni planificación, sobrepasando algunas veces la capacidad de carga de las localidades y acosando a los animales. En el 2014 se identificaron 11 comunidades costeras en el Pacifico panameño (Contadora, Saboga, Pedasí, Tonosí, Montijo, Santa Catalina, Mariato, Boca Chica, Pedregal, Taboga, Bahía Piña) donde se realiza el turismo de avistamiento de cetáceos. Actualmente, comunidades como Palo Seco, Punta Chame e Isla Otoque también se suman a esta actividad.

En estas comunidades la actividad se desarrolla principalmente mediante embarcaciones motorizadas, lo que genera preocupación por el ruido submarino producido tanto por los motores como por la cavitación de las hélices. En este contexto, es fundamental desarrollar investigaciones que permitan determinar la contribución del ruido generado por las embarcaciones turísticas al paisaje sonoro marino utilizado por los cetáceos. Esta necesidad es particularmente relevante porque los cetáceos dependen del sonido como su principal vía de interacción con el entorno. A través de señales acústicas, los cetáceos localizan presas, navegan, coordinan comportamientos sociales, realizan actividades reproductivas y mantienen la comunicación entre madres y crías. Por ello, cualquier alteración en el ambiente acústico puede afectar procesos biológicos esenciales para su supervivencia y éxito reproductivo, que puede directamente cambiar el uso del hábitat y consecuentemente la economía local.

# 2. Objetivos del proyecto

Hoy en día, se espera que los tomadores de decisiones implementen acciones importantes para mitigar las amenazas que enfrentan las poblaciones de cetáceos, con base en información biológica que, sin embargo, muchas veces suele estar limitada por la falta de recurso humano y/o tecnológico. El reto de estudiar cambios en el hábitat y estado de las poblaciones de cetáceos, a corto y a largo plazo, implica altos costos asociados a monitoreos, sesgos en observación y calibración de la información, y limitaciones en tiempo (horas de buceo, o bote) y espacio (áreas costeras). En este contexto, el uso de tecnologías de acústica pasiva para monitorear el paisaje sonoro marino se presenta como una alternativa relativamente económica y confiable para realizar monitoreos a largo plazo.

## 2.1 Objetivo general

**Caracterizar y comparar el paisaje sonoro marino y la comunidad acústica (Figura 1) de siete localidades del Pacifico de Panamá** (Islas Ladrones, Paridas, Contreras, Iguana, Cébaco, Boná y Contreras) mediante el uso de tecnologías de monitoreo acústico pasivo.

## 2.2 Objetivos específicos (OE)

- Identificar las fuentes principales de sonido que más contribuyen al paisaje sonoro marino de cada localidad.
- Determinar los patrones espaciales y temporales de estas fuentes de sonidos por localidad.
- Determinar el grado de impacto del ruido de motores a los cetáceos.



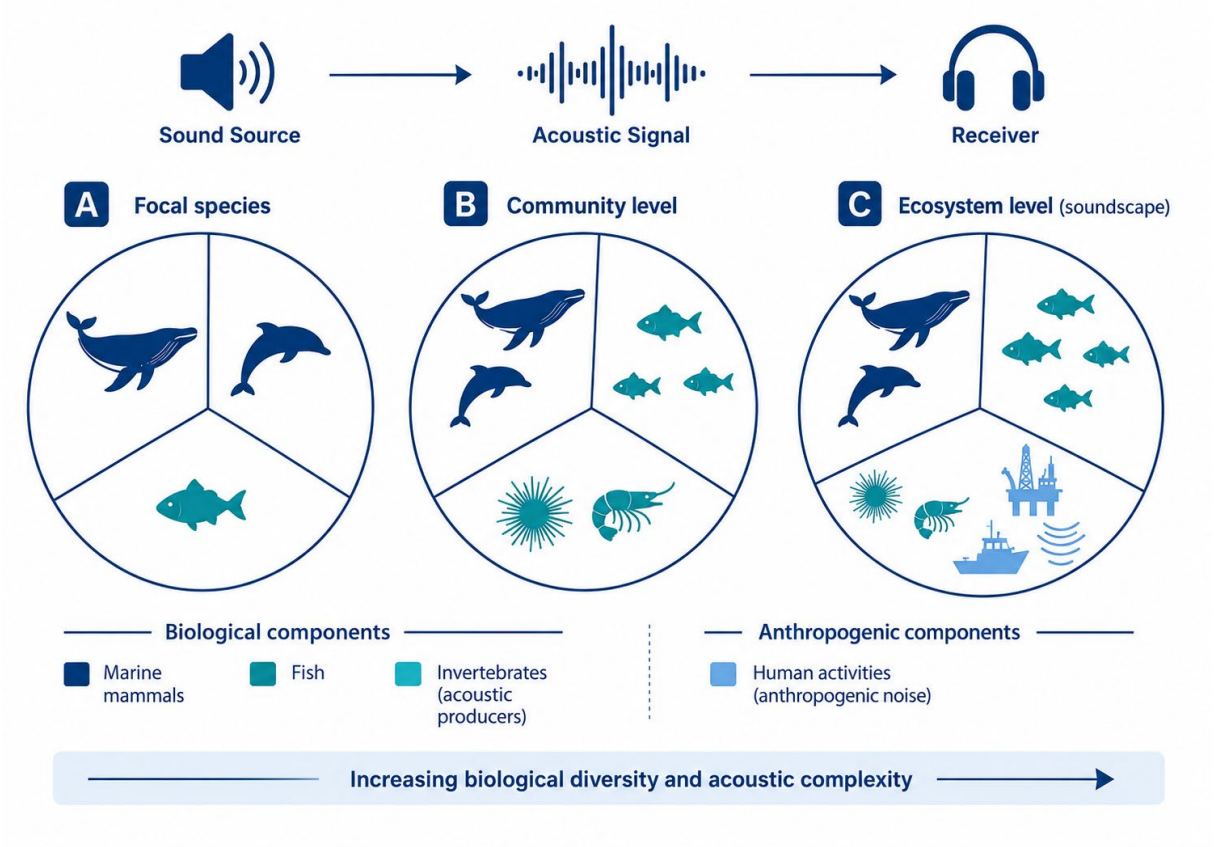



**Figura 1. Esquema conceptual de los distintos componentes de una comunidad acústica y un paisaje sonoro (figura tomada del laboratorio ONDAS de la Universidad de Vermont).**

La Figura 2 presenta escenarios potenciales del paisaje sonoro en función de la contribución relativa del ruido generado por motores de embarcaciones y de la diversidad de sonidos biológicos que conforman la comunidad acústica de cada localidad. En los hábitats considerados saludables, se espera una alta diversidad de fuentes biológicas de sonido, reflejada en una comunidad acústica compleja y activa, junto con una baja contribución del ruido antropogénico proveniente de embarcaciones. Por el contrario, los hábitats degradados se caracterizarían por una menor diversidad y abundancia de sonidos biológicos, acompañadas de una mayor presencia de ruido de motores. En consecuencia, la composición del paisaje sonoro puede utilizarse como un indicador del estado ecológico del hábitat, donde un predominio de sonidos biológicos sugiere condiciones ambientales favorables, mientras que una mayor dominancia del ruido antropogénico podría estar asociada con procesos de degradación ambiental.

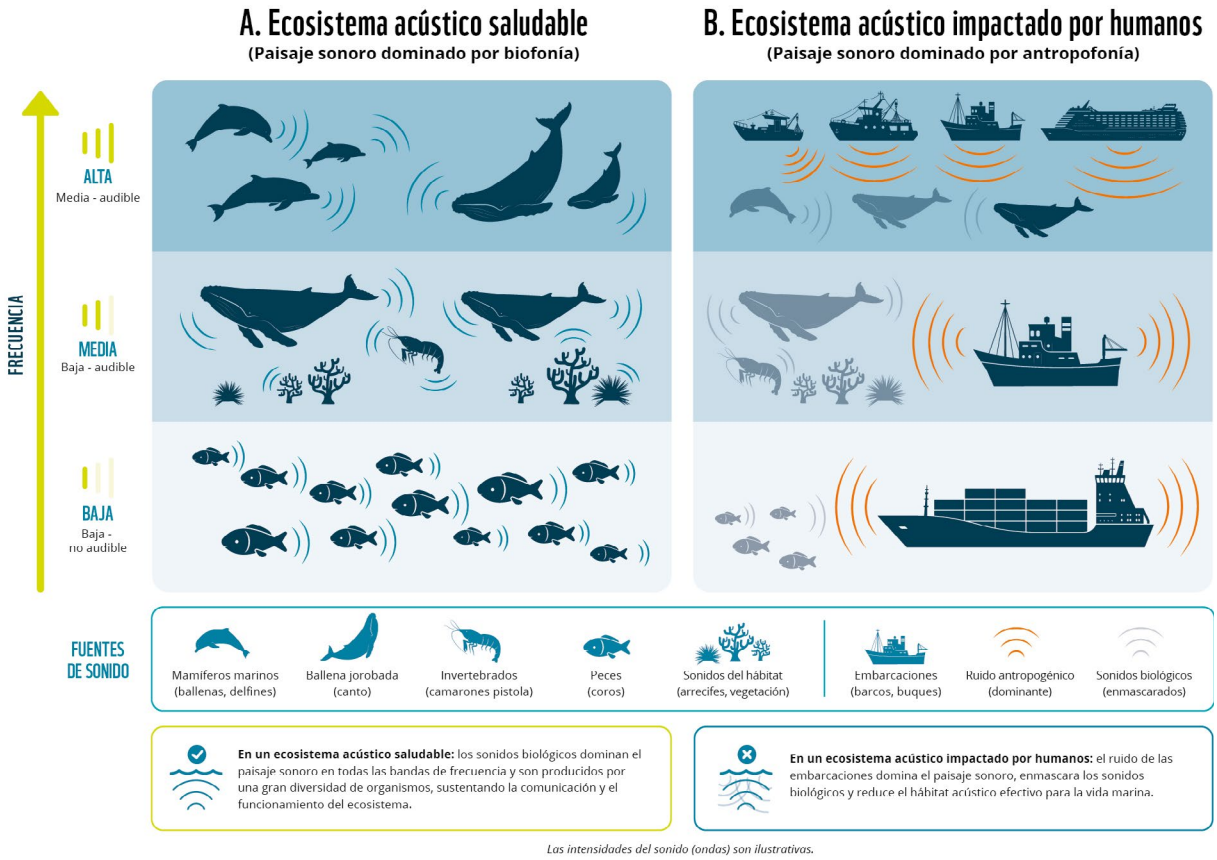



**Figura 2. Ejemplos de paisajes sonoros esperados durante el proyecto: A) paisajes sonoros saludables, caracterizados por una mayor ocurrencia y detectabilidad de sonidos biológicos; y B) paisaje sonoro degradado, asociado a una elevada presencia de ruido de embarcaciones, en comparación con localidades con menor actividad humana (figura tomada del laboratorio ONDAS de la Universidad de Vermont).**



# 3. Métodos

## 3.1 Área de estudio

El Pacífico panameño se extiende a lo largo de aproximadamente 1,697 km de costa, desde la frontera con Costa Rica hasta Colombia. Forma parte del Corredor Marino del Pacífico Este Tropical (CMAR), y se caracteriza por ser una de las regiones más productivas y diversas. Incluye una gran variedad de ecosistemas costeros e insulares, como golfos, bahías, estuarios, manglares, arrecifes coralinos, archipiélagos, praderas de pastos marinos, fondos blandos y montes submarinos (Maté, 2003). Entre estos ecosistemas destacan los encontrados en el Parque Nacional Coiba, el Archipiélago de Las Perlas, el Parque Nacional Marino Golfo de Chiriquí y el golfo de Panamá como los Refugios de Vida Silvestre Isla Boná e Isla Iguana, todos ellos bajo distintas categorías de protección.

Desde el punto de vista oceanográfico, el Pacífico panameño presenta dos regiones con características contrastantes debido a las áreas de afloramiento y al grado de impacto por los efectos de El Niño en la distribución de las temperaturas. El golfo de Panamá, ubicado hacia el este del país y el Golfo de Chiriquí ubicado hacia el oeste del país. Durante la época seca, el golfo de Panamá experimenta uno de los sistemas de afloramiento costero más importantes del Pacífico Este Tropical (PET), generando un incremento de la concentración de fitoplancton, lo que sostiene altas tasas de productividad primaria y favorece abundantes comunidades de zooplancton, peces pelágicos, mamíferos y aves marinas (D'Croz et al., 1991; Maté, 2003). En contraste, el golfo de Chiriquí, hacia el oeste, presenta una columna de agua más cálida y estratificada durante gran parte del año, con una menor intensidad de afloramiento y condiciones ambientales relativamente más estables (D'Croz et al., 1991; Maté, 2003).

El Pacífico panameño constituye también un corredor biológico para numerosas especies migratorias, entre ellas la ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*), que utiliza las aguas panameñas como área de reproducción y crianza (Rasmussen et al., 2007); además de diversas especies de delfines, tiburones, mantarrayas y tortugas marinas. Adicionalmente a su importancia ecológica, el Pacífico panameño posee un alto valor económico. Sus recursos sustentan pesquerías artesanales e industriales de especies pelágicas y demersales, incluyendo pargos, corvinas, atunes, dorados, camarones y tiburones (ARAP, 2024). Paralelamente, el desarrollo del turismo costero y marino, particularmente el avistamiento de cetáceos, el buceo recreativo y el ecoturismo en áreas protegidas como el Parque Nacional Coiba, el RVS Isla Iguana y el PNM Golfo de Chiriquí, ha incrementado la actividad de embarcaciones, constituyéndose como actividades altamente lucrativas y reemplazando la pesca artesanal.

El presente estudio de monitoreo del paisaje sonoro se realizó en siete localidades distribuidas a lo largo del Pacífico panameño. Los sitios fueron seleccionados para representar un gradiente de condiciones ecológicas y de manejo, incluyendo áreas marinas protegidas con diferentes categorías de conservación y zonas sin protección oficial. Las localidades evaluadas fueron:

### 3.1.1. Refugio de Vida Silvestre Isla Boná

El Refugio de Vida Silvestre Isla Boná se localiza en el sector oriental del Golfo de Panamá y comprende la Isla Boná, isla Otoque y los islotes circundantes. Las aguas que rodean este refugio forman parte de una zona de alta productividad biológica influenciada por los procesos de afloramiento estacional del golfo de Panamá, lo que favorece una gran diversidad de peces, la precencia de cetáceos y otras especies de importancia ecológica. *Descripción del área inmediata donde se ubicó el hidrófono*: fondo marino rocoso con parches coralinos.

### 3.1.2. Isla Cébaco, Golfo de Montijo

Isla Cébaco es la tercera isla más grande de Panamá, ubicada en el Pacífico oriental, al sur del golfo de Montijo, en la provincia de Veraguas. Posee extensas playas, costas rocosas y una amplia plataforma marina influenciada por los procesos oceanográficos del golfo de Montijo y el cercano Parque Nacional Coiba. Sus alrededores albergan una gran diversidad de hábitats costeros y marinos, incluyendo arrecifes rocosos, fondos arenosos y zonas de manglar, que sustentan una elevada biodiversidad de peces, invertebrados, aves y mamíferos marinos que en su conjunto sustentan actividades de turismo, pesca artesanal y pesca deportiva. *Descripción del área inmediata donde se ubicó el hidrófono*: fondo marino rocoso-arenoso.

### 3.1.3. Isla Contreras, Parque Nacional Coiba

Esta isla se encuentran en el sector occidental del golfo de Chiriquí, y forman parte de Parque Nacional Coiba. La isla está rodeada de aguas tropicales con una amplia variedad de hábitats marinos, incluyendo arrecifes rocosos, fondos arenosos y parches de coral que son influenciados por la dinámica oceanográfica del Pacífico este troical, caracterizado por variaciones estacionales en la productividad marina. Su entorno presenta un bajo nivel de intervención humana, siendo usada ocasionalmente por pescadores artesanales y centros de buceo. *Descripción del área inmediata donde se ubicó el hidrófono*: fondo marino rocoso con parches coralinos.

### 3.1.4. Isla Contadora, Archipiélago de las Perlas

La isla Contadora, forma parte de la Zona Especial de Manejo Marino-Costera del Archipielago de las Perlas, en la porción central del golfo de Panamá. Esta región es caracterizada por una marcada variabilidad oceanográfica asociada a la surgencia estacional inducida por los vientos alisios durante la estación seca (enero-abril). La profundidad en los alrededores de las islas oscila entre los 10 y 50 m. la temperatura superficial del mar varía estacionalmente entre 20 y 30°C, registrándose los valores más bajos durante los eventos de surgencia y los más altos durante la estación lluviosa. El fondo marino está compuesto por una combinación de sustratos rocosos, arrecifes coralinos someros, fondos arenosos y parches coralinos. La mayor parte de la actividad turística se desarrolla en los alrededores de Isla Contadora y Saboga donde confluyen tanto embarcaciones locales como provenientes desde la ciudad de Panamá. *Descripción del área inmediata donde se ubicó el hidrófono*: fondo marino arenoso.

### 3.1.5. Refugio de Vida Silvestre Isla Iguana

El Refugio de Vida Silvestre Isla Iguana se localiza en el extremo suroriental de la Península de Azuero en la Provincia de Los Santos. Está rodeado por más de 40 ha de arrecifes coralinos, fondos arenosos y sustratos rocosos, que albergan una alta diversidad de peces de arrecife, incluyendo varias especies de importancia comercial. Las profundidades en el área varían entre 5 y 35 m, con zonas arrecifales someras y sectores de mayor profundidad hacia el perímetro del refugio. Al igual que los demás sitios dentro del golfo de Panamá, sus aguas están expuestas a eventos de afloramientos durante la estación seca, los cuales incrementan la disponibilidad de nutrientes y la productividad biológica. Sus playas de área blanca y arrecifes de coral son un atractivo para el turismo, actividad que se desarrolla durante todo el año. Descripción del área inmediata donde se ubicó el hidrófono: predominan los arrecifes coralinos y sustratos rocosos.

### 3.1.6. Islas Ladrones, Golfo de Chiriquí

Las islas Ladrones se ubican frente a la costa sur de la provincia de Chiriquí. Este archipiélago está conformado por varias islas e islotes de origen volcánico rodeados por una plataforma marina donde predominan costas rocosas, arrecifes rocosos, fondos arenosos y parches coralinos. Las profundidades en el área de estudio varían generalmente entre 10 y 60 m, aumentando rápidamente hacia el talud de la plataforma continental. Aunque el archipiélago no cuenta con una categoría formal de protección, constituye un sitio de alta importancia ecológica y pesquera. Descripción del área inmediata donde se ubicó el hidrófono: predominan los arrecifes coralinos y sustratos rocosos.

### 3.1.7. Isla Paridas, Parque Nacional Marino Golfo de Chiriquí

Las Islas Paridas, ubicadas dentro del Parque Nacional Marino Golfo de Chiriquí se localiza en la costa pacífica occidental de Panamá. Comprende una amplia extensión de ecosistemas marino-costeros, incluyendo arrecifes coralinos, manglares, playas e islas de origen volcánico. Las profundidades en los alrededores de las Islas Paridas oscilan generalmente entre 5 y 40 m, incrementándose hacia los canales interinsulares y el borde de la plataforma continental. Esta área protegida es reconocida por su alta biodiversidad y por ser un sitio de importancia ecológica y económica para las comunidades costeras que dependen de la pesca y del turismo de playa. Descripción del área inmediata donde se ubicó el hidrófono: predominan el sustrato rocoso-arenoso.




**Figura 3. Mapa mostrando las localidades en las que se instalaron grabadoras acústicas con el objetivo de estudiar la ocurrencia y la contribución de cetáceos, peces, y embarcaciones al paisaje sonoro marino en el Pacífico de Panamá.**



Fotografía: WWF Mesoamérica

## 3.2 Grabadoras autónomas submarinas

Se colocaron un total de ocho grabadoras autónomas submarinas modelo Soundtrap 600STD (Compañía Ocean Instruments; bandwidth 20 Hz-60 kHz ±3 dB; self-noise of less than sea-state 0 in the bandwidth 100 Hz-2 kHz and less than 36 dB re 1 µPa above 2 kHz) en Punta Burica e islas Paridas, Ladrones, Contreras, Cébaco, Iguana, Boná y Contadora (Figura 3). La grabadora colocada en Punta Burica desafortunadamente se perdió durante el primer periodo del monitoreo. Las grabadoras fueron programadas para grabar el paisaje sonoro de cada localidad por 25 minutos cada hora a una tasa de muestreo de 64 kHz y colocadas a una profundidad promedio de 18.3 m (SD=4.2). Las grabaciones se realizaron en dos periodos: de mayo a diciembre del 2025 y de diciembre del 2025 a mayo del 2026. En el cuadro 1 se presenta el resumen del esfuerzo de muestreo realizado en cada localidad, detallado mediante el número de archivos acústicos de 25 minutos registrados durante el periodo comprendido entre mayo del 2025 y mayo del 2026.

**Cuadro 1. Resumen del esfuerzo de muestreo realizado en cada localidad a lo largo del Pacífico de Panamá, detallado mediante el número de archivos acústicos registrados para cada periodo de muestreo entre mayo del 2025 y mayo del 2026.**

| Localidad | Profundidad (m) | Muestreo 1 (mayo a noviembre) | Muestreo 2 (diciembre a mayo) | Total de archivos |
|---|---|---|---|---|
| Contadora | 20 | 4292 | 3496 | 7788 |
| Boná | 20 | 4258 | 3867 | 8125 |
| Iguana | 16 | 4417 | 3338 | 7755 |
| Cébaco | 25 | 4306 | 3936 | 8242 |
| Contreras | 18 | 4350 | 3941 | 8291 |
| Paridas | 10 | 4277 | 3960 | 8237 |
| Ladrones | 19 | 4360 | 3919 | 8279 |
| **Total** | **---** | **30,260** | **26,457** | **56,717** |

## 3.3 Composición del paisaje sonoro

Se tomó una submuestra del 17 % del total de las grabaciones, representando un total de 9,642 archivos acústicos que equivalen a más de 4,000 horas de audio utilizados para: a) caracterizar la composición del paisaje sonoro en cada localidad, y b) determinar patrones de variación temporal y espacial en la composición del paisaje sonoro y en los niveles de ruido submarino. Como complemento, el resto de las grabaciones se analizarán posteriormente con detectores para ballenas jorobadas, peces, y embarcaciones que están siendo diseñados, por el Laboratorio Ondas, dirigido por la Dra. Laura May-Collado. Ver detalles de estos análisis en la sección 5.1.

Cada archivo de la submuestra se abrió en el software RAVEN PRO 1.6.5 (K. Lisa Yang Center for Conservation Bioacoustics at the Cornell Lab of Ornithology, 2026a) y se generó un espectrograma utilizando una transformación de Fourier (FFT) de 2048 puntos, con un 50 % de traslape y una ventana Hann de 1.024 muestras. Estas especificaciones son estándares en el estudio de las señales acústicas de cetáceos (ej.: May-Collado y Wartzok, 2008; Perez-Ortega et al., 2021). Cada archivo de audio fue anotado manualmente en una hoja Excel asignando un valor de 1 a las grabaciones que contenían cantos de ballena jorobada y un valor de 0 cuando los cantos estaban ausentes. El mismo criterio de presencia-ausencia se aplicó para las detecciones de embarcaciones y coros de peces. Adicionalmente, para visualizar la presencia de cada contribuyente al paisaje sonoro, se calcularon promedios espectrales de largo plazo (LTSAs “Long-Term Spectral Averages”, por sus siglas en inglés) por mes para cada localidad. Los LTSAs se calcularon utilizando una ventana Hanning, una resolución de frecuencia de 1 Hz y una resolución temporal de 60 s usando el software Raven Expedition 1.4.3 (K. Lisa Yang Center for Conservation Bioacoustics at the Cornell Lab of Ornithology, 2026b). Todos los archivos se corrigieron con base en los valores de calibración de cada grabadora.

Esta matriz de datos se utilizó para calcular la proporción de grabaciones que contenían cada categoría de sonido por localidad, temporada del año (lluviosa vs seca), y periodo del día (días vs noche). Con estos datos realizamos una prueba de independencia chi-cuadrado de Pearson para determinar si hay diferencias en la composición de sonido entre localidades por hora del día (día vs noche), y temporada (lluviosa vs seca). La magnitud del efecto (según la localidad) se cuantificó mediante el estadístico V de Cramér. Este estadístico adapta la prueba de chi-cuadrado a una escala normalizada de 0 a 1, en la cual los valores de aproximadamente 0.1, 0.3 y 0.5 se interpretan convencionalmente como efectos pequeños, medianos y grandes, respectivamente. Los períodos de tiempo se definieron como diurnos (06:00–17:59, hora local) y nocturnos (18:00–05:59, hora local) y temporada lluviosa (mayo a diciembre) y seca (enero a abril).

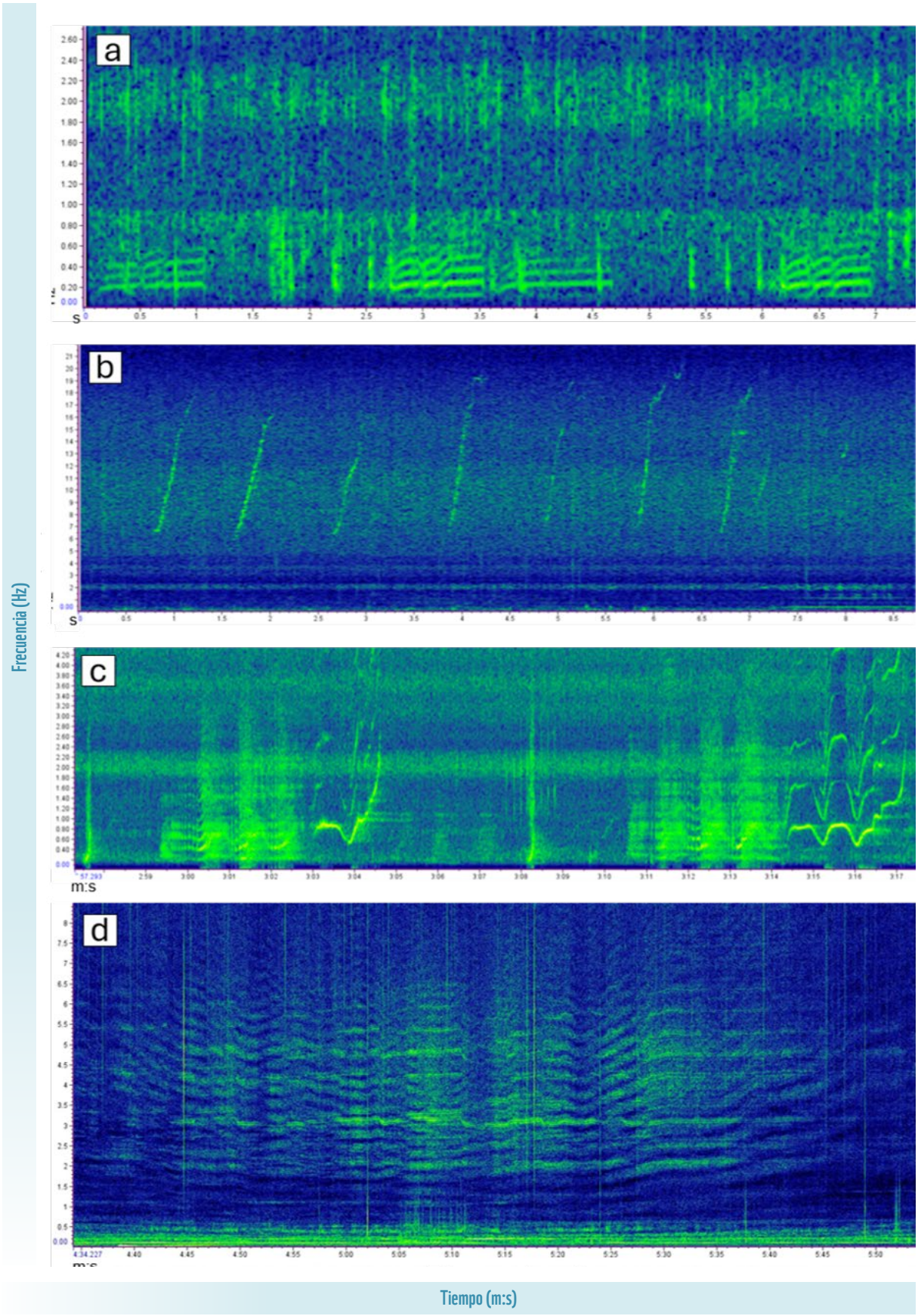



**Figura 4. Espectrogramas representando ejemplos de las categorías de sonidos monitoreadas en cada localidad: a) llamadas reproductivas de una especie no identificada de pez sapo, b) silbidos de delfín manchado pantropical *(Stenella attenuata),* c) segmento del canto de una ballena jorobada, d) ruido producido por una embarcación.**



Fotografía: Carlos Estrada

## 3.4 Niveles de ruido bajo el agua

Siguiendo las normas del American National Standards Institute (ANSI 1.11-2004), se calcularon los niveles de banda de octava (centrados en 63, 125, 250, 500, 1000 y 2000 Hz) para cada archivo de audio de 25 minutos, mediante un script personalizado de MATLAB (R2025b) desarrollado para uso del laboratorio Ondas (Coero-Borga et al., en revisión). Una octava de banda es uno de los 10 intervalos en que se divide el espectro audible (20 Hz a 20 KHz), definido por su frecuencia central. Estos niveles de banda de octava se utilizaron posteriormente en los análisis estadísticos para evaluar la correlación entre los cantos de las ballenas jorobadas, coros de peces, y ruido de embarcaciones por día y temporada del año. Nótese que, en el informe anterior, los niveles de ruido fueron calculados utilizando la Densidad Espectral de Potencia (Power Spectral Density, PSD), una metodología más adecuada para análisis acústicos relacionados con maquinaria, proyectos de ingeniería y estudios de resonancia o vibración estructural, ya que proporciona un mayor nivel de detalle espectral. En contraste, los análisis presentados en este informe emplean bandas de octava, las cuales son más apropiadas para estudios ambientales porque permiten simplificar la información acústica de acuerdo con estándares reconocidos, como los establecidos por ANSI. Además, los resultados obtenidos mediante este método pueden compararse directamente con los umbrales de audición humana (20 Hz a 20 KHz) y con las curvas de Criterio de Ruido (Noise Criterion, NC), facilitando así la evaluación del impacto sonoro y el cumplimiento de criterios acústicos establecidos.

## 3.5 Patrones espaciales y temporales

Para cada categoría de sonido se ajustó un modelo lineal generalizado binomial (GLM binomial, regresión logística), utilizando como variable de respuesta la presencia/ausencia por hora y como predictores categóricos la localidad, el período del día (día/noche) y la temporada del año (Lluviosa: junio–diciembre, Seca: enero–abril). Para evaluar si el efecto del período del día o el efecto de la temporada del año variaban según la localidad, se emplearon pruebas de razón de verosimilitud (Likelihood Ratio, LR) para comparar un modelo con solo efectos principales frente a modelos que incluían adicionalmente el término de interacción: Localidad × Período del día y el término de interacción Localidad × Temporada del año. Una prueba LR significativa indica que el efecto diario o estacional no es uniforme entre las distintas localidades. Para identificar qué localidades específicas eran responsables de una interacción significativa, se realizaron posteriormente pruebas de chi-cuadrado por localidad, comparando la presencia entre día vs. noche y entre temporada lluviosa vs. seca dentro de cada localidad. Los valores de *p* obtenidos se ajustaron mediante la corrección de Bonferroni para considerar las comparaciones múltiples realizadas entre las siete localidades.

## 3.6 Impacto de botes en la ocurrencia de cantos de ballenas

Para explorar si existe un posible impacto de la presencia de botes en la ocurrencia temporal de cantos de ballenas jorobadas nos enfocamos en los meses de julio a septiembre que es cuando las ballenas del sur han llegado en su mayoría a Panamá. Es importante resaltar que estos son análisis exploratorios ya que los análisis de correlación no son suficientes para determinar impacto. Para esto se necesitan un diseño controlado con controles y experimentos. Hay otros factores que podría estar influenciando cuando una ballena decide cantar como es la presencia de otras ballenas, ciclos lunares, etc. Con esta aclaración en mente realizamos una prueba de chi-cuadrado de independencia agrupada entre la presencia de embarcaciones y la presencia de ballenas jorobadas, ignorando la localidad. Luego realizamos una regresión logística ajustada por localidad, ballena jorobada ~ Embarcación + Localidad, para controlar por posibles diferencias entre los sitios. Luego realizamos comparaciones por localidad del porcentaje de horas con presencia de canto de ballena durante períodos con presencia de embarcaciones frente a períodos sin presencia de embarcaciones. Finalmente, realizamos correlaciones de Pearson y Spearman entre la presencia promedio de ballenas por localidad y la presencia promedio de embarcaciones por localidad (n = 7 localidades), con el fin de evaluar si las localidades con mayor actividad de ballenas son también las más expuestas al tráfico de embarcaciones.

# 4. Resultados

El cuadro 1 resume el número de archivos acústicos grabados en cada localidad de monitoreo. Las diferencias en el número de archivos corresponden a las diferencias en las fechas en las cuales fueron instaladas y extraídas las grabadoras. **Se obtuvo un total de 23,632 horas de grabación, lo que equivale a un total de 1,417,925 minutos.**

## 4.1 Composición del paisaje sonoro

Todas las categorías de sonido (ballenas jorobadas, peces, camarones pistola y embarcaciones) fueron detectadas en todas las localidades. Sin embargo, hubo diferencias espaciales y temporales en cuanto a su contribución al paisaje sonoro de cada localidad (ver secciones 4.2 al 4.5).

## 4.2 Patrones espaciales del paisaje sonoros

A través de un análisis de mapa de calor, la figura 5 muestra, visualmente, como el paisaje sonoro varía entre localidades. Cuando se combinan los sonidos, la localidad con menor actividad acústica fue Contreras, con un total del 18.9% de las grabaciones con actividad acústica y el de mayor actividad fue Ladrones con un 72% de las grabaciones con actividad acústica.

La presencia de coros de peces fue la categoría de sonido que varió más significativamente entre localidades ($\chi^2$ = 2321,4; gl = 6; p < 0,001; V de Cramér = 0,49). Las diferencias entre localidades vario del 1.4 % en Contreras y del 59.8 % en Ladrones. En general, las localidades con mayor concentración de grabaciones con coros de peces fueron: Boná, Iguana, Ladrones y Paridas.

La presencia de embarcaciones también vario significativamente entre localidades ($\chi^2$ = 1388.0; gl = 6; p < 0,001; V = 0.38). En Contadora la presencia de ruido de embarcaciones fue considerablemente la más alta (42.6 % de las horas registradas) en comparación con las demás localidades (0.8–16.1 %). Iguana, fue la segunda localidad con mayor presencia de ruido de embarcaciones.

La presencia de cantos de machos de ballenas jorobadas también vario significativamente entre localidades ($\chi^2$ = 657.2; gl = 6; p < 0,001; V = 0.26), aunque con una menor magnitud. La presencia de cantos de ballenas vario entre el 4.5 % en Paridas y 36.3 % en Ladrones. En general las localidades con mayor presencia acústica de cantos de ballenas fueron Contadora, Iguana y Ladrones.

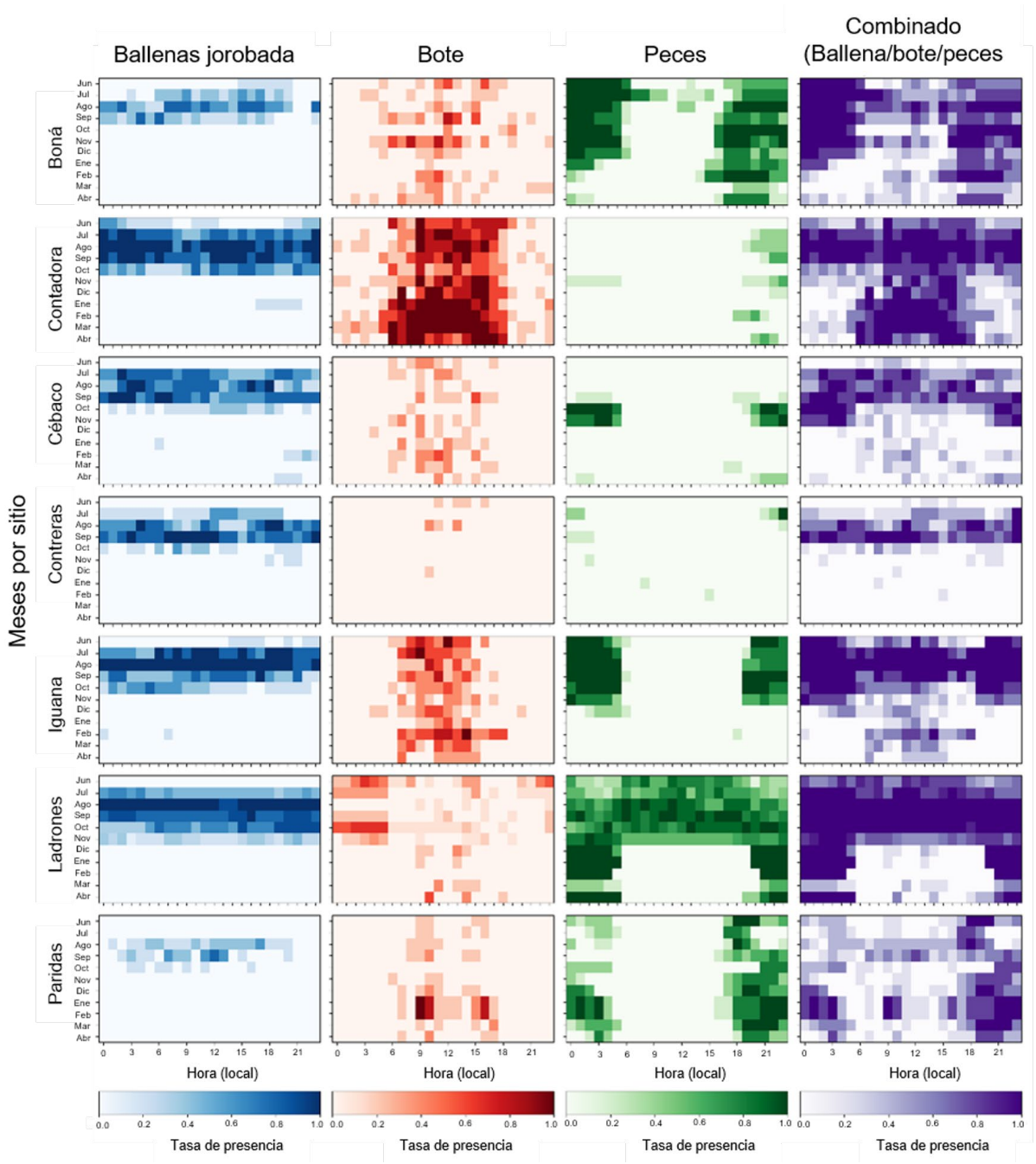



**Figura 5 . Mapas de calor (*Headmap* en inglés) que muestra los patrones temporales y espaciales de la actividad acústica de las distintas categorías de sonido según localidad, mes y hora del día, entre mayo del 2025 y mayo del 2026 en la costa del Pacífico de Panamá. Las categorías incluyen ballenas jorobadas (azul), embarcaciones (rojo), coros de peces (verde) y la combinación de todas las categorías (morado). Las áreas con mayor intensidad de color indican una mayor frecuencia de detección acústica.**

## 4.3 Patrones mensuales de la composición del paisaje sonoro

El paisaje sonoro varió significativamente entre la temporada lluviosa y la temporada seca (Figura 6). En términos generales, la actividad del paisaje sonoro presenta una mayor riqueza acústica durante la epoca lluviosa (59.2%) comparado con la época seca (28.1%) ($\chi^2 = 850.7$, $p < 0.001$, $V = 0.29$). Este patrón resulta de la estacionalidad migratoria de las ballenas jorobadas del sur y de los

coros de peces como se describe abajo. La presencia de cantos de machos de ballenas jorobadas fue significativamente más alta durante la epoca lluviosa (32.7%) en comparación con la época seca (0.5%) ($\chi^2 = 1334.8$, $p < 0.001$, $V = 0.37$). Estas diferencias corresponden a que las aguas del Pacífico de Panamá representan un área reproductiva importante para las ballenas de la poblacion del sur, también conocidas como el segmento poblacional distinto N°13 (Figura 7). Se estima que esta población de ballenas se está recuperando rápidamente tras el cese de la caza comercial, aunque las tasas de recuperación varían entre regiones (Seyboth et al., 2023). Esta cacería comercial, según los registros marítimos del siglo XIX, muestran una intensa presencia de embarcaciones balleneras en el Golfo de Panamá y Pacífico Oriental Tropical (https://whalinghistory.org/whaling-history-website-live/) así como en sus áreas de alimentación en la Antárctica (Felix & Haase 2005). Por el contrario, el segmento poblacional distinto N°6, correspondiente a las ballenas de centroamérica (Figura 7), cuya temporada reproductiva es durante los meses de la época seca, no parecen usar regularmente las aguas del Pacífico de Panamá. Panamá es uno de los países que participan en el plan de manejo para esta poblacion y por lo tanto determinar dónde y cuándo estan presentes es importante (IWC, 2024, CC/69).

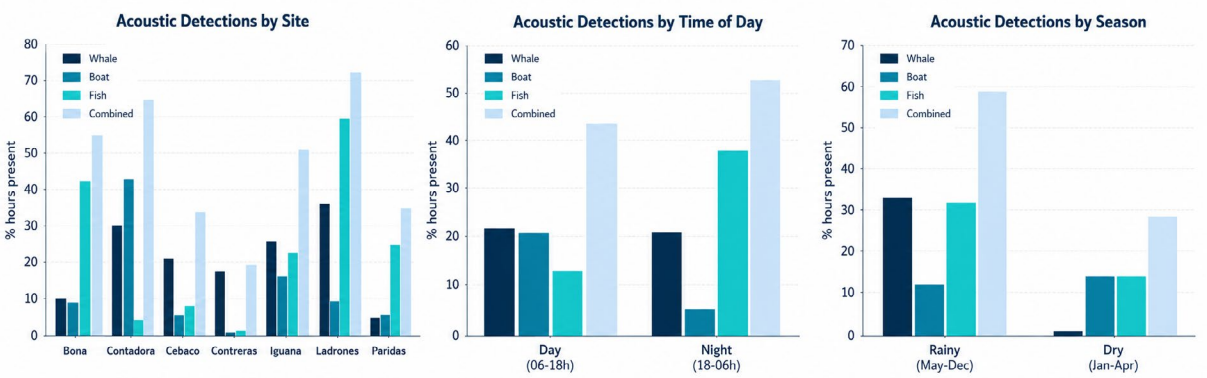



**Figura 6. Composición del paisaje sonoro por localidad, hora del día, y época del año en la costa del Pacífico de Panamá, entre mayo del 2025 y mayo del 2026.**

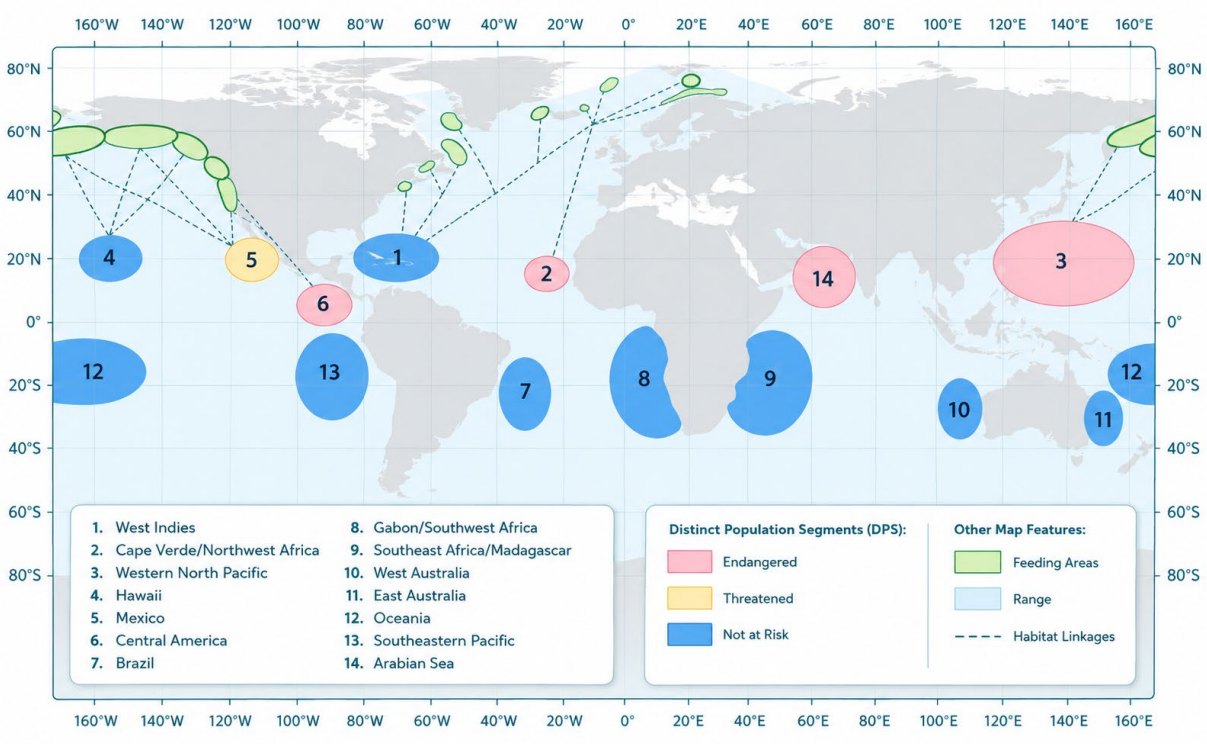



**Figura 7. Mapa que muestra la ubicación de los 14 segmentos poblacionales distintos *(DPS)* de ballenas jorobadas en todo el mundo.**

Los coros de peces también mostraron variación estacional ($\chi^2 = 353.3$, $p < 0.001$, $V = 0.19$), con una mayor actividad acústica durante la época lluviosa (31.7%) que durante la época seca (14.1%). Existe considerable evidencia de que los coros de peces están asociados con la actividad reproductiva de estos, y que suelen seguir ciclos estacionales, diarios (dieles), mareales y lunares (ej.: Rowell et al., 2017; Erisman y Rowell, 2017). Desafortunadamente, no existe información sobre los patrones temporales de los coros de peces en el Pacífico Este Tropical o estudios para Panamá. Este es el primer estudio que caracteriza la existencia de coros de peces en detalle, los cuales parecen ser producidos por varias especies de peces particularmente de la familia Batrachoididae. Esta familia consiste de peces con cuerpo robusto, una cabeza ancha y aplanada, ojos ubicados en la parte superior de la cabeza y una boca grande provista de fuertes mandíbulas. La mayoría de las especies son peces bentónicos que se alimentan de otros peces. Una característica interesante de la familia es el uso especializado de la vejiga natatoria como órgano de producción de sonidos (Rice y Bass, 2009). Durante la época reproductiva, los machos contraen rápidamente músculos sónicos asociados a la vejiga natatoria, generando llamados de baja frecuencia, comúnmente descritos como zumbidos, gruñidos, y "silbidos" (Han et al., 2023). Estas vocalizaciones desempeñan un papel importante en el cortejo, ya que permiten atraer a las hembras hacia los sitios de anidación y, al mismo tiempo, sirven para defender territorios frente a otros machos. Este estudio demuestra un incremento en la actividad reproductiva de al menos algunas especies dentro de esta familia durante la época lluviosa, aunque como se demuestra en la seccion 4.5 estos patrones temporales varía entre localidades.

Interesantemente, la presencia de embarcaciones se mantuvo prácticamente constante entre temporadas (12.1% frente a 13.8%; $\chi^2 = 5.3$, $p = 0.021$, $V = 0.02$). Sin embargo, como se muestra en la seccion 4.5 esto varia por localidad.

## 4.4 Patrones diarios de la composición del paisaje sonoro

En general, el paisaje sonoro también varió significativamente entre el día y la noche (Figura 6). Hubo más actividad acústica durante las horas de la noche (52.8%) que en horas del día (44.6%) ($\chi^2 = 65.7$, $p < 0.001$). Este patrón parece ser influenciado por los coros de peces, cuya actividad acústica incrementa durante la noche (38.6%) que durante el día (12.8%) ($\chi^2 = 855.1$, $p < 0.001$, $V = 0.30$) (Figura 6). Los coros de peces suelen presentar patrones diarios bien definidos, con mayor actividad durante el crepúsculo y las horas nocturnas (ej..: Hawkins et al., 2025).

La presencia acústica de embarcaciones fue mayor durante el día (20.8%) que durante la noche (4.6%) ($\chi^2 = 582.3$, $p < 0.001$, $V = 0.24$) (Figura 6). Este patrón probablemente refleja una mayor actividad de embarcaciones en horas diurnas, asociada principalmente a actividades turísticas o pesca artesanal localizada (May-Collado et al., 2023). Finalmente, la presencia de cantos de ballenas no mostró diferencias significativas entre el día y la noche ($p = 0.182$). Sin embargo, este patrón puede variar con las actividades humanas que ocurren en cada localidad, como se demuestra en la sección 4.5.

**Cuadro 2. Resumen de la presencia de cada categoría de sonido por época lluviosa y seca y hora del día en el Pacífico de Panamá entre mayo del 2025 a mayo del 2026.**

| Categoría | Día (%) | Noche (%) | Época Lluviosa (%; May–Dic) | Época Seca (%; Ene–Abr) |
|---|---|---|---|---|
| Ballenas jorobadas | 22.4 | 21.2 | **32.7** | 0.5 |
| Ruido de embarcaciones | **20.8** | 4.6 | 12.1 | 13.8 |
| Coros de peces | 12.8 | **38.6** | **31.7** | 14.1 |
| Combinado | 44.6 | 52.8 | 59.2 | 28.1 |

## 4.5 Combinación del efecto espacial y temporal en la composición del paisaje sonoro

En esta sección exploramos la interacción entre tres variables localidad, época lluviosa vs seca, y periodo del día (noche vs día), usando un análisis de Modelo Lineal Generalizado (GLM por sus siglas en inglés). Para cada categoría de sonido se ajustaron modelos de regresión logística binomial con los siguientes términos: presencia acústica ~ Localidad + época + hora, incluyendo términos de interacción). Luego se utilizaron pruebas de razón de verosimilitud (*likelihood-ratio tests*) para evaluar si los efectos día/noche y época lluviosa/seca variaban entre localidades. Este análisis permitió determinar si dichos efectos correspondían a patrones específicos de cada localidad de muestreo, en lugar de representar un efecto uniforme aplicado de manera consistente en todas las localidades.

Los resultados demuestran que todas las interacciones son significativas, lo que indica que tanto el efecto día/noche como el efecto temporada lluviosa/seca difieren significativamente entre localidades para las tres categorías de sonido (Figura 8). Por ejemplo, el análisis confirma que existen localidades donde el tráfico de embarcaciones es desproporcionadamente más alto durante el día en comparación con la noche, mientras que en otras localidades esta diferencia es menos pronunciada. De manera similar, la presencia de cantos de machos de ballenas jorobadas durante el período nocturno varía significativamente entre localidades, con algunas localidades mostrando incrementos o reducciones más marcadas que otras.

**Cuadro 3. Resultados del análisis de GLM evaluando la interacción entre localidad, día/noche y época lluviosa/seca en el Pacífico de Panamá entre los meses de mayo del 2025 al 2026.**

| Categoría | Localidad × Hora | Sito × Época |
|---|---|---|
| Ballenas jorobadas | LR = 30.6, df=6, **p < 0.001** | LR = 26.4, df=6, **p < 0.001** |
| Ruido de embarcaciones | LR = 460.0, df=6, **p < 0.001** | LR = 126.3, df=6, **p < 0.001** |
| Coros de peces | LR = 410.1, df=6, **p < 0.001** | LR = 377.8, df=6, **p < 0.001** |

Tras aplicar la corrección de Bonferroni para las comparaciones múltiples, encontramos los siguientes patrones. La ocurrencia de embarcaciones en Contadora fue significativamente más alta durante el día (74.5%) seguido de Iguana, Cébaco, Paridas, Boná, y Contreras (Figura 8). Este patrón, en especial para Contadora está muy probablemente asociado a actividades de turismo marino. Adicionalmente, Contadora es la única localidad con una mayor ocurrencia de embarcaciones durante la época seca (52.9%) comparado con la época lluviosa (36.7%), lo que sugiere una diversidad de actividades turísticas asociadas con pesca deportiva, buceo, y observación comercial de ballenas. En Isla Iguana es posible que parte del tráfico de botes está también asociado a actividades turísticas. En las otras localidades es posible que esté asociado a pesca artesanal local. En contraste, en Ladrones, la presencia de botes fue mayor en la noche. Esta es la localidad más alejada a la costa, y es posiblemente utilizado con mayor frecuencia por pescadores (comercial y deportiva).

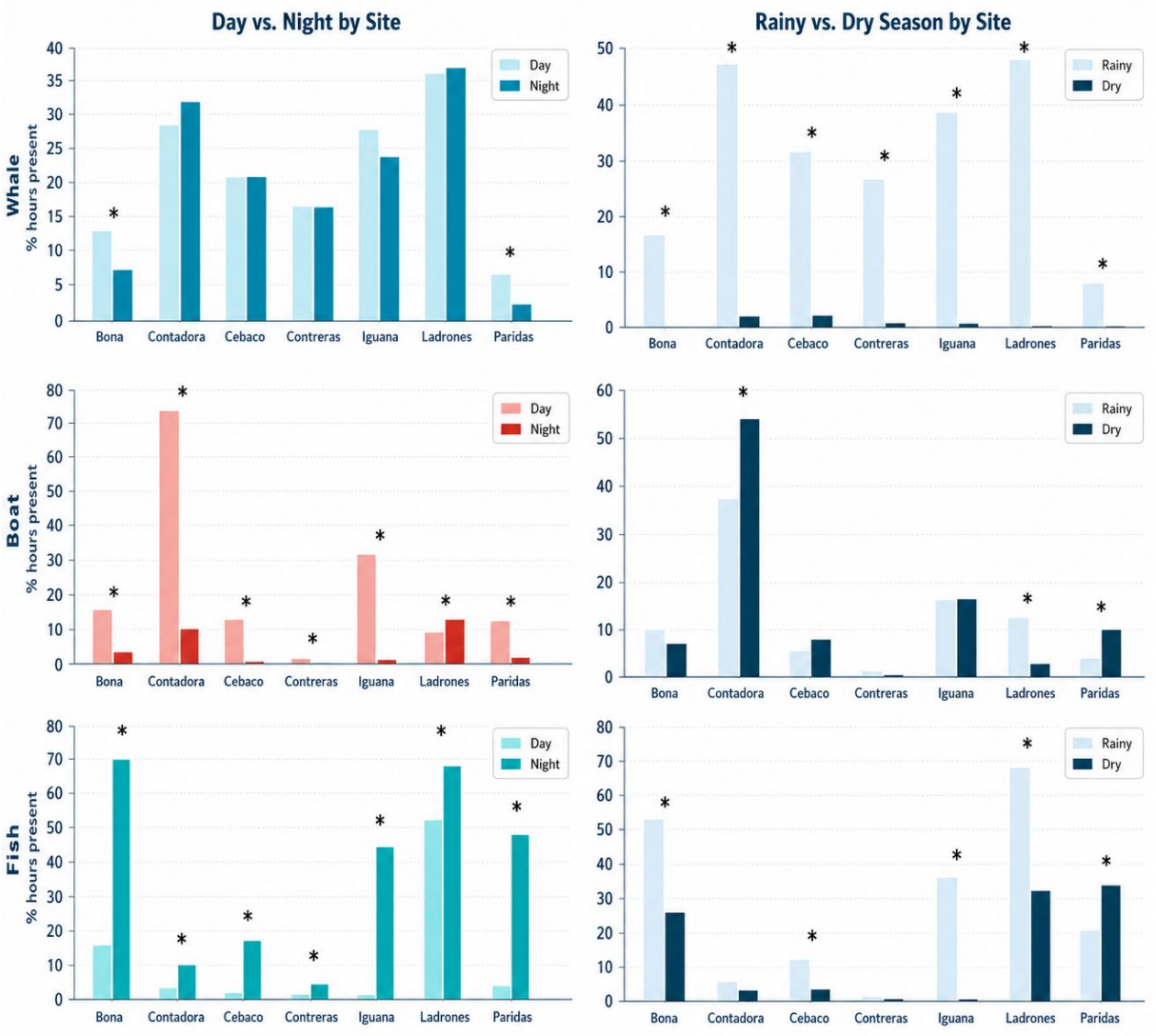



**Figura 8. Composición del paisaje sonoro según la interacción entre la localidad, hora del día y la época del año en la costa del Pacífico de Panamá, entre mayo del 2025 y mayo del 2026 (Rainy=lluviosa, Dry=Seca, Fish= coros de peces, Boat=embarcación, Whale=Ballenas jorobadas, *= indican las diferencias significativas a un p-value<0.0001).**

En cuanto a la presencia de cantos de ballenas jorobadas, los cantos de las ballenas del sur, durante la época lluviosa fueron importante en todas las localidades, pero en particular en Ladrones (48.2%) y Contadora (45.9%). En estas dos localidades no hubo una diferencia en la presencia de cantos con la hora del día. Solamente en Boná y Paridas hubo una mayor presencia de cantos en la noche, lo que sugiere que estos sitos son áreas de tránsito y no un lugar donde los machos mantienen agregaciones importantes, como parece ser en Contadora y Ladrones (Figura 8).

Finalmente, la presencia de coros de peces fue en la noche en todas las localidades, pero la magnitud varía (Figura 8). En Boná la magnitud fue de un 70%, seguido por Iguana (48%) y Paridas (48%). Lo que sugiere que estas localidades tienen comunidades de peces diversas y abundantes que contribuyen considerablemente al paisaje sonoro de estas localidades. En la mayoría de las localidades la presencia de coros de peces fue durante la época lluviosa, excepto en Paridas donde hubo más coros de peces durante la época seca (33.8%) que en la época lluviosa (20.5%) (Figura 8).

En resumen, *la variabilidad acústica dentro de cada localidad explica las diferencias en la composición del paisaje sonoro entre localidades ya que esta determina qué patrón espacial se manifiesta a varias escalas temporales*. En otras palabras, los efectos asociados al período del día (día/noche) y a la época del año (lluviosa/seca) no son uniformes entre localidades, sino que dependen del contexto específico de cada localidad. Esto se demuestra visualmente en la sección 4.6 con los promedios espectrales de largo plazo (LTSAs por sus siglas en inglés). Es precisamente esta variación entre

## 4.6 Promedios espectrales de largo plazo

La variación descrita en las secciones anteriores sobre la presencia de coros de peces y cantos de ballenas puede observarse en los promedios espectrales de cada localidad, presentados a continuación. Es importante destacar que la presencia de embarcaciones no se aprecia claramente en estos análisis debidos su naturaleza relativamente intermitente. Aunque los motores generan ruido en frecuencia de banda ancha, es decir cubren todo o casi todo el espectro de la grabación (de 0.1 Hz hasta 32 kHz) su corta duración no permite ser captado en el promedio del espectrograma. Este análisis es más adecuado para visualizar sonidos de carácter continuo o persistente dentro de un rango de frecuencias limitado, como los cantos de las ballenas, los coros de peces, la actividad de los camarones pistola y cualquier otra fuente acústica que permanezca presente durante períodos prolongados de tiempo.

En términos generales, Boná, Cébaco, Contreras, Isla Iguana, Ladrones y Paridas presentan una marcada estacionalidad en sus paisajes sonoros, con patrones comunes y diferencias que reflejan la diversidad de hábitats y comunidades biológicas presentes en el Pacífico de Panamá. En la mayoría de las localidades, los chasquidos de los camarones pistola incrementaron durante la época seca (diciembre-abril), mientras que los cantos de las ballenas jorobadas estuvieron presentes principalmente entre julio y octubre, coincidiendo con su temporada migratoria reproductiva en la época lluviosa de Panamá.



Fotografía: Agustín Concalvez



Fotografía: Fundación Panacetacea Panamá

### 4.6.1. Boná

En la figura 9 se muestra el promedio espectral por mes de los sonidos más comunes en Boná. Esta es una de las localidades con mayor intensidad de coros de peces. Nótese que la magnitud de la presencia de estos coros decrece en los meses de la época seca. La banda a frecuencias altas, marcada con una flecha roja en la figura 9, es el resultado de los chasquidos producidos por camarones pistola, los cuales están presentes en todos los hábitats de los ecosistemas marinos tropicales. Nótese que estos sonidos de camarones pistola parecen incrementar en 'intensidad' entre diciembre, enero y abril.

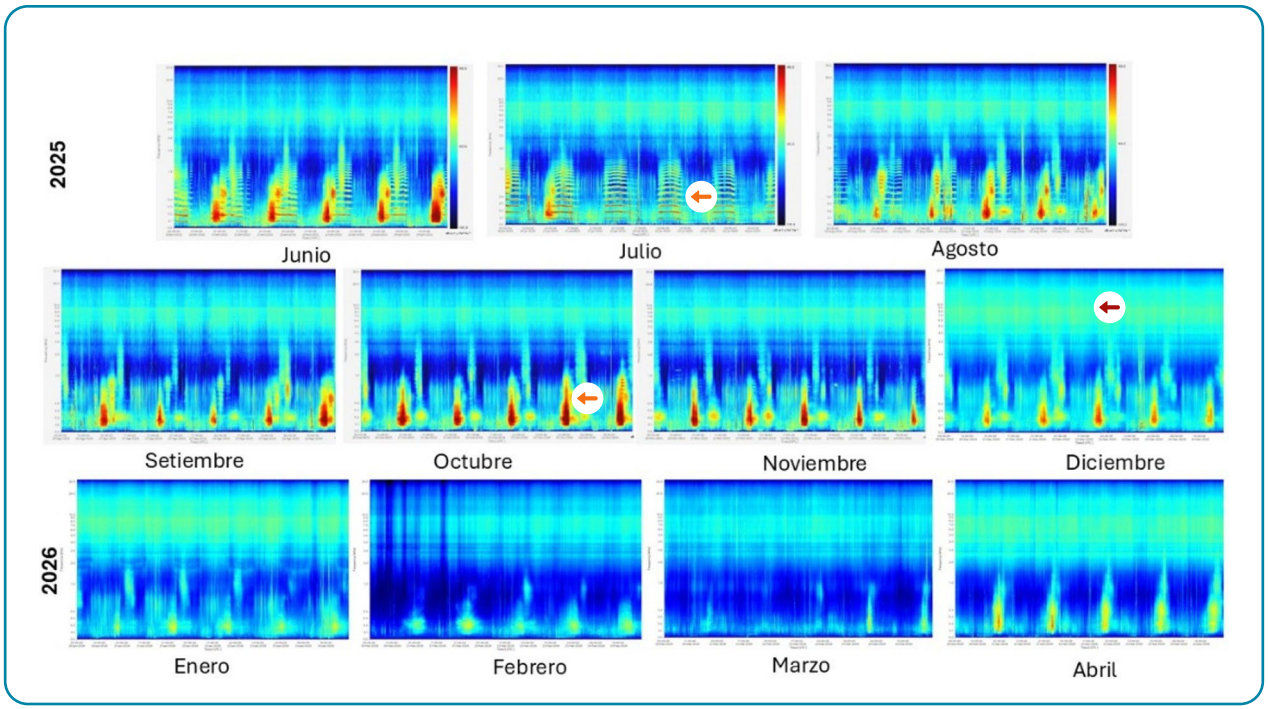



**Figura 9. Promedios espectrales mensual de Boná entre junio del 2025 y abril del 2026. El eje de las x corresponde a la hora del día y el eje de las y corresponde a la frecuencia (KHz). La banda a frecuencias altas (marcada con la flecha roja) refleja la presencia de camarones pistola. Las bandas horizontales y las áreas verticales rojas representan coros de peces de especies aun no identificadas (marcada con las flechas anaranjadas). No es posible ver los cantos de ballenas debido al enmascaramiento por parte de los camarones y peces.**



Fotografía: Fundación Panacetacea Panamá

## 4.6.2. Cébaco

La figura 10 muestra el paisaje sonoro de Cébaco, con patrones similares a los descritos para Boná, pero con menor intensidad de peces y camarones lo que permite observar la presencia de cantos de ballenas en julio, agosto, septiembre y octubre.

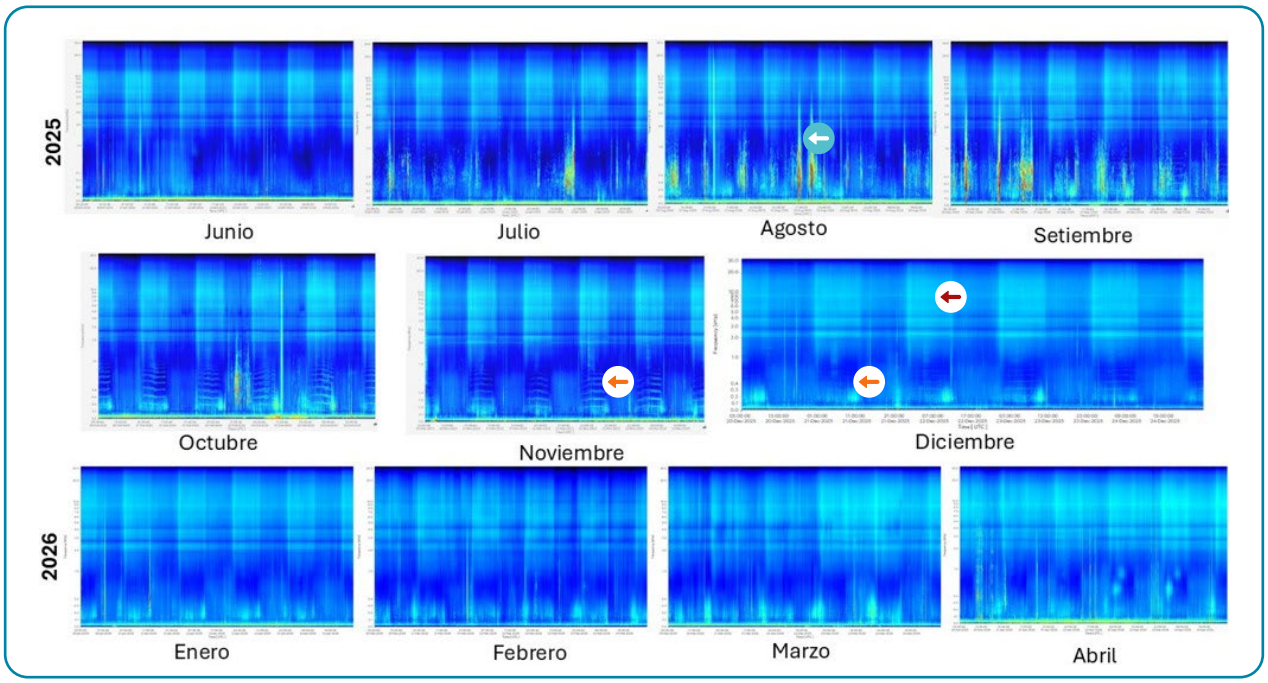



**Figura 10. Promedios espectrales mensual de Cébaco entre junio del 2025 y abril del 2026. La banda azul clara a frecuencias altas también refleja la presencia de camarones *pistola* (flecha roja), pero menos intensa que en Boná. Las bandas horizontales representan coros de peces de especies aun no identificadas (flechas anaranjadas), y las líneas verticales de color amarillos y rojos indican la presencia de cantos de ballenas (flecha blanca).**



Fotografía: Fundación Panacetacea Panamá

### 4.6.3. Contreras

La figura 11 muestra el paisaje sonoro de contreras el cual es dominado por camarones pistola la gran parte del año; con un incremento en intensidad de diciembre a abril. Se nota la presencia de ballenas en las bandas de frecuencia media-baja entre los meses de julio a septiembre. La presencia de peces es considerablemente baja en este lugar comparado con otras localidades.

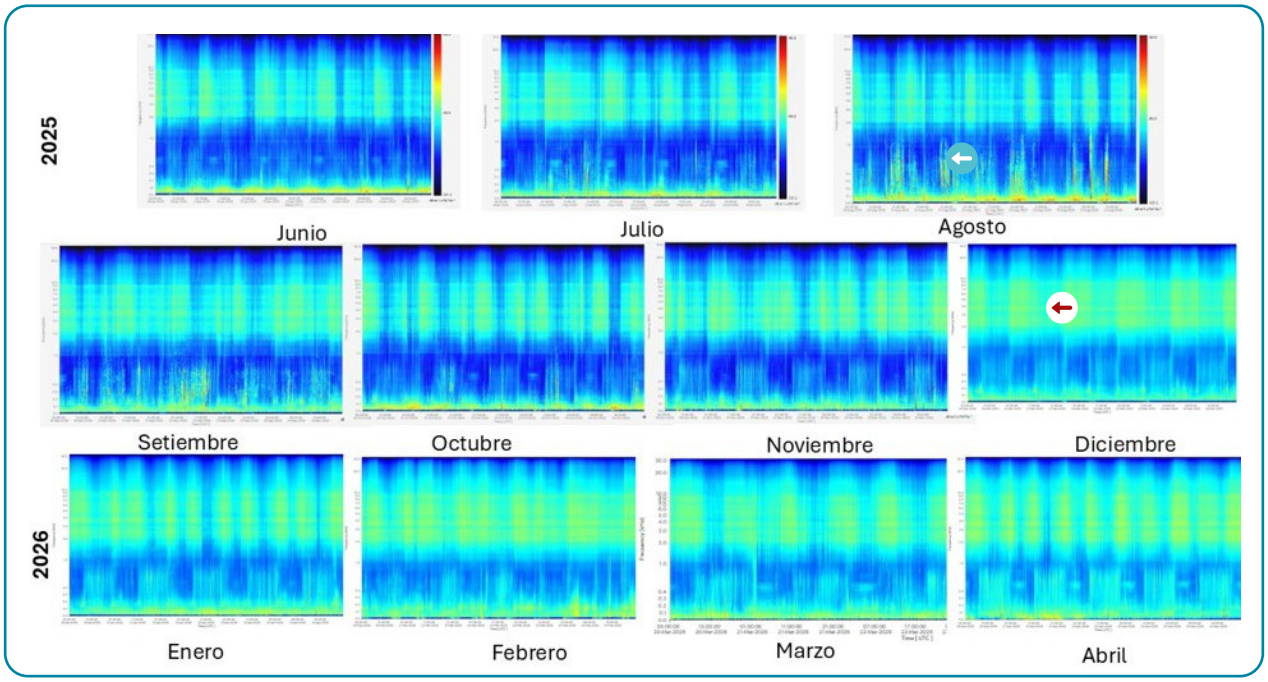
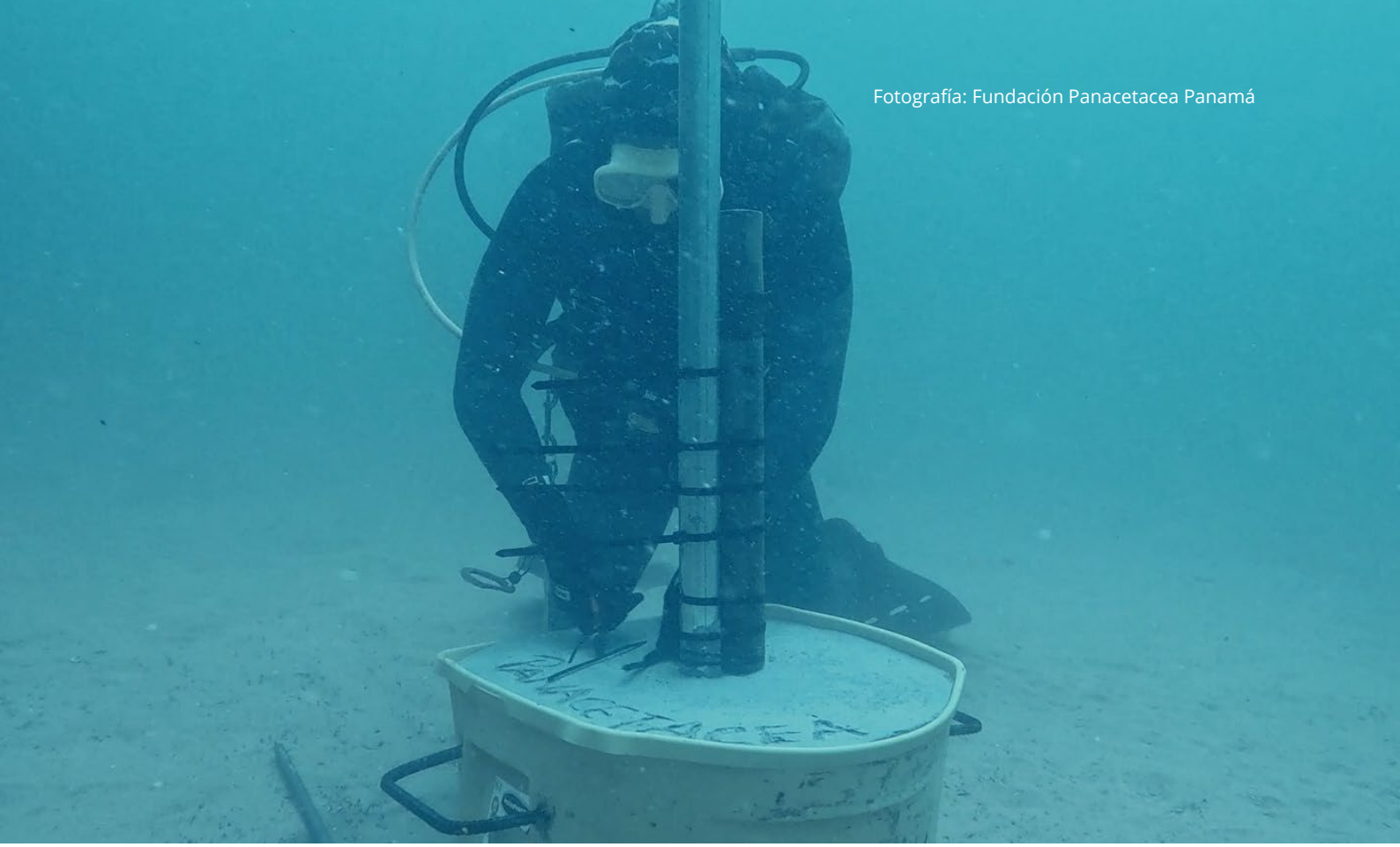



**Figura 11. Promedios espectrales mensual de Contreras entre junio del 2025 y abril del 2026. Nótese la gran presencia de chasquidos de camarones *pistola* (flecha roja) en comparación con otras localidades. La presencia de coros de peces es considerablemente baja. Las líneas verticales de color amarillos y rojos (flecha blanca) indican la presencia de cantos de ballenas presentes durante la época lluviosa.**



Fotografía: Fundación Panacetacea Panamá

### 4.6.4. Contadora

La figura 12 muestra que Contadora tiene un paisaje acústico dominado por el canto de ballenas jorobadas durante la época lluviosa, cuando estas están presentes. Los coros de peces y presencia de camarones pistola es considerablemente baja en comparación con otras localidades.

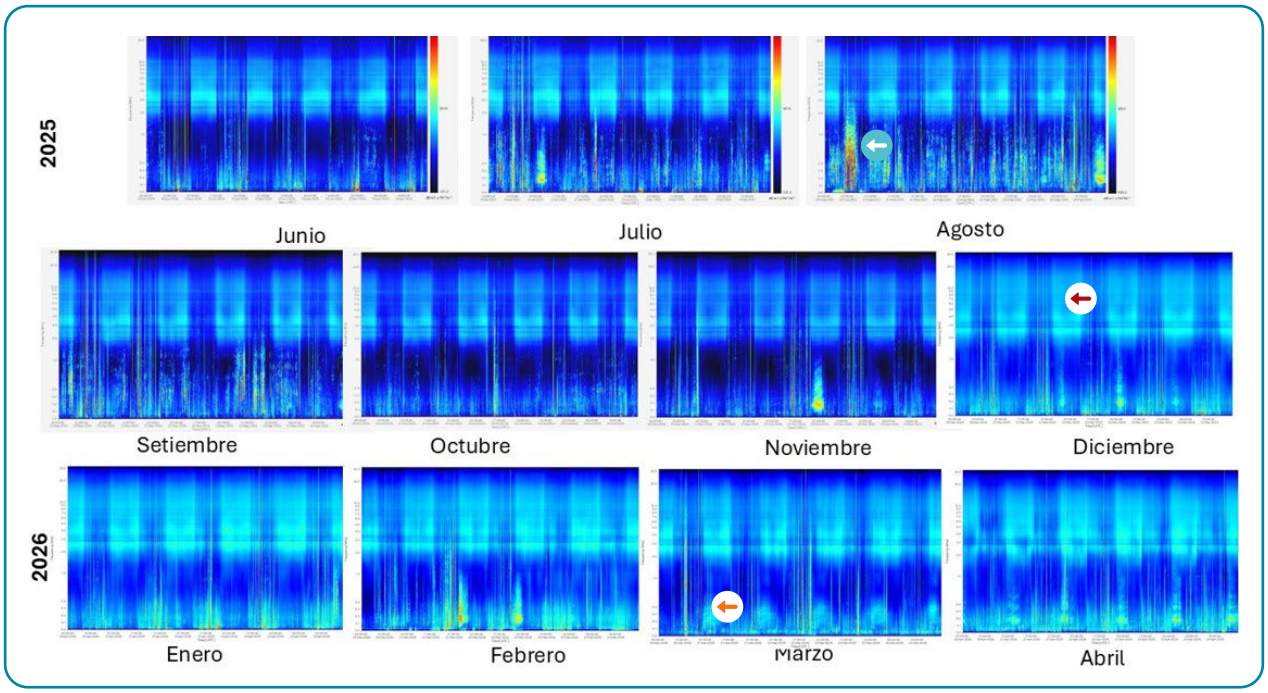
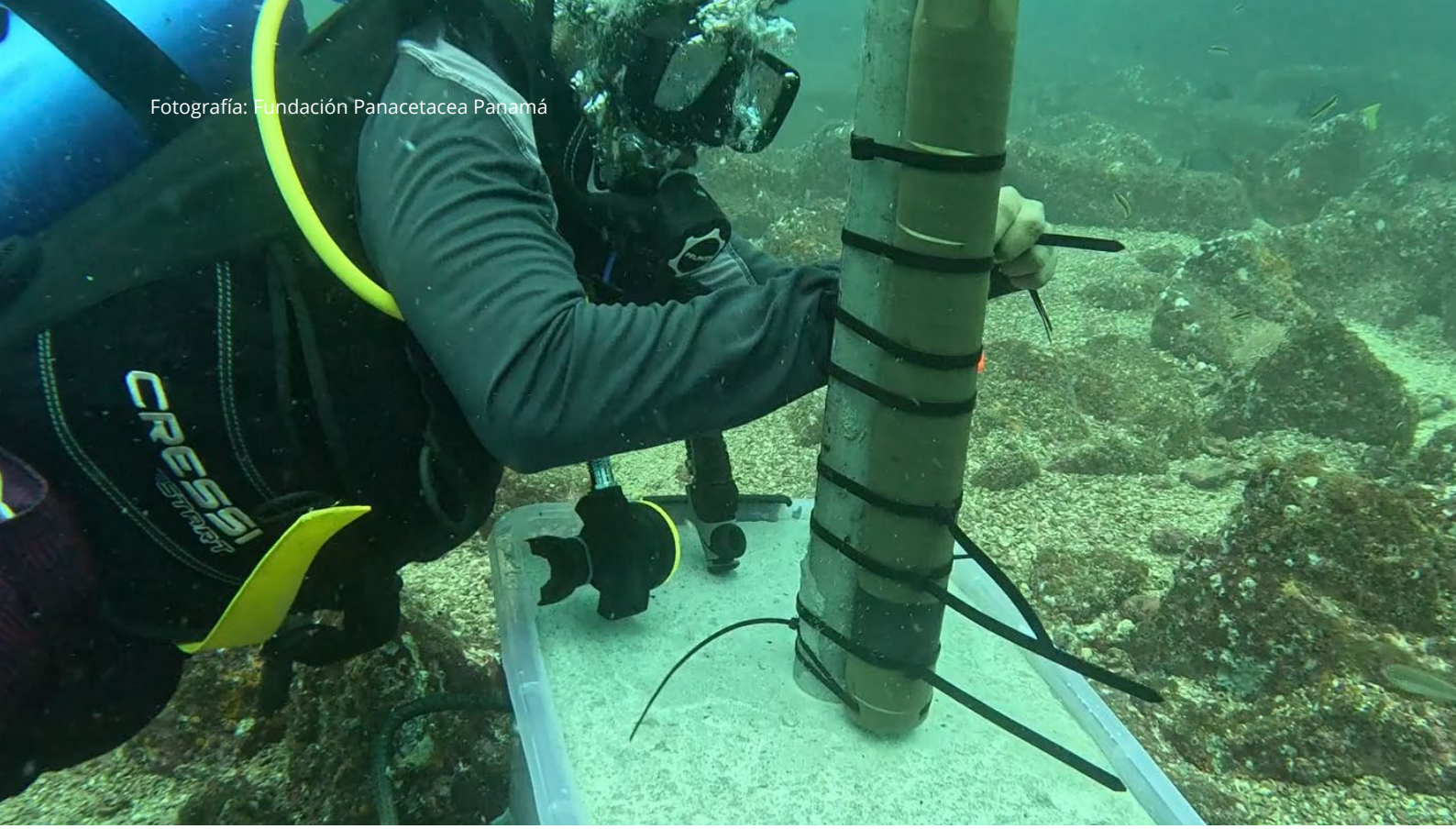



**Figura 12. Promedios espectrales mensual de Contadora entre junio del 2025 y abril del 2026. Nótese la menor presencia de clics de camarones *pistola* (flecha roja) y peces (flecha anaranjada) en comparación con otras localidades. Las líneas verticales de color amarillos y rojos indican la presencia de cantos de ballenas como embarcaciones (flecha blanca), por eso su presencia a lo largo del año.**




### 4.6.5. Isla Iguana

La figura 13 muestra el paisaje sonoro de la Isla Iguana, donde hay una considerable presencia de camarones pistola constante a lo largo del año. Los coros de peces, incluyendo el pez sapo (especies aun no identificadas) están presentes durante la época lluviosa, traslapando con los cantos de las ballenas. Durante la época seca se nota a frecuencias bajas ruido de una fuente no identificada que incrementa en abril. Sospechamos que estos sonidos son una combinación del oleaje (viento) y de peces alimentándose de invertebrados que se han adherido a la grabadora.

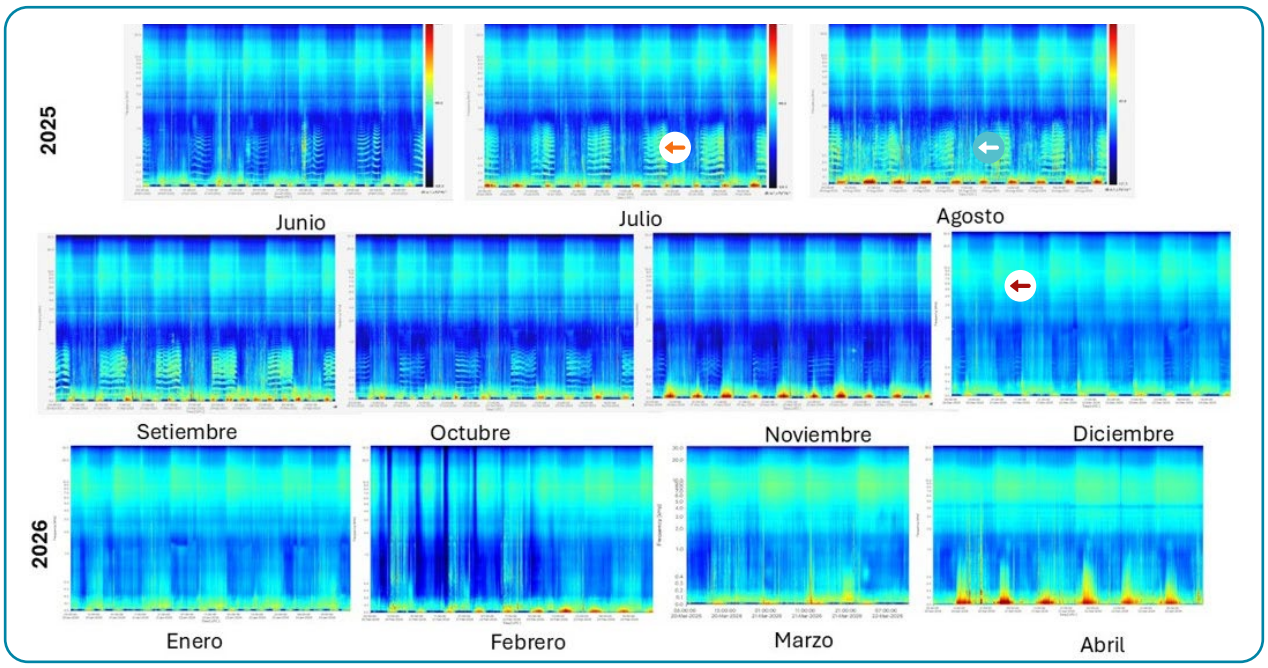



**Figura 13. Promedios espectrales mensual de Isla Iguana entre junio de 2025 y abril de 2026. Nótese la variación temporal en la presencia de chasquidos de camarones *pistola* (flecha roja) y coros de peces (flecha anaranjada) en comparación con otras localidades que tiende a enmascarar los cantos de ballenas (flecha blanca).**




Fotografía: Fundación Panacetacea Panamá

## 4.6.6. Ladrones

La figura 14 muestra que el paisaje sonoro de Ladrones es uno de los más ricos de todo el Pacífico de Panamá. Con una alta presencia de camarones pistola, varios coros de peces y la presencia de cantos de ballenas principalmente en el mes de agosto. Los coros de peces no solo están presentes en la época seca pero también aparecen a finales de la época seca.

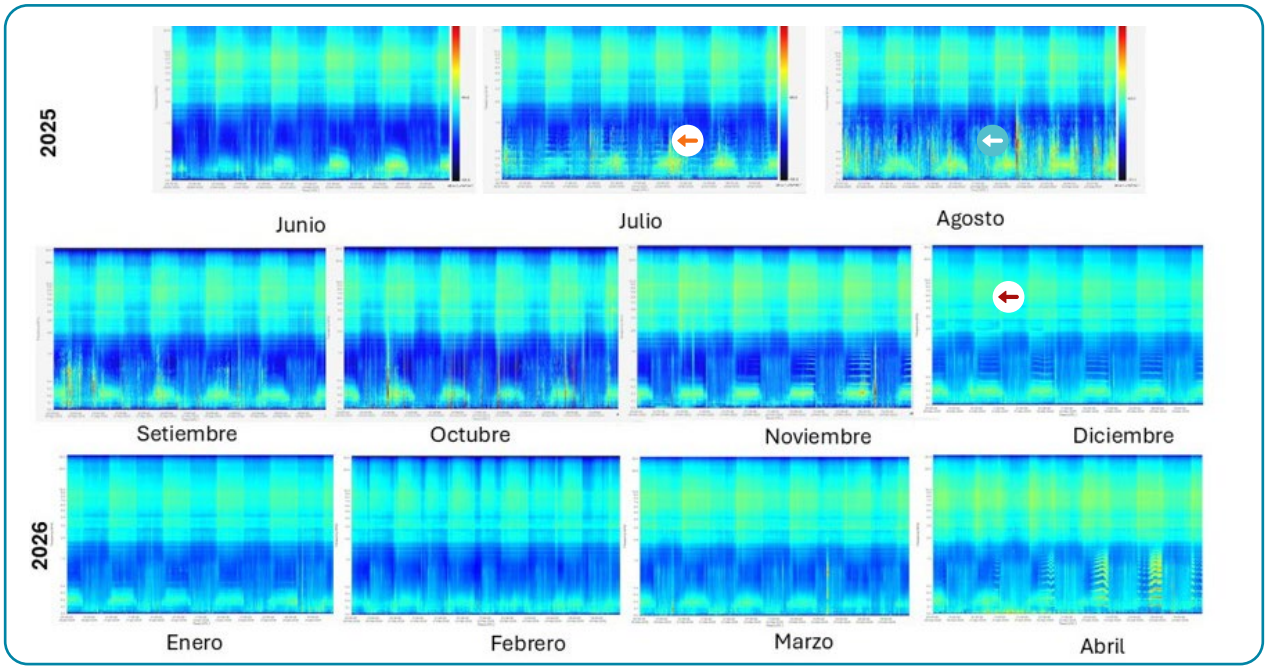



**Figura 14. Promedios espectrales mensuales de Ladrones entre junio de 2025 y abril de 2026. Nótese la alta presencia de camarones *pistola (flecha roja)* y peces *(flecha anaranjada)* casi todos los meses. Los cantos de ballenas se observan principalmente en el mes de agosto *(flecha blanca).***

### 4.6.7. Paridas

La figura 15 muestra que el paisaje sonoro de islas Paridas está dominado por camarones pistola a lo largo del año. También hay varios tipos de coros de peces que parecen ser distintos a los observados en los otros lugares. La presencia de cantos de ballenas esta enmascarada por los camarones y peces.

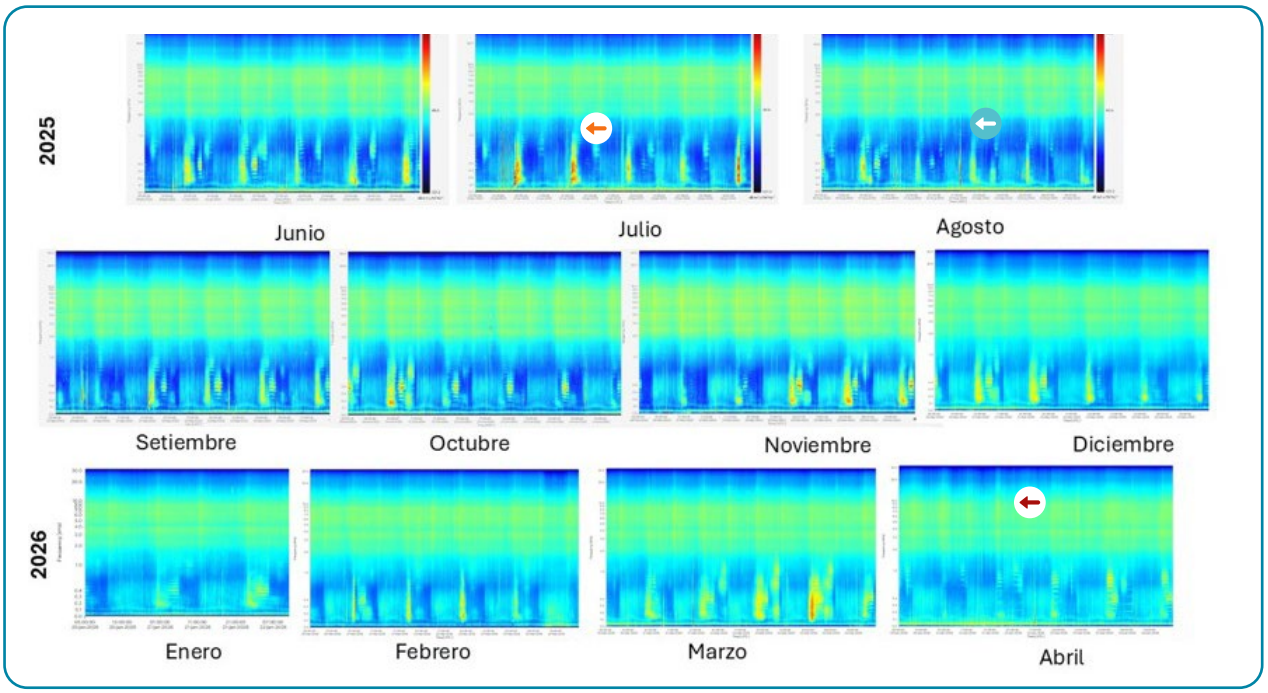



**Figura 15. Promedios espectrales mensuales de Paridas entre junio de 2025 y abril de 2026. Nótese que esta es la localidad con la mayor presencia de camarones *pistola* (flecha roja) de todas las localidades. Los coros de peces (flechas anaranjadas) parecen ser diferentes a los encontrados en otras localidades y al igual que otros sitios con alta presencia de camarones la detección de ballenas es difícil de observar (flecha blanca).**

## 4.7 Niveles de ruido y asociación con la composición del paisaje sonoro

Debido al alto costo computacional que implica calcular los niveles de ruido para cada banda de frecuencia, por cada día/hora y localidad de monitoreo, se seleccionaron dos localidades con paisajes acústicos contrastantes, Boná y Contadora, con el objetivo de identificar las bandas de frecuencia que mejor predicen la presencia de cantos de ballenas jorobadas y coros de peces. No se incluyeron botes porque el ruido generado por las embarcaciones se distribuye en múltiples bandas de frecuencia, por lo que no es posible identificar una relación consistente con una banda específica.

Para las ballenas jorobadas, las bandas de frecuencia que mostraron la mayor asociación con la presencia de cantos fueron las de 250 Hz y 500 Hz. En Boná, el 52 % de la variación en la presencia de cantos estuvo asociada con la banda de 250 Hz, mientras que en Contadora el 88 % de la variación fue explicada por la banda de 500 Hz (Figura 16). Esta asociación es consistente con el rango de frecuencias característico de los cantos de la ballena jorobada. Sin embargo, las diferencias observadas entre localidades podrían deberse a un mayor enmascaramiento acústico en Boná, causado por la alta actividad de camarones pistola. En Contadora, la presencia de ballenas estuvo más estrechamente relacionada con la banda de 500 Hz; como se observa en la Figura 16, los patrones temporales de presencia de ballenas siguen de forma muy similar las variaciones registradas en esta banda de frecuencia, en comparación con la de 250 Hz.

de 63 Hz y 125 Hz. En Boná, el 86 % de la variación en la presencia de coros de peces estuvo asociada con la banda de 63 Hz (Figura 17). En Contadora, las bandas más relacionadas con la presencia de coros de peces fueron las mismas; sin embargo, en conjunto solo explicaron el 36 % de la variación observada en presencia de coros en relación con estas bandas. Esto probablemente se debe a que la presencia de coros de peces en Contadora fue una de las más bajas registradas entre todas las localidades monitoreadas, lo que dificulta identificar una banda de frecuencia que represente de forma consistente la actividad acústica de los peces.

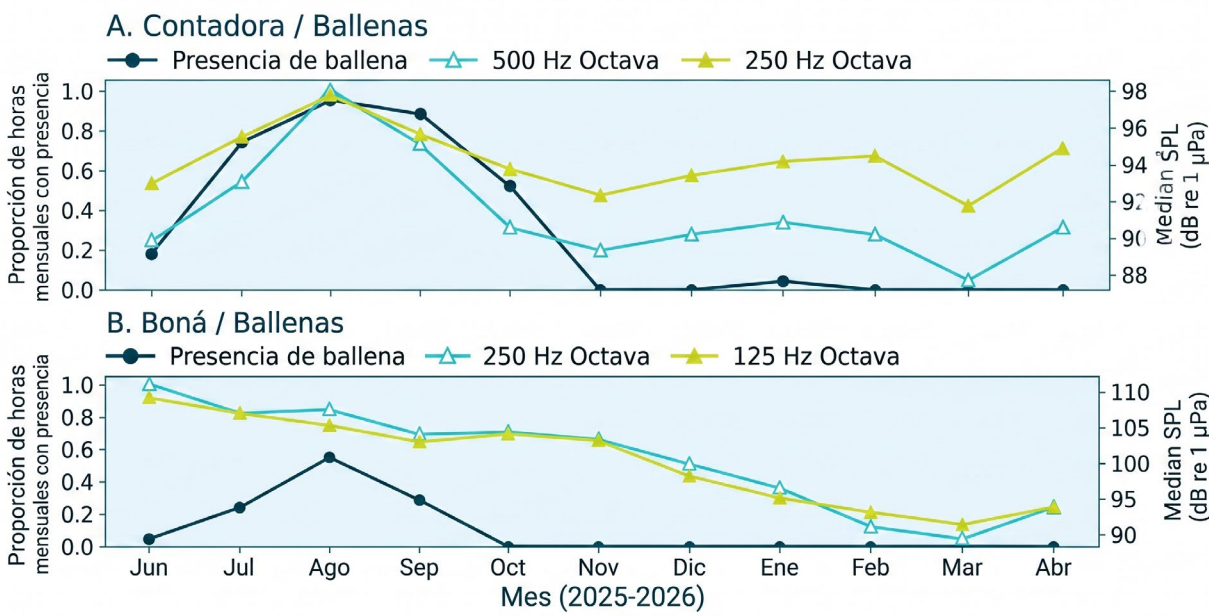



**Figura 16. Relación entre bandas de frecuencia con la presencia de cantos de ballenas en Boná y Contadora.**

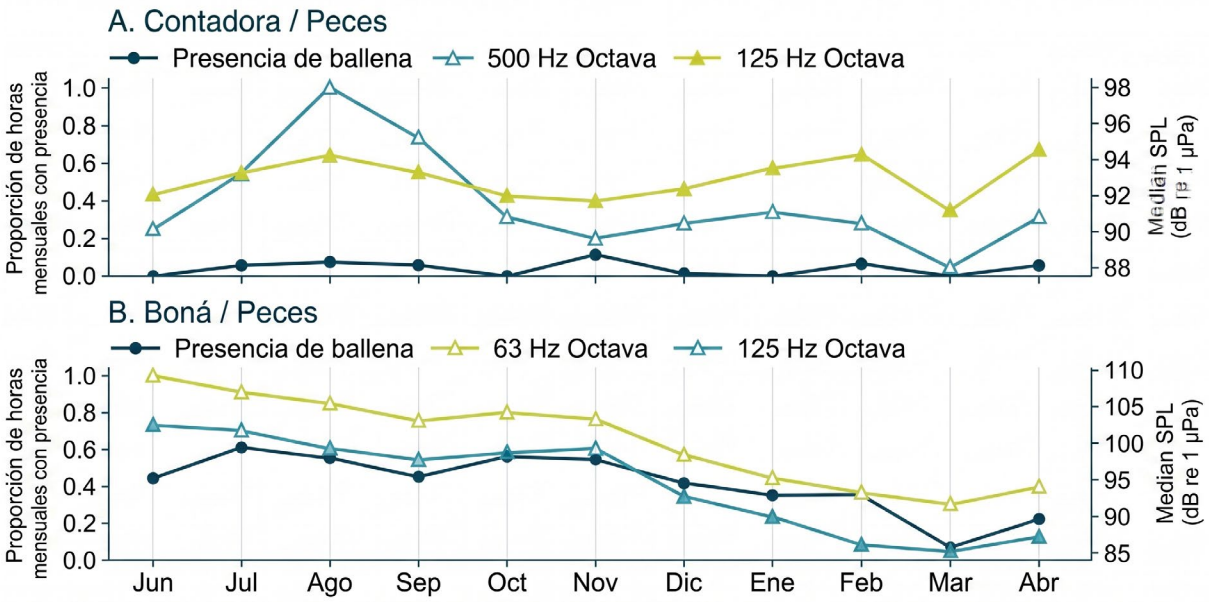



**Figura 17. Relación entre bandas de frecuencia con la presencia de coros de peces en Boná y Contadora.**

En resumen, ambos ejemplos demuestran el potencial de este tipo de análisis para monitorear las categorías de sonido que caracterizan el paisaje acústico de cada localidad. En Boná, la fuente sonora dominante corresponde a los coros de peces, cuya presencia se refleja en la fuerte asociación observada con la banda de frecuencia de 63 Hz. En contraste, en Contadora, donde los cantos de ballenas constituyen la categoría biológica más frecuente, la presencia de estos animales se representó mejor mediante la banda de 500 Hz. Estos resultados sugieren que ciertas bandas de frecuencia pueden utilizarse como indicadores eficientes para monitorear las principales fuentes biológicas de sonido en cada localidad. No obstante, es importante reconocer que cada sitio presenta una marcada variabilidad temporal, por lo que las asociaciones entre bandas de frecuencia y componentes específicos del paisaje acústico deben interpretarse con cautela, ya que pueden variar conforme cambie la composición del paisaje sonoro.

## 4.8 Impacto de la presencia de botes en cuando al canto de ballenas

Las horas con presencia de embarcaciones mostraron una tasa similar de detección de cantos de ballena que las horas sin presencia de embarcaciones (65.4 % frente a 61.4 %, respectivamente). Sin embargo, al controlar por el efecto de la localidad encontramos que la presencia de embarcaciones estuvo asociada con una reducción significativa en la probabilidad de detección de cantos de ballena jorobada (Odds ratio = 0.56, IC 95%: 0.42–0.75, $p < 0.001$). Es decir, dentro de una misma localidad, las horas con presencia de embarcaciones presentaron aproximadamente entre un 40 y un 45 % menos probabilidad de registrar cantos de ballena jorobada en comparación con las horas sin embarcaciones, una vez controladas las diferencias en los niveles base de actividad de ballenas entre localidades.

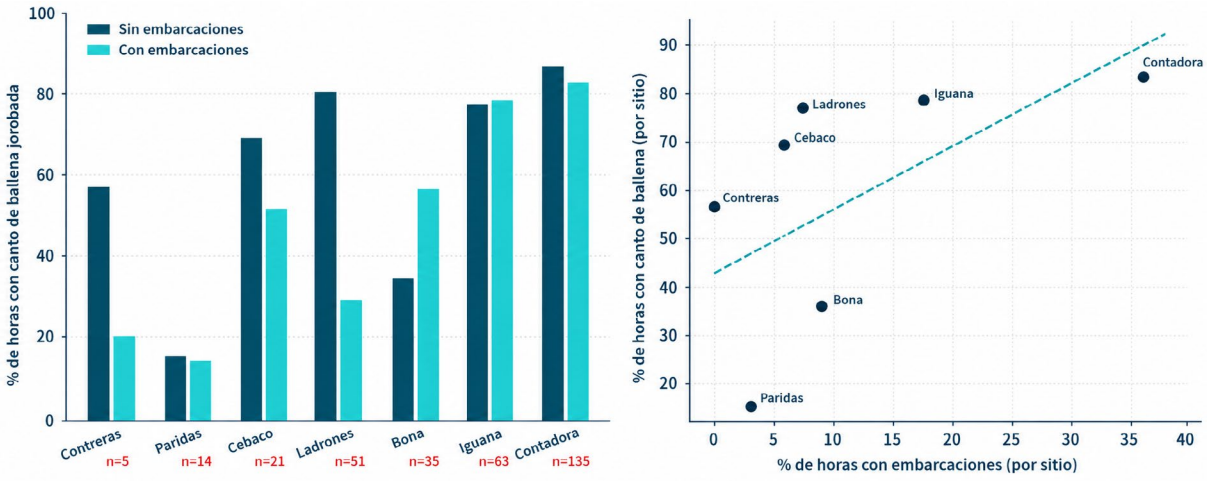



**Figura 18. Efecto de la presencia de embarcaciones en la ocurrencia del canto de ballenas. El panel de la derecha muestra que la mayoría de las localidades incluyendo Contreras, Cébaco, Ladrones y Contadora presentaron una menor detección de cantos de ballena durante las horas con presencia de embarcaciones. El panel de la izquierda muestra el porcentaje de cantos de ballena jorobada en cada localidad en función de la presencia de embarcaciones (Spearman ρ = 0.71, p = 0.071).**

En resumen, después de controlar las diferencias entre localidades, la presencia de embarcaciones se asoció con una reducción significativa en la probabilidad de detectar cantos de ballena jorobada durante el período de julio a septiembre. Además, se observó una tendencia positiva, aunque no estadísticamente significativa, entre la ocurrencia de cantos de ballenas y la presencia de embarcaciones a nivel de localidad (Figura 18), lo que sugiere que los sitios con mayor actividad de ballenas (Contreras, Ladrones, e Iguana) también podrían estar expuestos a un mayor tráfico marítimo. Este patrón merece ser evaluado mediante un monitoreo más extenso.

No obstante, estos resultados deben interpretarse con cautela por las siguientes razones: (1) los datos corresponden a observaciones de co-ocurrencia por hora y no a un experimento controlado; por lo tanto, es posible que los patrones observados reflejen coincidencias temporales y no necesariamente un impacto directo de las embarcaciones sobre la actividad de canto; (2) el tamaño de muestra varía entre localidades y, en algunas de ellas, la presencia de embarcaciones fue muy baja. Sin embargo, el efecto observado en el modelo agrupado y ajustado por localidad fue estadísticamente robusto; (3) la correlación presentada se basa únicamente en siete localidades, lo que reduce considerablemente el poder estadístico del análisis. En consecuencia, un resultado no significativo con este tamaño de muestra no descarta la existencia de una relación biológica real; y, finalmente, (4) podría existir un efecto de enmascaramiento acústico. Sin embargo, este posible sesgo se minimizó mediante el filtrado y la revisión manual de cada grabación.



# 5. Futuros análisis

Los análisis presentados están basados en un 17% del total de las horas grabadas. El total de 56,717 archivos de grabación continuará siendo analizado por colaboradores del laboratorio ONDAS de la Universidad de Vermont de la siguiente forma.

## 5.1 Detector de ballenas jorobadas basado en aprendizaje profundo (Deep Learning)

La estudiante doctoral Ilaria Coero Borga de laboratorio Ondas, recientemente completó el desarrollo de un detector automatizado para la identificación de cantos de ballena jorobada. Se evaluaron varios modelos hasta encontrar el que mejor se adaptó a las condiciones acústicas del Pacífico centroamericano. Es decir, que redujera el problema de enmascaramiento por camarones pistola y los falsos positivos causados por las llamadas de peces y otras fuentes de sonido biológico que frecuentemente se confunden con los cantos de las ballenas. Los modelos fueron entrenados con datos de Panamá y evaluado con datos de Costa Rica, el mejor modelo tuvo una precisión del 92.4% y una sensibilidad del 94.9% (Coero-Borga et al., en producción). La figura 19 muestra una aplicación del modelo para estudiar los patrones de presencia temporal en dos sitios. Este el análisis uso un total de 76.000 minutos de grabación validados manualmente. Este detector facilitará el procesamiento de grandes volúmenes de datos acústicos producidos durante este proyecto (1.4 millones de minutos de grabaciones) y su continuación evaluando el impacto de El Niño durante este 2025-2026. Esperamos terminar de correr el detector en todas las localidades a finales de octubre o principios de noviembre. Este análisis fortalecerá las capacidades de monitoreo de las poblaciones de ballenas jorobadas en la región tanto con el sistema de grabaciones implementado en este proyecto como con futuras estructuras de tiempo real (ver sección 5.3).

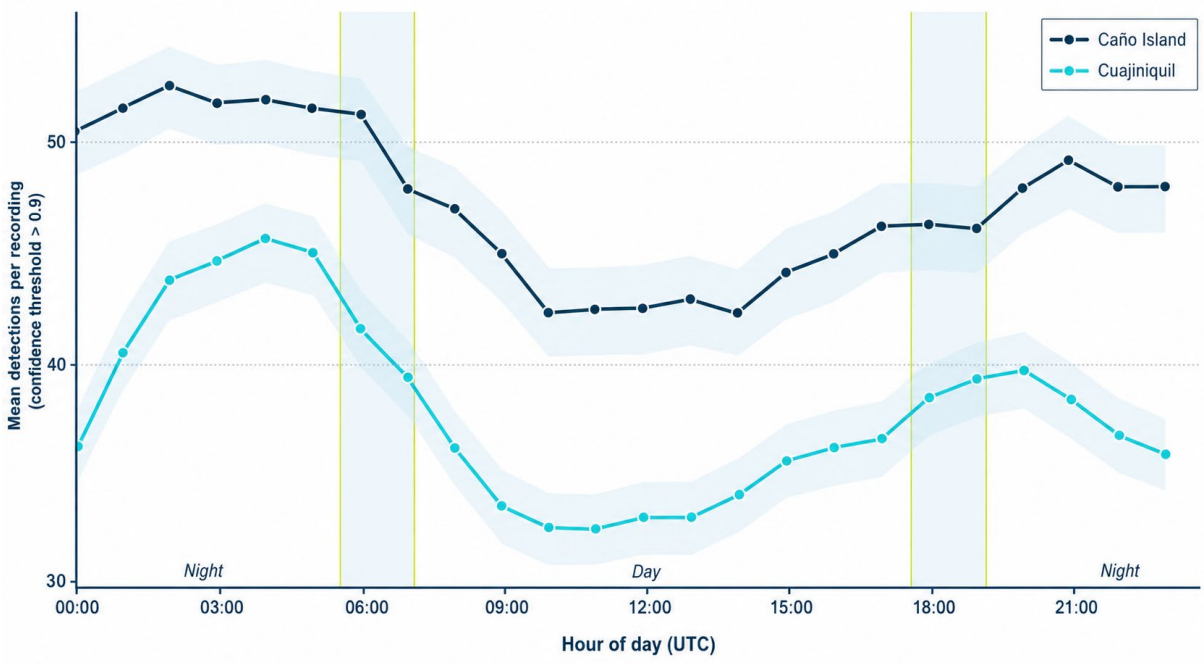



**Figura 19. Promedio de detecciones de cantos de ballenas por localidad en Costa Rica por hora del día (línea sólida, y área sombreada representas el 95% de intervalos de confianza, F1 score del 0.938) (Coero-Borga et al., en producción).**

## 5.2 Detectores de peces y botes

El laboratorio Ondas, en colaboración con otros investigadores, está desarrollando modelos para detectar automáticamente el ruido generado por embarcaciones y los coros de peces. Estos modelos se están entrenando, utilizando las grabaciones obtenidas en este proyecto, lo que permitirá identificar de manera rápida y eficiente los distintos tipos de coros de peces presentes en los registros acústicos. Actualmente, nos encontramos en la fase de preparación y validación de las grabaciones para evaluar el desempeño de ambos detectores durante el mes de noviembre. La implementación de estas herramientas permitirá acelerar considerablemente la identificación y clasificación de estas dos importantes fuentes sonoras, facilitando el análisis de grandes volúmenes de datos acústicos.

Además, estos detectores contribuirán a estimar con mayor precisión la magnitud, frecuencia de ocurrencia y distribución espacial de los sonidos producidos por embarcaciones y coros de peces en cada localidad. Esto proporcionará una caracterización más detallada del paisaje sonoro y permitirá comprender mejor las variaciones espaciales y temporales entre las localidades de estudio. La identificación y el monitoreo de coros de peces son particularmente importantes porque estos constituyen indicadores biológicos del estado de salud de los ecosistemas marinos. Muchas especies de peces producen coros asociados a comportamientos reproductivos, agregaciones de desove y actividades sociales, por lo que cambios en su presencia, intensidad o distribución pueden reflejar alteraciones en la estructura y funcionamiento del ecosistema. Asimismo, debido a que numerosas especies que generan coros tienen importancia comercial, el monitoreo acústico de estas señales puede aportar información valiosa sobre la distribución espacial y temporal de recursos pesqueros, contribuyendo a la evaluación de la sostenibilidad de las poblaciones explotadas y al mantenimiento de los beneficios económicos que estas generan para las comunidades pesqueras locales. De esta manera, el uso de detectores automatizados no solo fortalecerá la caracterización del paisaje sonoro, sino que también proporcionará información relevante para la conservación de los ecosistemas marinos y el manejo de los recursos pesqueros de la región.

## 5.3 Detectores facilitarán monitoreo en tiempo real

La implementación de infraestructura para el monitoreo acústico en tiempo real presenta importantes desafíos logísticos y operativos que deben resolverse antes de establecer redes de monitoreo permanentes a largo plazo. A diferencia de las grabadoras acústicas utilizadas en este proyecto, las cuales se colocan en el fondo marino y se recuperan periódicamente para la descarga y procesamiento de los datos, los sistemas de monitoreo en tiempo real requieren componentes expuestos en la superficie, incluyendo boyas equipadas con paneles solares, sistemas de almacenamiento de energía y antenas para la transmisión de datos.

La exposición permanente de estos equipos a las condiciones ambientales los hace vulnerables a daños ocasionados por eventos meteorológicos adversos, colisiones con embarcaciones, procesos de bioincrustación (biofouling) y corrosión marina. Asimismo, existe el riesgo de robo o vandalismo. Como continuación de este proyecto, estaremos coordinando con los guardaparques del Parque Nacional Coiba la implementación de un sistema de monitoreo acústico en tiempo real usando infraestructura desarrollada por la compañía SOFAR (Figura 20). La integración de esta plataforma con los detectores automatizados de cetáceos, embarcaciones y coros de peces desarrollados para este proyecto permitirá evaluar la eficiencia, confiabilidad y viabilidad práctica del monitoreo acústico remoto dentro de áreas marinas protegidas en Centroamérica. En particular, esta iniciativa facilitará la evaluación continua de la presencia de cetáceos y de la actividad de embarcaciones dentro de áreas protegidas, dos componentes fundamentales para la gestión y conservación de estos ecosistemas.

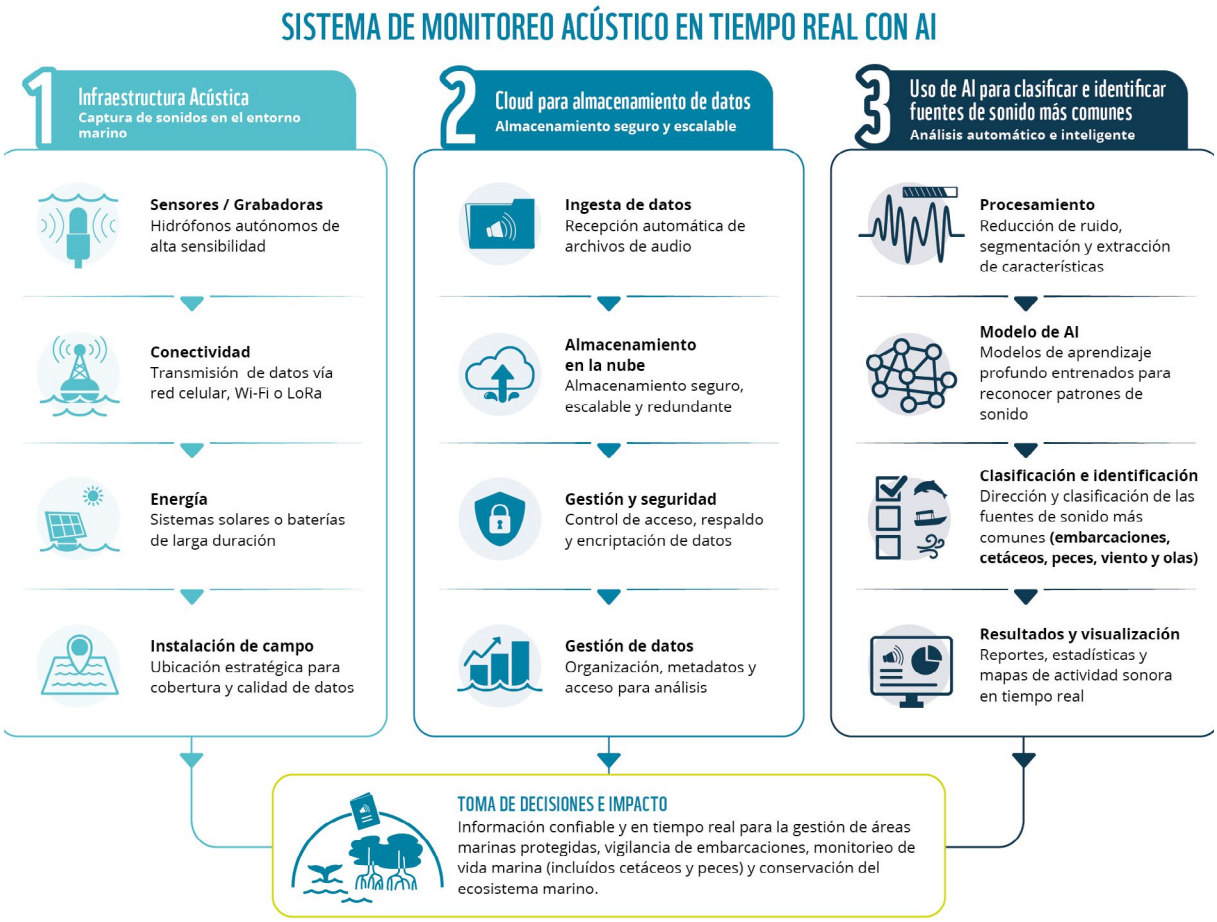



**Figura 20. Flujo de trabajo propuesto para el escalamiento del proyecto mediante la incorporación de un sistema de monitoreo acústico en tiempo real.**

## 5.4 Impactos del cambio climático global

En mayo del presente año volvimos a instalar las grabadoras en las mismas siete localidades. El actual evento de El Niño ofrece un escenario ideal para establecer una línea base sobre cómo responden las comunidades biológicas y los paisajes sonoros a perturbaciones climáticas de gran escala en temperatura. El aumento de la temperatura en los océanos está asociado con promueve un incremento en la velocidad de propagación del sonido en el agua de mar. Como consecuencia, las señales acústicas pueden viajar de manera diferente, incrementando su alcance en el océano (Affafi et al., 2022). Estos cambios pueden afectar la comunicación de animales marinos como ballenas y delfines, que dependen del sonido para su supervivencia.

Por esta razón esperamos colocar el sistema de monitoreo acústico real antes de fin de año lo que permitirá la detección continua de cetáceos, coros de peces y ruido antropogénico durante las olas de calor marinas, permitiéndonos determinar si hay cambios en los patrones de migración o modificaciones en los períodos de actividad acústica de estos animales. A largo plazo, la integración de estas tecnologías generará una base de datos regional única para evaluar tendencias asociadas al cambio climático, facilitando la identificación de áreas vulnerables, la detección temprana de alteraciones ecosistémicas y el desarrollo de estrategias de manejo adaptativo orientadas a la conservación de la biodiversidad marina y la sostenibilidad de los recursos pesqueros de los que dependen las comunidades costeras.

# 6. Conclusiones

Este proyecto representa el primer estudio de gran escala espaciotemporal del paisaje sonoro marino en la costa del Pacífico de Centroamérica. Entre los resultados más destacables están (ver resumen en Figura 21):

- **Cada localidad representa una comunidad acústica y un paisaje sonoro característico que cambia a varias escalas temporales.** Son estas características las que explican las diferencias entre localidades reflejando las distintas condiciones ecológicas tanto en composición de especies como en los niveles de actividad humana. Por lo tanto, esto resultados resaltan el valor del monitoreo acústico pasivo como herramienta para caracterizar la variabilidad espacial de los ecosistemas marinos y evaluar su estado ecológico.

- **La variación en la detección de cantos de las ballenas jorobadas del sur a lo largo de la costa del Pacifico panameñol sugiere la existencia de una red de hábitats funcionalmente conectados durante la temporada reproductiva de estos animales.** En particular, localidades como Boná, Cébaco y Contreras parecen desempeñar un papel importante como corredores de tránsito entre áreas de uso más intensivo, como Contadora, Isla Iguana y Ladrones. Mientras que sitios dentro del Golfo de Chiriquí es el hábitat más utilizado por las ballenas del norte.

- **Los resultados también indican la presencia de ruido de embarcaciones en todas las localidades monitoreadas; sin embargo, la magnitud y los patrones temporales de esta actividad difieren considerablemente entre localidades, probablemente como resultado de los distintos usos del espacio marino.** En Contadora, la actividad de embarcaciones fue las más alta de todas las localidades donde la presencia de ruido de motores fue mayor durante las horas diurnas, lo que sugiere una posible influencia de actividades vinculadas al turismo marino, incluyendo la observación de cetáceos. En contraste, otras localidades como Ladrones, la mayor presencia de embarcaciones fue durante horas nocturnas, patrón consistente con actividades pesqueras.

- **Los análisis iniciales sugieren que la presencia de embarcaciones puede influir en el comportamiento acústico de las ballenas jorobada del sur especialmente en áreas donde hay una alta presencia de embarcaciones.** Aunque estos patrones deben interpretarse con cautela debido a las limitaciones del estudio, los hallazgos resaltan el valor del monitoreo acústico pasivo para evaluar posibles interacciones entre las actividades humanas y la fauna marina. Los futuros análisis con toda la base de datos y la continuidad del monitoreo permitirán determinar si estas tendencias se mantienen en el tiempo y comprender mejor los factores que moldean los paisajes sonoros de las aguas del Pacífico panameño.

- **A pesar de la presencia generalizada de ruido generado por embarcaciones, los paisajes sonoros de varias localidades continúan siendo dominados por una diversidad de fuentes biológicas de sonido como peces y camarones pistola, lo que sugiere que estos hábitats aún mantienen una importante funcionalidad ecológica.** No obstante, las diferencias observadas en la contribución relativa del ruido antropogénico resaltan la necesidad de evaluar con mayor detalle los posibles efectos de esta fuente de contaminación sónica sobre las especies que dependen del sonido para comunicarse, orientarse, reproducirse y detectar recursos.

- **En conjunto, este estudio establece una línea base regional sin precedentes para la caracterización del paisaje sonoro marino del Pacífico centroamericano.** Los resultados destacan la importancia de conservar tanto los hábitats críticos utilizados por las ballenas

jorobadas como la integridad acústica de estos ecosistemas. Asimismo, evidencian la necesidad de incorporar el monitoreo acústico en programas de manejo y conservación, particularmente en zonas donde coinciden áreas de importancia biológica para los cetáceos y actividades humanas, como el turismo marino y la pesca. Futuros análisis permitirán profundizar en la relación entre las comunidades acústicas, el uso del hábitat por las ballenas jorobadas y la relación entre el ruido de motores y las actividades acústicas de las ballenas y peces.

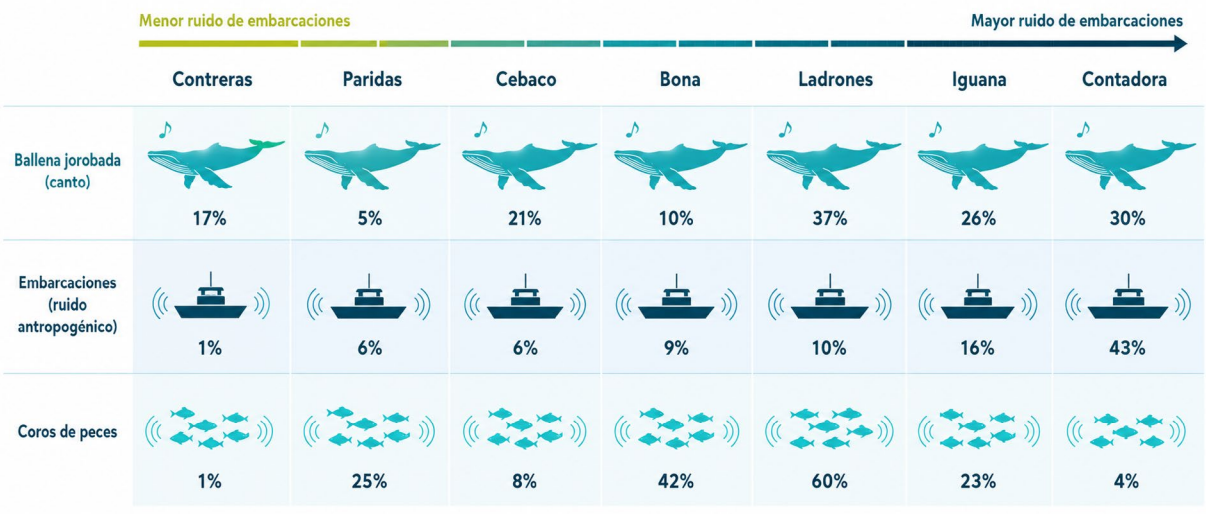



**Figura 21. Resumen gráfico de los principales resultados de este estudio. La presencia de embarcaciones, coros de peces y cantos de ballena jorobada se registró en todas las localidades monitoreadas; sin embargo, la ocurrencia y contribución relativa de estas fuentes sonoras variaron a diferentes escalas temporales, dando lugar a paisajes sonoros distintivos en cada sitio. Además, las localidades con mayor actividad de embarcaciones tendieron a coincidir con aquellas que presentaron una mayor presencia acústica de ballenas jorobadas.**

Las próximas etapas de este proyecto ampliarán significativamente el alcance de estos análisis mediante la incorporación de detectores automatizados basados en inteligencia artificial para la identificación de ballenas jorobadas, ruido de embarcaciones y coros de peces. Estas herramientas permitirán procesar grandes volúmenes de datos acústicos con una resolución temporal y espacial sin precedentes, facilitando la cuantificación detallada de patrones de presencia, actividad biológica y presión antropogénica en toda la región. En particular, la detección automática de coros de peces aportará información valiosa sobre la dinámica de comunidades ecológica y comercialmente importantes, fortaleciendo la capacidad de evaluar el estado de salud de los ecosistemas y su relevancia para las pesquerías locales.

Adicionalmente, la implementación piloto de sistemas de monitoreo acústico en tiempo real permitirá evaluar la viabilidad de generar alertas y observaciones continuas sobre la presencia de cetáceos y embarcaciones dentro de áreas marinas protegidas. La integración de monitoreo pasivo, detección automatizada y transmisión de datos en tiempo real representa una nueva frontera para la gestión y conservación marina en Panamá y el Pacífico centroamericano. Esta infraestructura también creará oportunidades únicas para evaluar los efectos de fenómenos climáticos, incluyendo el actual evento de El Niño, sobre las comunidades acústicas marinas, permitiendo documentar cambios en la distribución de cetáceos, la actividad de peces y los patrones de uso del hábitat a diferentes escalas temporales.

En última instancia, este proyecto proporciona las bases científicas y tecnológicas para el establecimiento de una red de monitoreo acústico marino regional capaz de apoyar la conservación de cetáceos, el manejo sostenible de las pesquerías y la evaluación de los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas marinos de Centroamérica.

# 7. Recomendaciones

## 7.1 Mantener y ampliar el programa de monitoreo acústico pasivo a largo plazo

Los resultados de este estudio demuestran que los paisajes sonoros marinos son altamente variables en escala espacial y temporal, por lo que se recomienda mantener el monitoreo acústico en las siete localidades e incorporar nuevos sitios de interés ecológico. La continuidad del programa permitirá continuar cambios asociados al tráfico marítimo, actividades pesqueras y fenómenos climáticos, y fortalecer la toma de decisiones basada en evidencia científica.

Adicionalmente, debido a que los coros de peces constituyen una de las principales fuentes biológicas de sonido en varias de las localidades monitoreadas y están asociados con procesos ecológicos clave, como la reproducción y el reclutamiento de especies de importancia comercial, se recomienda incorporar su monitoreo dentro de las estrategias de manejo y conservación. La protección de estos hábitats acústicamente activos puede contribuir no solo a la conservación de la biodiversidad marina, sino también a la sostenibilidad de las pesquerías de las que dependen numerosas comunidades costeras. La reducción del ruido antropogénico en estas áreas permitirá preservar señales acústicas fundamentales para peces y otros organismos marinos que utilizan el sonido para comunicarse, reproducirse y localizar hábitats adecuados.

## 7.2 Incorporar el monitoreo acústico en la gestión de áreas marinas protegidas

Se recomienda integrar el monitoreo acústico pasivo como una herramienta de gestión dentro de las áreas marinas protegidas y otras zonas prioritarias para la conservación de cetáceos. La incorporación de sistemas de monitoreo en tiempo real permitirá a guardaparques y administradores de recursos responder de manera más rápida y eficiente ante cambios en la presencia de cetáceos, el tráfico marítimo u otras fuentes de perturbación. Asimismo, esta infraestructura puede apoyar la implementación de medidas de manejo adaptativo frente a los efectos del cambio climático en la región, facilitando el ajuste de estrategias de conservación ante modificaciones en la distribución y el uso de hábitats críticos por parte de las ballenas jorobadas y otras especies marinas.

## 7.3 Fortalecer la gestión del tráfico marítimo en zonas de alta importancia biológica

Dado que en varias localidades las actividades humanas se traslapan con la presencia de ballenas, se recomienda reforzar los lineamientos y las buenas prácticas en todas las comunidades donde se realizan actividades de observación de cetáceos para reducir los impactos acústicos del tráfico marítimo. Asimismo, se recomienda evaluar las rutas de navegación y promover velocidades reducidas en áreas sensibles y hábitats de importancia reproductiva para estos animales. Estos esfuerzos deben estar acompañados por programas de educación y sensibilización dirigidos a operadores turísticos, pescadores y otros usuarios del espacio marino.

## 7.4 Continuar apoyando el crecimiento científico y tecnológico

Nuestra organización, Panacetacea, se ha consolidado como un referente nacional y regional en el uso del monitoreo acústico pasivo para la investigación y conservación de los ecosistemas marinos. Nuestro equipo trabaja continuamente en el fortalecimiento de esta herramienta mediante la especialización tecnológica y el desarrollo de capacidades computacionales avanzadas. En colaboración con el Laboratorio Ondas, estamos desarrollando detectores automatizados para cetáceos, coros de peces y ruido de embarcaciones, los cuales facilitarán el procesamiento de grandes volúmenes de datos acústicos y la implementación de sistemas de monitoreo acústico en tiempo real. Estas innovaciones fortalecerán la capacidad de monitorear la biodiversidad marina, evaluar las presiones antropogénicas y apoyar la toma de decisiones para la gestión y conservación de los ecosistemas marinos de la región.

Estos esfuerzos deben venir acompañados del desarrollo de una plataforma abierta y colaborativa, para el acceso a los resultados de estos esfuerzos que este basado en capacidades regionales de inteligencia artificial y aprendizaje automático, que responda a las necesidades locales y aprovechamiento del talento científico y tecnológico de Centroamérica. Esta plataforma facilitaría el acceso a la información para organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, educadores, estudiantes, operadores turísticos, pescadores, comunidades costeras y administradores de recursos marinos, contribuyendo a la educación ambiental, la reducción de impactos humanos sobre los ecosistemas marinos y el fortalecimiento de iniciativas internacionales orientadas a disminuir la contaminación acústica marina como el programa de GloNoise de las Naciones Unidas. Además, serviría como una herramienta clave para generar indicadores ambientales, apoyar la toma de decisiones y evaluar los efectos del cambio climático y las actividades humanas sobre los ecosistemas marinos de la región.

# 8. Referencias


» Affatati, A., Scaini, C., & Salon, S. (2022). Ocean Sound Propagation in a Changing Climate: Global Sound Speed Changes and Identification of Acoustic Hotspots. Earth's Future, 10, e2021EF002099. https://doi.org/10.1029/2021EF002099

» ARAP (Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá). (2024). Informe de Pesca y Acuicultura 2024. República de Panamá. https://arap.gob.pa/wp-content/uploads/2025/05/INFORME-DE-PESCA-Y-ACUICULTURA-2024.pdf

» D'Croz, L., Del Rosario, J. B., & Gómez, J. A. (1991). Upwelling and phytoplankton in the Bay of Panamá. Revista de Biología Tropical, 39, 237–245.

» Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., Erbe, C., Gordon, T. A. C., Halpern, B. S., Harding, H. R., Havlik, M. N., Meekan, M., Merchant, N. D., Miksis-Olds, J. L., Parsons, M., Predragovic, M., Radford, A. N., Radford, C. A., Simpson, S. D., Slabbekoorn, H., Staaterman, E., Van Opzeeland, I. C., Winderen, J., Zhang, X., & Juanes, F. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. Science, 371(6529), eaba4658. https://doi.org/10.1126/science.aba4658

» Erbe, C., Reichmuth, C., Cunningham, K., Lucke, K., & Dooling, R. (2016). Communication masking in marine mammals: A review and research strategy. Marine Pollution Bulletin, 103(1-2), 15–38. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.007

» Erbe, C., Marley, S. A., Schoeman, R. P., Smith, J. N., Trigg, L. E., & Embling, C. B. (2019). The effects of ship noise on marine mammals: A review. Frontiers in Marine Science, 6, 606. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00606

» Erisman, B. E., & Rowell, T. J. (2017). A sound worth saving: Acoustic characteristics of a massive fish spawning aggregation. Biology Letters, 13(12), 20170656. https://doi.org/10.1098/rsbl.2017.0656

» Félix, F., & Haase, B. (2005). Distribution of humpback whales along the coast of Ecuador and management implications. Journal of Cetacean Research and Management, 7(1), 21–31. https://doi.org/10.47536/JCRM.V7I1.753

» Félix, F., Haase, B., Ávila, I. C., Stevick, P. T., & Falconí, J. (2011). Interchange and movements of humpback whales (Megaptera novaeangliae) between breeding areas off Ecuador and Colombia and feeding areas off the Antarctic Peninsula. Journal of Cetacean Research and Management, Special Issue 3, 95–101.

» Frisk, G. V. (2012). Noiseonomics: The relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends. Scientific Reports, 2, 437. https://doi.org/10.1038/srep00437

» Gagne, E., Perez-Ortega, B., Hendry, A. P., Melo-Santos, G., Walmsley, S. F., Rege-Colt, M., Austin, M., & May-Collado, L. J. (2022). Dolphin communication during widespread systematic noise reduction: A natural experiment amid COVID-19 lockdown. Frontiers in Remote Sensing, 3, 934608. https://doi.org/10.3389/frsen.2022.934608

» Han, S. M., Land, B. R., Bass, A. H., & Rice, A. N. (2023). Sound production biomechanics in three-spined toadfish and potential functional consequences of swim bladder morphology in the Batrachoididae. The Journal of the Acoustical Society of America, 154(5), 3466–3478.

» Haviland-Howell, G., Frankel, A. S., Powell, C. M., Sayigh, L. S., Esch, H. C., & Wells, R. S. (2007).

Recreational boating traffic: A chronic source of anthropogenic noise in a dolphin habitat. The Journal of the Acoustical Society of America, 122(1), 151–160. https://doi.org/10.1121/1.2735116

» Hawkins, L. A., Parsons, M. J. G., McCauley, R. D., Parnum, I. M., & Erbe, C. (2025). Passive acoustic monitoring of fish choruses: A review to inform the development of a monitoring and management tool. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 35, 847–874. https://doi.org/10.1007/s11160-025-09936-9

» Hoyt, E., & Iñíguez, M. (2008). The state of whale watching in Latin America. WDCS, IFAW, and Global Ocean.

» International Whaling Commission (IWC). (2024). The Central American humpback whale population was identified by the Commission as a priority for a Conservation Management Plan (CMP) (Recommendation SC2452). IWC Scientific Committee, IWC69. https://recommendations.iwc.int/view/7329

» K. Lisa Yang Center for Conservation Bioacoustics at the Cornell Lab of Ornithology. (2026a). Raven Pro: Interactive sound analysis software (Version 1.6.5) [Computer software]. Cornell Lab of Ornithology. https://www.ravensoundsoftware.com/

» K. Lisa Yang Center for Conservation Bioacoustics at the Cornell Lab of Ornithology. (2026b). Raven Expedition (Version 1.4.3) [Computer software]. Cornell Lab of Ornithology. https://www.ravensoundsoftware.com/

» McCormick, M. I., Fakan, E. P., Nedelec, S. L., & Allan, B. J. M. (2019). Effects of boat noise on fish fast-start escape response depend on engine type. Scientific Reports, 9, 5357. https://doi.org/10.1038/s41598-019-43099-5

» Maté, J. L. (2003). Corals and coral reefs of the Pacific coast of Panamá. In J. Cortés (Ed.), Latin American coral reefs (pp. 387–417). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-044451388-5/50018-7

» May-Collado, L. J., & Wartzok, D. (2008). A comparison of bottlenose dolphin whistles in the Western Atlantic Ocean: Insights on factors promoting whistle variation. Journal of Mammalogy, 89(1), 205–216. https://doi.org/10.1644/06-MAMM-A-388.1

» May-Collado, L. J., Amador-Caballero, M., Casas, J. J., Gamboa-Poveda, M. P., Garita-Alpízar, F., Gerrodette, T., González-Barrientos, R., Hernández-Mora, G., Palacios, D. M., Palacios-Alfaro, J. D., Pérez, B., Rasmussen, K., Trejos-Lasso, L., & Rodríguez-Fonseca, J. (2017). Ecology and conservation of cetaceans of Costa Rica and Panama. In M. Rossi-Santos & C. Finkl (Eds.), Advances in marine vertebrate research in Latin America (Chap. 12). Springer.

» May-Collado, L. J., Bottoms, S., Durant, G., Palacios-Alfaro, J. D., & Alvarado, J. J. (2023). Singing activity of the Breeding Stock G humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) (Artiodactyla: Balaenopteridae) at Caño Island Biological Reserve, Costa Rica before, during, and after COVID-19 lockdowns. Revista de Biología Tropical, 71(Special Issue 4), e57280. https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v71iS4.57280

» Nichols, T. A., Anderson, T. W., & Širović, A. (2015). Intermittent noise induces physiological stress in a coastal marine fish. PLoS ONE, 10(9), e0139157. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139157

» O'Connor, S., Campbell, R., Cortez, H., & Knowles, T. (2009). Whale watching worldwide: Tourism numbers, expenditures and expanding economic benefits. International Fund for Animal Welfare (IFAW).

» Perez-Ortega, B., Daw, R., Paradee, B., Gimbrere, E., & May-Collado, L. J. (2021). Dolphin-watching

boats affect whistle frequency modulation in bottlenose dolphins. Frontiers in Marine Science, 8, 618420. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.618420

» Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., Gage, S. H., & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: The science of sound in the landscape. BioScience, 61(3), 203–216. https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6

» Rasmussen, K., Palacios, D. M., Calambokidis, J., Saborío, M. T., Dalla Rosa, L., Secchi, E. R., Steiger, G. H., Allen, J. M., & Stone, G. S. (2007). Southern Hemisphere humpback whales wintering off Central America: Insights from water temperature into the longest mammalian migration. Biology Letters, 3(3), 302–305. https://doi.org/10.1098/rsbl.2007.0067

» Rice, A. N., & Bass, A. H. (2009). Novel vocal repertoire and paired swimbladders of the three-spined toadfish, Batrachomoeus trispinosus: Insights into the diversity of the Batrachoididae. Journal of Experimental Biology, 212, 1377–1391. https://doi.org/10.1242/jeb.028506

» Rowell, T. J., Demer, D. A., Aburto-Oropeza, O., Cota-Nieto, J. J., Hyde, J. R., & Erisman, B. E. (2017). Estimating fish abundance at spawning aggregations from courtship sound levels. Scientific Reports, 7(1), 3340. https://doi.org/10.1038/s41598-017-03383-8

» Seyboth, E., Meynecke, J.-O., de Bie, J., Roychoudhury, A., & Findlay, K. (2023). A review of post-whaling abundance, trends, changes in distribution and migration patterns, and supplementary feeding of Southern Hemisphere humpback whales. Frontiers in Marine Science, 10, 997491. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.997491

» Syrjälä, J., Kalliola, R., & Pajala, J. (2020). Underwater acoustic environment of coastal sea with heavy shipping traffic: NE Baltic Sea during wintertime. Frontiers in Marine Science, 7, 589141. https://doi.org/10.3389/fmars.2020.589141

» Trickey, J. S., Cárdenas-Hinojosa, G., Rojas-Bracho, L., Schorr, G. S., Rone, B. K., Hidalgo-Pla, E., Rice, A., & Baumann-Pickering, S. (2022). Ultrasonic antifouling devices negatively impact Cuvier's beaked whales near Guadalupe Island, México. Communications Biology, 5, 1005. https://doi.org/10.1038/s42003-022-03959-9

» Watt, C. A., Simonee, J., L'Herault, V., Zhou, R., Ferguson, S. H., Marcoux, M., & Black, S. (2020). Cortisol levels in narwhal (*Monodon monoceros*) blubber from 2000–2019. Fisheries and Oceans Canada.

GOBIERNO NACIONAL
CON PASO FIRME

MINISTERIO DE AMBIENTE

MARVIVA

panacetacea

gef

WWF

Aliados por el manejo sostenible del Pacífico

PNUD

# Pacífico Sostenible