

# Metodologías y ayudas en Investigación

## APLICANDO TÉCNICAS DE BIOACÚSTICA A ESTUDIOS DE ORNITOLOGÍA URBANA: GUÍA Y RECOMENDACIONES

Rocío Bahía<sup>1\*</sup>, Sergio A. Lambertucci<sup>1</sup>, y Karina L. Speziale<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigaciones en Biología de la Conservación (GRINBIC), Laboratorio Ecotono, INIBIOMA, Universidad Nacional del Comahue - CONICET, Quintral 1250 (R8400FRF), San Carlos de Bariloche, Argentina.

\*rocio.bahia@comahue-conicet.gob.ar

**RESUMEN.-** Una de las principales maneras de comunicarse de las aves, a través de la emisión de sonidos o vocalizaciones, puede verse afectada por los sonidos derivados de las actividades antrópicas. Estos disturbios (ruidos) interfieren en la comunicación pudiendo afectar la identificación de pares, los procesos reproductivos, la defensa de los territorios e, incluso, la composición y diversidad de las comunidades de aves. Las urbanizaciones son fuente de alta emisión de ruidos antropogénicos y constituyen ambientes sonoros complejos para las aves. La bioacústica, a través del monitoreo acústico pasivo (MAP), es una de las herramientas en auge y con numerosas ventajas que resultan particularmente útiles en estudios de ecología urbana. El MAP es un método no invasivo y eficiente que permite obtener información de forma autónoma, continua, simultánea y en diversas condiciones ambientales. A pesar de esto, resulta una herramienta aún poco explotada en los países del Neotrópico. Realizamos una descripción metodológica mostrando las potencialidades del MAP en investigaciones de aves y, particularmente en aquellas que ocurren en ambientes urbanos y/o peri-urbanos. Para esto realizamos una revisión no sistemática de la bibliografía existente, resumiendo nociones básicas del sonido y su proceso de grabación, opciones de micrófonos y grabadores asociados al MAP, diseños de muestreo, programas de análisis e índices acústicos. También, presentamos ejemplos de estudios nuestros sobre el MAP en ambientes urbanos de la Patagonia. Resaltamos el valor de esta herramienta de estudio para investigaciones a largo plazo, en sitios complejos de estudiar, para programas de monitoreo y proyectos de conservación.

**PALABRAS CLAVE:** *aves, bioacústica, conservación, ecología urbana, herramienta de investigación, monitoreo acústico pasivo, paisaje sonoro, tecnología*

**ABSTRACT.-** APPLYING BIOACOUSTIC TECHNIQUES TO URBAN ORNITHOLOGY STUDIES: GUIDELINES AND RECOMMENDATIONS. One of the main ways birds communicate, through the emission of sounds or vocalizations, can be affected by sounds produced by human activities in urban areas. These noises or disturbances interfere with bird communication, affecting mate identification, reproductive processes, territory defense, and even bird community richness and diversity. In this way, urban areas constitute complex sound environments for birds. Bioacoustics, through passive acoustic monitoring (PAM), is a growing tool with numerous advantages especially useful for urban ecology studies. PAM is a non-invasive and effective method for obtaining information autonomously, continuously, simultaneously and under various environmental conditions. Despite this, it is still an under-exploited tool in Neotropical countries. We here provide a methodological description showing the potential of PAM in bird research, particularly for birds living in urban and/or peri-urban environments. To this end, we conducted a non-systematic review of the existing literature presenting basic notions of sound and its recording process, options of microphone and recorders associated with the PAM, sampling designs, analyzes programs, and acoustic indexes. We also present examples of our research on monitoring urban environments in Patagonia. We highlight the value of this study tool for long-term research, complex study sites, monitoring programs and conservation projects.

**KEYWORDS:** *bioacoustics, birds, conservation, passive acoustic monitoring, research tool, soundscape, technology, urban ecology*

*Recibido: 14 de julio de 2022; Aceptado: 28 de diciembre de 2022*

Los procesos de urbanización generan cambios importantes en el paisaje y los ecosistemas, constituyendo una de las principales amenazas para la biodiversidad (Hansen et al. 2005, Kowarik 2011). El aumento de la urbanización conduce a una disminución de las poblaciones de fauna silvestre que no logran adaptarse a las nuevas condiciones impuestas por estos entornos modificados (Chace y Walsh 2006, Aronson et al. 2014). Sin embargo, al mismo tiempo, las ciudades constituyen ecosistemas novedosos donde las especies logran interactuar aprovechando los nuevos nichos ecológicos y recursos disponibles (e.g., alimento, refugio, sitios de nidificación) manteniendo poblaciones estables (Aronson et al. 2014, Gil y Brumm 2014, Fischer et al. 2015, Bahia et al. 2021). Por ejemplo, dentro de las ciudades, un hábitat que puede ser muy usado por las aves son los parques y jardines, sobre todo son bien manejados (Goddard et al. 2020, Gonçalves et al. 2021, Elizalde y Lambertucci 2022). Dado al crecimiento acelerado de las urbanizaciones, es fundamental llevar adelante investigaciones y proyectos de monitoreo de la fauna que habita allí (Garaffa et al. 2009).

Las urbanizaciones constituyen ambientes sonoros complejos para las aves ya que las actividades antrópicas implican la emisión de ruidos que afectan la comunicación de muchas especies (Brumm 2004, Brumm y Slabbekoorn 2005). Cuando existe superposición en el espectro temporal y de frecuencia del ruido antropogénico con los sonidos de las aves, se produce un efecto de enmascaramiento que puede inhibir directamente la percepción de las señales acústicas emitidas por las aves (Gomes et al. 2022). Dado que la frecuencia del ruido antrópico ocurre entre 0–3 kHz alcanzando máximos de 8 kHz (McClure et al. 2013), muchas aves pueden resultar afectadas, particularmente aquellas que vocalizan a bajas frecuencias (e.g., aves de la familia Columbidae, Strigidae y algunos paseriformes) (Brumm y Slabbekoorn 2005, Slabbekoorn y den Boer-Visser 2006). Por otro lado, muchas aves realizan modificaciones en sus vocalizaciones para lograr mantener la comunicación sonora a pesar del ruido antrópico (e.g., aumento de frecuencia mínima, modificaciones en la duración de la sílaba) (Slabbekoorn y den Boer-Visser 2006, Slabbekoorn y Ripmeester 2008). Esto puede impactar en muchos procesos como la identificación de pares, la defensa territorial, los despliegues sexuales y el éxito reproductivo (Brumm 2004, Nemeth et al. 2013, Gil et al. 2015). Así, estos nuevos ecosistemas urbanos presentan desafíos a las aves que habitan allí e interesantes temáticas de investigación mediante el monitoreo acústico.

La bioacústica es el estudio del comportamiento de las señales sonoras producidas por los seres vivos y puede ser muy útil para realizar investigaciones sobre aves a diferentes escalas espacio-temporales (Snaddon et al. 2013, Sueur y Farina 2015). Por un lado, permite identificar y caracterizar los sonidos de las especies contribuyendo a determinar presencia/ausencia de individuos, distribución y algunos comportamientos (Baker y Logue 2007, Sebastián-González et al. 2015). Pero también, las investigaciones en bioacústica pueden orientarse a la ecología, estudiando poblaciones (e.g., abundancia, ocupación, movimientos migratorios) (Borker et al. 2014, Petrusková et al. 2016, Chambert et al. 2018), comunidades de especies (e.g., riqueza y diversidad) (Fontana et al. 2011, Wimmer et al. 2013) e incluso, paisajes sonoros (Pijanowski et al., 2011).

Dentro de la ecología acústica, el estudio de paisajes sonoros se enfoca en el análisis de los sonidos de los ecosistemas diferenciando sus componentes: la geofonía (i.e., aquel derivado de los elementos geológicos, como un arroyo o río), la biofonía (i.e., proveniente de los seres vivos) y la antropofonía (i.e., proveniente de las actividades antrópicas) (Pijanowski et al. 2011, Darras et al. 2016, Frommolt 2017). En este sentido, el monitoreo acústico es una herramienta reciente y con numerosas ventajas para desarrollar investigaciones en ambientes urbanos (Snaddon et al. 2013). Considerando el crecimiento de las urbanizaciones, los estudios de bioacústica asociados a la ecología urbana resultan particularmente interesantes y novedosos, a la vez que su uso está aumentando en todo el mundo (Brumm 2004, Nemeth et al. 2013, Gasc et al. 2017).

En particular, *el monitoreo acústico pasivo* (MAP, de aquí en adelante) utiliza grabadores autónomos que registran los sonidos ambientales, cuyos análisis posteriores permiten detectar la presencia de organismos a través de sus vocalizaciones y extraer diferente tipo de información (Blumstein et al. 2011, Shonfield y Bayne 2017, Sugai et al. 2019). Además, es importante destacar que el MAP es un método no invasivo y eficiente que permite obtener información de forma autónoma, continua, simultánea y en diversas condiciones ambientales (Laiolo 2010, Pérez-Granados y Schuchmann 2020). Así, permite llevar adelante investigaciones o monitoreos a gran escala y a largo plazo, reduciendo el esfuerzo de muestreo a campo y ayudando a la continuidad de proyectos de conservación (Laiolo 2010, Blumstein et al. 2011, Ribeiro et al. 2017). Por ejemplo, es útil para estimar riqueza de aves (Darras et al. 2018) así como densidad de aves a partir de las grabaciones

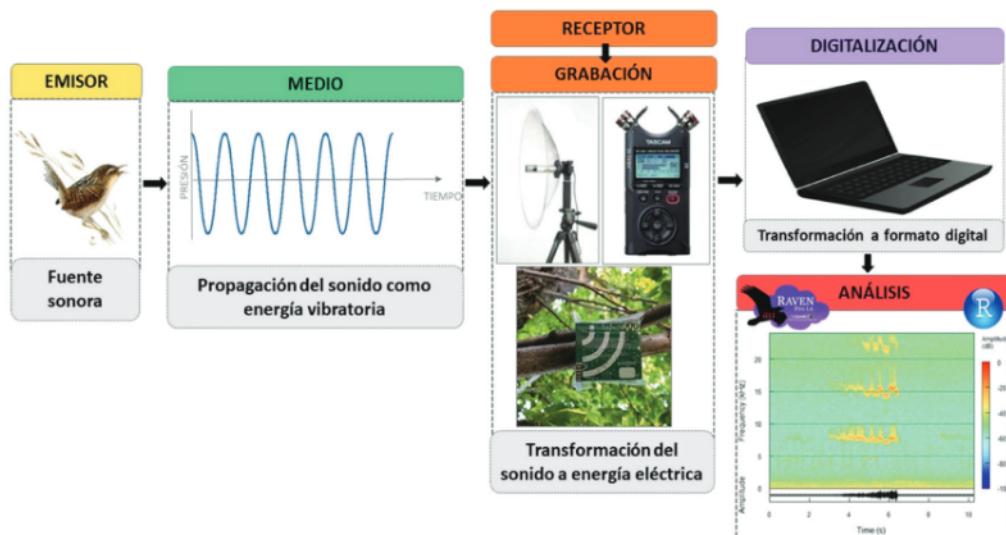
de sus vocalizaciones (Pérez-Granados y Traba 2021). El MAP es también una opción interesante para el estudio de especies crípticas (Lambert y McDonald 2014), especies de aves cuyo hábitat es de difícil acceso para el investigador o es lógicamente difícil detectar e identificar especies locales (e.g., bosques tropicales) (Borker et al. 2014), así como para estudiar comunidades compuestas por aves que vocalizan de manera amplia (i.e., organismos cuyas vocalizaciones varían según el sexo cantos compuestos por diferentes componentes como sílabas y/o frases) (Gil et al. 2015). En ambientes urbanos, el MAP permite desarrollar investigaciones asociadas a la distribución, el uso del espacio y la diversidad de aves (Chambert et al. 2018, Harding et al. 2019). De igual manera, es una herramienta muy valiosa para estudiar y monitorear eficientemente los impactos potenciales que las urbanizaciones pueden tener sobre las vocalizaciones de las aves y sus comportamientos a lo largo del tiempo (Wood y Yezerinac 2006, Hu y Cardoso 2010, Nemeth et al. 2013, Sayers II et al. 2019).

El uso del MAP para estudios ecológicos es relativamente reciente y ha crecido bastante en la última década asociado al desarrollo de nuevos hardwares y softwares que permiten almacenar y analizar grandes bases de datos provenientes de las grabaciones (Sugai et al. 2019). A pesar de que existen algunas investigaciones que utilizan el MAP como herramienta de estudio en países del Neotrópico (e.g. Deichmann et al. 2017, Pérez-Granados y Schuchmann 2020), la mayoría de ellas

aún se desarrollan en los países denominados como del Norte Global, y las publicaciones se realizan en inglés. Nuestro objetivo en este trabajo es presentar una ayuda metodológica sobre las potencialidades del MAP en investigaciones de aves basada en una revisión no sistemática de trabajos, y en nuestra propia experiencia, que incentive la utilización de esta herramienta en los estudios de ornitología urbana. Pondremos especial foco en la realización de estudios con aves que habitan ambientes urbanos y/o peri-urbanos. Primero presentaremos nociones básicas del sonido y del proceso de grabación. Luego presentaremos diferentes diseños de muestreo, programas de análisis e índices acústicos. Por último, daremos ejemplos de nuestras investigaciones de MAP en ambientes urbanos de la Patagonia.

## NOCIONES BÁSICAS DEL SONIDO Y DEL PROCESO DE GRABACIÓN

Los sensores acústicos utilizados en el MAP generalmente consisten en una combinación de un micrófono y un grabador diseñados para detectar y registrar los sonidos ambientales. El micrófono capta las señales generadas cuando las aves emiten sonidos, los cuales se propagan como energía vibratoria (ondas). Estas señales son transformadas a energía eléctrica a través del proceso de grabación para luego ser digitalizadas (i.e., transformar el sonido a un archivo de formato digital que luego puede ser analizado) (Fig. 1).



**Figura 1.** Descripción del proceso de grabación del sonido. El ave (emisor) es la fuente sonora. Su vocalización/sonido se desplaza en el medio en forma de ondas que son captadas por un receptor, que puede ser un micrófono o un grabador (con un micrófono interno). En esta etapa se produce la grabación, es decir, la transformación de la energía vibratoria a energía eléctrica. Una vez que el sonido es grabado, debe ser digitalizado, es decir, transformado a un formato digital (.wav, .mp3, .mp4, .flac). De esta manera, quedará disponible para realizar diferentes análisis bioacústicos con programas como Raven, Audacity o diferentes paquetes de R (ver Tabla 2).

## Micrófonos

La elección del micrófono dependerá del objetivo de estudio, de las características de cada micrófono y del ambiente en el cual se desarrolle el estudio. Aunque existen micrófonos más sensibles que otros, y con mayor radio de detección, la captación de los sonidos producidos por las aves depende de varios aspectos.

En principio, la detectabilidad de los micrófonos (i.e., capacidad de captar sonidos) está determinada por dos características: la sensitividad o patrón polar (i.e., capacidad de captar sonidos en una o más direcciones) y la respuesta de frecuencia (i.e., sensibilidad del micrófono dentro del espectro de frecuencias). Según su sensitividad, los micrófonos pueden ser direccionales u omnidireccionales. Los direccionales tienen mayor sensitividad en una dirección y son utilizados para caracterizar una vocalización o localizar individuos (e.g., Mendes et al. 2011, León et al. 2014). Mientras que, los omnidireccionales tienen igual sensitividad de captación de sonidos en todas las direcciones. En la actualidad, la mayoría de grabadores autónomos contienen micrófonos omnidireccionales que suelen ser utilizados en monitoreos poblacionales, estudios de comunidades y/o de paisajes sonoros (Pijanowski et al. 2011, Figueira et al. 2015, de Magalhães Tolentino et al. 2018). Según su respuesta de frecuencia, los micrófonos están diseñados para ser más sensibles en ciertas frecuencias de onda, por lo que la elección del micrófono dependerá de la frecuencia sonora de los organismos a estudiar. Para las aves, se necesitan micrófonos con una respuesta de frecuencia lo más uniforme posible (i.e., manteniendo en cada dirección la misma respuesta de frecuencia), configurada en el espectro audible (20-20 000 Hz) para alcanzar una adecuada detectabilidad de las aves.

Además de la sensitividad y respuesta de frecuencia propia de cada micrófono, la detectabilidad está influida por: las propiedades intrínsecas del sonido emitido por el ave (amplitud y frecuencia), los factores ambientales (e.g., lluvia, humedad, temperatura), y el paisaje (e.g., cobertura vegetal, relieve, infraestructuras) (Darras et al. 2016). En principio, dado que el sonido se propaga en el ambiente a través de ondas caracterizadas por cierta amplitud y frecuencia, comprender su comportamiento puede dar una aproximación de la distancia que recorre el sonido y a la cual podrá ser detectado por un micrófono. La amplitud describe el desplazamiento de una partícula con respecto al nivel de presión normal y se relaciona con

la cantidad de energía transmitida por las ondas (i.e., intensidad del sonido). A medida que las ondas viajan a lo largo del ambiente, la energía del sonido se disipa, las ondas se atenúan y la amplitud de las ondas disminuye (Bradbury y Vehrencamp 2011). Por tanto, las aves que vocalizan a mayores amplitudes pueden ser detectadas a mayor distancia que las que lo hacen a bajas amplitudes. Este comportamiento diferencial de las ondas sonoras también depende de la frecuencia. La frecuencia es el número de vibraciones completas por segundo que efectúa la fuente del sonido y que se transmite en las ondas, dicho de otra manera, es el número de ciclos completados por segundo y se mide en Hertz (Fig. 2). La mayoría de aves vocalizan en el rango de frecuencia de 1 a 6 kHz, aunque esto varía entre especies (Catchpole y Slater 2003). Aquellas que vocalizan a bajas frecuencias tienen una menor atenuación de sus señales sonoras que las que vocalizan a frecuencias mayores. Esto implica que, si dos especies de aves vocalizan a igual amplitud, pero con frecuencias diferentes, la especie que vocalice a menor frecuencia podrá ser detectada a mayor distancia (Bradbury y Vehrencamp 2011, Darras et al. 2016).

Paralelamente, las condiciones ambientales tanto climáticas (e.g., temperatura, presión y humedad) como de estructura del ecosistema afectan la distancia a la cual viajan las ondas sonoras. Hábitats boscosos, paisajes con acantilados y estructuras rocosas, así como ambientes urbanos, presentan una mayor disipación de las ondas sonoras disminuyendo así la detectabilidad de las aves (Darras et al. 2016, Priyadarshani et al. 2018). Comprender estos factores permite determinar una distancia aproximada a la cual se debería colocar los micrófonos o grabadores de la fuente de sonido para obtener mejores resultados.

Finalmente, según el objetivo de estudio, podemos optar por un micrófono externo o uno integrado al grabador. Para una buena calidad de sonido y caracterización de los mismos se recomienda uno externo, con posibilidad de aumentar la sensibilidad y la captación de sonidos. Para ello se suelen usar micrófonos muy precisos y accesorios que permiten aislar el sonido ante inclemencias del medio (Caycedo-Rosales et al. 2013). En cambio, en estudios a gran escala que requieren cubrir una gran superficie se necesitará colocar un gran número de grabadores, por lo que resultan más útiles aquellos dispositivos que tienen micrófono interno o integrado (Tabla 1). Estos tipos de micrófonos suelen ser más estables, tener resistencia al ruido mecánico y una buena res-



**Figura 2.** Representación de ondas sonoras de alta y baja frecuencia. Los ejemplos de aves son a modo representativo de algunas familias de aves que pueden tener dichas frecuencias en sus vocalizaciones (aunque hay variaciones entre especies de aves y entre organismos de la misma especie). También se puede observar la amplitud (a), que en este ejemplo es de igual magnitud en ambos casos. Para vocalizaciones con ondas sonoras de igual amplitud, aquellas que son de baja frecuencia recorren mayor distancia.

puesta de frecuencia. Sin embargo, son sensibles a la humedad por lo que aumenta la cantidad de ruidos a bajas frecuencias. La humedad y el viento suelen ser sonidos de bajas frecuencias que pueden dificultar la detección o la caracterización de los sonidos de las aves que vocalizan en estas mismas frecuencias (Darras et al. 2016). Además, cuando la fuente sonora se encuentra fuera del rango de detección de los micrófonos internos del grabador, puede ser necesario adicionar micrófonos externos unidireccionales y/o preamplificadores (i.e., accesorios utilizados para aumentar la ganancia o detectabilidad del micrófono por un factor de 50 a 60 dB o más). En este sentido, se debe ser cuidadoso al seleccionar los niveles de grabación y pre-amplificación dado que pueden generar ruidos y distorsiones al sonido (ver Rodríguez-Vargas y Perdomo-Velázquez 2014).

Por último, se debe prestar atención al deterioro de los micrófonos causada por el propio uso de los grabadores lo cual podría conducir a confusiones o errores en las detecciones de aves (Turgeon et al. 2017). Debe considerarse que cada programa para reconocer automáticamente señales de audio puede

ser afectado por el ruido generado por un micrófono o por una disminución de la sensibilidad (Turgeon et al. 2017). Si bien no hay un único criterio claro para determinar cuándo es necesario reemplazar un micrófono, es recomendable revisarlos ante cada nuevo muestreo y, en caso de ser posible, reemplazar aquellos que hayan disminuido su sensibilidad o estén fallando por algún motivo.

#### Grabadores y digitalización

Para la traducción del sonido a una señal eléctrica podemos optar por grabadores análogos o digitales. Los primeros suelen ser utilizados para registrar el sonido de un ave y analizar las características de las vocalizaciones en momentos puntuales en los cuales el investigador se encuentra en el sitio y coloca el grabador; por ejemplo, para estudiar si existen variaciones en el canto de un ave ante el ruido de un avión en determinado rango horario (Mendes et al. 2011, León et al. 2014). En cambio, los grabadores digitales son más usados para monitoreos acústicos (Tabla 1) (Figueira et al. 2015, de Magalhães Tolentino et al. 2018) ya que proveen varias ventajas: mayor tiempo de

registro de sonidos, la opción de pre-programar los períodos de grabación y la posibilidad de que los sonidos grabados queden disponibles inmediatamente para ser descargados en una computadora (Blumstein et al. 2011, Frommolt 2017, Sugai et al. 2020).

Previo a la grabación, los dispositivos deben ser configurados considerando tres aspectos fundamentales que determinarán una correcta digitalización: tasa de muestreo, resolución y tipo de archivo. La tasa de muestreo (*sampling rate*, en Inglés) es el número de muestras que van a tomarse de una señal sonora, está dada en Hz o kHz y define la mayor frecuencia capturada durante la grabación (Sueur 2018). Esto es fundamental ya que para poder recuperar con máxima fidelidad el sonido original, la tasa de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia fundamental del sonido que se va a registrar (Sueur 2018). Por ejemplo, si se configura una tasa de muestreo de 48 o 44.1 kHz (según lo que permita la configuración del grabador), capturará una frecuencia máxima aproximada de 22 kHz. Si bien la frecuencia más utilizada es 44 100 Hz (o 44.1 kHz), para ciertas especies que producen sonidos de bajas frecuencias se puede utilizar una tasa más baja como 22.05 kHz en especies de atajacaminos o búhos (Rempel et al. 2005, Goyette et al. 2011).

Otro aspecto a considerar es la resolución, es decir, el número de bits utilizados para almacenar cada muestra de una señal sonora y está relacionada con la frecuencia de muestreo. Cuanto mayor es la frecuencia de muestreo, habrá más muestras tomadas en cierto intervalo regular de tiempo y, por lo tanto, una mayor resolución. Una alta resolución implica una digitalización de la señal más fiel, es decir, que el sonido digitalizado será más parecido al sonido original (proveniente de la fuente sonora). Lo recomendado es generalmente 24 o 31 bits, aunque en aves se suele utilizar y es ampliamente aceptada una tasa de muestreo de 44 100 Hz digitalizada en 16 bits (Rempel et al. 2005). El último aspecto a tener en cuenta para aumentar la fidelidad con la cual la señal acústica se almacena digitalmente es el tipo de archivo usado. Las grabaciones pueden almacenarse en archivos comprimidos (.mp3, .mp4, .flac) o no comprimidos (.wav). Los primeros implican la pérdida de frecuencias por lo que es recomendable grabar en archivos .wav (Rempel et al. 2005).

## DISEÑOS DE MUESTREO

Uno de los desafíos del MAP es optimizar el esfuerzo de muestreo a través de la distribución espacial de los grabadores y de los períodos de grabación (Sugai et al. 2020).

### Distribución espacial de grabadores

El objetivo del estudio, área de muestreo y tipo de ambiente determinará la cantidad de grabadores necesarios y su distribución. Si el estudio tiene por objetivo describir la vocalización de una especie o evaluar la respuesta sonora de una especie ante un disturbio dado, se utilizan grabadores unidireccionales que permiten una buena calidad de grabación del sonido (Mendes et al. 2011, León et al. 2014). Estos dispositivos también son utilizados para localizar a los individuos a través de la llamada focal (*playback*) para luego poder realizar otros estudios aplicando el MAP (Ribeiro et al. 2017). En el caso de especies crípticas, que vocalizan poco, o que recorren grandes distancias será necesario colocar varios grabadores omnidireccionales aleatoriamente en su área potencial de ocupación (Lambert y McDonald 2014, Williams et al. 2018). Esto permitirá evaluar zonas de ocupación, uso del espacio y movimientos (Borker et al. 2014, Petrusková et al. 2016, Williams et al. 2018). En cambio, conociendo el área que ocupa la especie en estudio, el número de grabadores y su distribución en el espacio será más precisa (Sugai et al. 2020). Sabiendo el radio de detección de cada dispositivo, el tipo de ambiente y las frecuencias de vocalización de la especie en estudio, podemos tener un número estimativo de la cantidad de grabadores que deberíamos colocar (para más información ver Sugai et al. 2020).

En principio, el mismo fabricante puede brindar el radio de detección de cada dispositivo. Sin embargo, recordemos que éste varía mucho según el ambiente y el ave estudiada. Los ambientes urbanos suelen ser entornos sonoros complejos en donde las señales sonoras de las aves se pierden (dado que refractan con muchas estructuras), o se enmascaran por los sonidos antrópicos (Brumm y Slabbekoorn 2005). En ese caso, se deberá evaluar la colocación de más grabadores a menor distancia de la fuente sonora (Frommolt 2017, Sugai et al. 2020). Sin embargo, para especies que vocalizan a bajas frecuencias cuyas señales se propagan a mayor distancia, quizás esto no sea necesario. Un muestreo piloto que evalúe la distancia a la cual los grabadores logran captar las aves que serán el objetivo de estudio puede ayudar a dia-

gramar donde y cuántos grabadores son adecuados para cada investigación particular (Pérez-Granados et al. 2018).

Al realizar estudios a nivel de comunidad o de paisajes sonoros se colocan grabadores de acuerdo a la configuración espacial del área de muestreo y los factores ambientales descriptos anteriormente (Blumstein et al. 2011, Pijanowski et al. 2011). Si la investigación se desarrolla en un área de muestreo dividida en varios sitios a lo largo de un gradiente (e.g., gradiente de urbanización), o compuesta por diferentes tipos de hábitats (e.g., hábitats con cobertura vegetal diferente), se puede utilizar un grabador por sitio o por tipo de hábitat. Sin embargo, esto dependerá del tamaño de sitio, si es muy amplio se podrá dividir en parches en donde se coloque un grabador por parche. Todo esto permite considerar la heterogeneidad ambiental, o la influencia de factores de disturbio sobre poblaciones o comunidades de aves (Figueira et al. 2015, Sugai et al. 2020). Para estudiar poblaciones con bajas densidades, detectar especies particulares de una comunidad de aves o caracterizar la variación espacial en los paisajes sonoros, se recomienda el uso de varios grabadores por sitio (Frommolt 2017, Pérez-Granados et al. 2019). Lo mismo aplica para estudiar patrones de diversidad, modelos de ocupación o cambios de comportamiento de especies (Depraetere et al. 2012, Gil et al. 2015, Chambert et al. 2018). Finalmente se recomienda prestar atención al paisaje, y a otros factores ambientales que alteran la detectabilidad de las especies. Utilizar varios grabadores por sitio (e.g., dispuestos aleatoriamente) o a lo largo de transectas puede aumentar la detectabilidad de las especies (Munro et al. 2018). Es importante considerar que investigaciones con igual área de muestreo, pero diferente cobertura y composición vegetal (e.g., pastizales vs bosques) o urbanización (e.g., ciudades con o sin edificios), requerirán diferente cantidad de grabadores (Darras et al. 2016, Frommolt 2017). En este sentido, estudios en bosques y/o selvas o urbanizaciones muy edificadas requerirán mayor cantidad de grabadores que los que se utilizarían en una estepa, pastizal o monte de baja altura con igual área de muestreo. No obstante, es importante también considerar la ecología de las especies a estudiar (e.g., su área de acción, patrón comportamental de canto). Nuevamente, un muestreo piloto ayudará a determinar el número de grabadores necesarios (Pérez-Granados et al. 2018).

Si bien esto es lo recomendado, debemos considerar otras opciones en caso de no contar con el

equipo suficiente, algo que suele ser un factor limitante en proyectos financiados por y para el Neotrópico (Soares et al. 2022). Una posible solución es rotar los equipos entre sitios dentro de una misma área de muestreo. Esto permite aumentar el área de cobertura, pero se pierde la simultaneidad de los registros, o se pueden introducir sesgos en la probabilidad de detección debida a aspectos climáticos o por los días transcurridos entre las rotaciones (Gil et al. 2015, Ribeiro et al. 2017). Sin embargo, esto puede ser compensado con muestreos de mayor duración, con grabaciones en sitios donde se realizan puntos de conteo u observaciones visuales que complementen los registros de audio, o incluso, con ayuda ciudadana. La ciencia ciudadana se ha convertido en una herramienta fundamental en muchos proyectos de recolección de datos, ecología y conservación, y podrían ser de gran ayuda para complementar los estudios de bioacústica a gran escala (Newman et al. 2012).

### Períodos de grabación

Según el objetivo del estudio se puede grabar de manera continua durante 24 h o elegir períodos de grabación específicos a través de las funciones pre-programables que tienen los grabadores. Esto permite obtener grabaciones dentro de períodos de interés particular para el estudio, a la vez que reduce el consumo de batería y ocupa menos memoria.

Si el interés radica en detectar una especie críptica o estudiar la actividad temporal de un ave, entonces colocar grabadores durante las 24 hs o durante las horas que esa especie está vocalmente activa, puede ser fundamental. Sin embargo, la autonomía del equipo se agotará más rápido y requerirá mayor tarea de mantenimiento (Sugai et al. 2020). Una solución es colocarles baterías externas, que incluso pueden estar conectadas a paneles solares que las recargan (Aide et al. 2013). No obstante, es necesario considerar que grabar continuamente ocupa más espacio de almacenamiento. Este es un aspecto importante a considerar dado que, si bien una mayor cantidad de datos puede ser muy útil, la mayor demanda computacional y de tiempo de procesado y análisis de datos puede llevar a que los datos sean sub-utilizados. Una posible solución a la gran cantidad de datos obtenidos puede ser trabajar en colaboraciones con investigadores y/o técnicos interesados y formados en la temática, así como subir los datos a plataformas abiertas, de libre acceso, en donde el público pueda colaborar en la identificación de las aves.

**Tabla 1.** Equipamiento para realizar estudios en bioacústica. Principales micrófonos y grabadores disponibles tanto para el rango audible como ultrasónico. Se describen las características básicas y el sitio de Internet al que se puede acceder para obtener más información.

Compañía	Resumen de las características	Rango	Sitio Web
ARBIMON/Sieve-Analytics (Puerto Rico)	Hardware, software y herramientas de análisis de datos para el monitoreo acústico de la biodiversidad, incluida una plataforma de computación en la nube para almacenamiento y análisis de datos.	Audible	<a href="http://www.sieve-analytics.com/#!arbimon/cjg9">www.sieve-analytics.com/#!arbimon/cjg9</a>
AudioMoth (Reino Unido)	Grabador de código abierto, bajo costo, micrófono MEMs omnidireccional, archivos en formato .wav, almacenamiento micro SD. Hidrófonos.	Audible, Ultrasónico	<a href="https://www.openacousticdevices.info/">https://www.openacousticdevices.info/</a>
Dodotronic (Italia)	Diversos micrófonos: USB micrófonos, micrófonos análogos y parabólicos, grabadores, software disponible.	Audible, Ultrasónico	<a href="https://www.dodotronic.com">https://www.dodotronic.com</a>
Frontier Labs (Australia)	Grabadores con micrófonos omnidireccionales, unidad GPS integrada. Grabador portátil para conectar a un smartphone.	Audible	<a href="http://www.frontierlabs.com.au">www.frontierlabs.com.au</a>
Solo (Reino Unido)	Grabadores de código abierto y bajo costo. Graba en .wav	Audible	<a href="http://solo-system.github.io/home.html">http://solo-system.github.io/home.html</a>
SwiftOne (Estados Unidos)	Grabador de código abierto. Graba en .wav. Almacenamiento micro SD. Asociado a los Software Raven Lite/Raven Pro. Microfones ECM, externos (aunque fijos al grabador), omnidireccionales.	Audible	<a href="https://www.birds.cornell.edu/cb/swift-one/">https://www.birds.cornell.edu/cb/swift-one/</a>
Wildlife Acoustics (Estados Unidos)	Gran diversidad de grabadores, micrófonos, hidrófonos y programas de análisis.	Audible, Ultrasónico	<a href="http://www.wildlifeacoustics.com">www.wildlifeacoustics.com</a>

Por otro lado, para ahorrar espacio de almacenamiento y baterías, existen alternativas como programar la grabación para que se active solamente cuando se superan determinados umbrales de sonido o el uso de períodos prefijados de tiempo (Sugai et al. 2020). La configuración de los grabadores de activarse solo cuando el nivel de sonido alcanza cierto umbral es muy útil para el muestreo de especies con frecuencias particulares, como por ejemplo en murciélagos. Sin embargo, en el caso de las aves, aquellas que vocalizan en bajas frecuencias (e.g., palomas, búhos, atajacaminos) podrían no ser detectadas (Herrera 2002). De igual manera, al usar grabaciones activadas por umbral, algunos sonidos pueden perderse cuando son realizados desde distancias largas o en entornos ruidosos como lo son las ciudades (Sugai et al. 2020). Por esto, el uso de grabaciones activadas

por cierto umbral de sonido debe ser aplicado con precaución.

Para aumentar la autonomía de los grabadores de audio se pueden establecer períodos de grabación regulares, ya sea abarcando las 24 hs o concentrados en una determinada franja horaria. En este caso, los dispositivos se pueden configurar para que graben durante el amanecer y/o el atardecer, coincidiendo con el pico de actividad de las aves, o adecuarse con mayor precisión si se conocen los hábitos de las especies de estudio. La ventaja es que, aún con períodos de grabación y pausas cortos (e.g., 1 min grabación / 1 min de pausa, o 5 min / 5 min) se obtienen muestreros a lo largo del día, aumentando la autonomía de los grabadores. Esto permite realizar muestreros por períodos largos y tener buenas estimaciones de la diversidad

de aves, lo cual es importante si se quiere estudiar la composición de la comunidad, las tendencias poblacionales o el impacto de actividades antrópicas sobre las aves, entre otros (Browning et al. 2017).

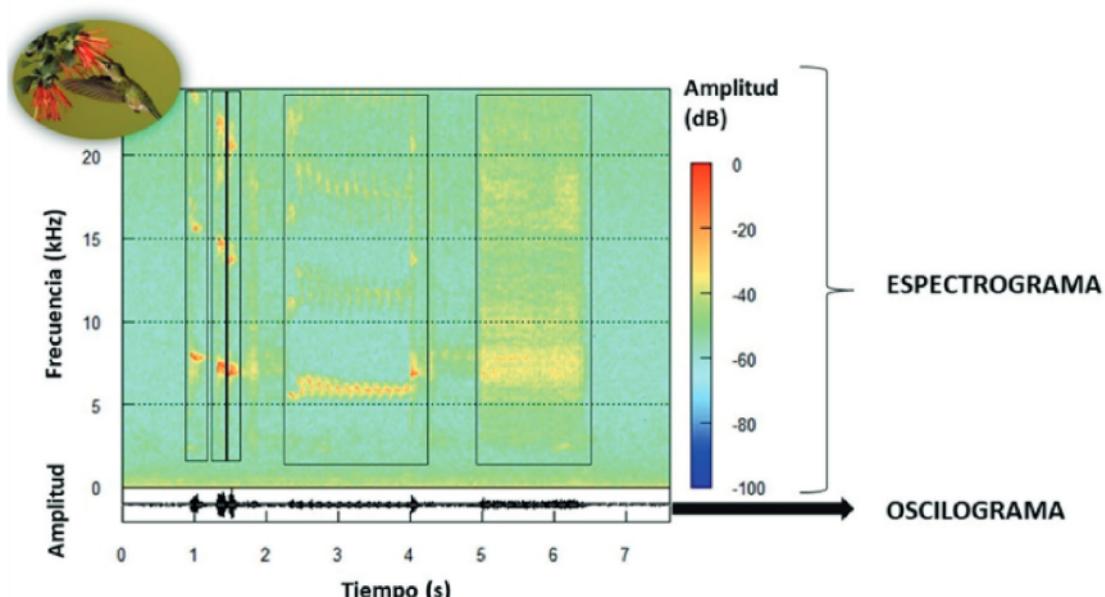
La duración de la batería también va a determinar la cantidad de días de grabación. Mientras mayor es el número de días, más fiable será la tasa de vocalización registrada, así como la probabilidad de detección de aves (Pérez-Granados et al. 2019). Esto mejorará el poder estadístico para detectar efectos significativos sobre tendencias temporales (Sugai et al. 2020, Wood et al. 2021). Sin embargo, esto no siempre es lineal y depende del objetivo de estudio. Además, se debe considerar que las baterías son sensibles al frío, agotándose más rápido cuando los muestreos se realizan en áreas frías que sean cálidas de día, pero posean amplitud térmica alta, o en zonas con grandes heladas. Para prolongar la duración de la batería y, también, proteger al grabador se pueden utilizar diferentes protecciones que suelen recomendar los mismos fabricantes, siempre y cuando éstas no afecten al micrófono.

Un muestreo piloto nos ayudará a evaluar cuales son los períodos de grabación que nos conviene para ese sitio y conocer la autonomía de cada grabador. Este muestreo es fundamental también para testear los dispositivos: evaluar si graban correctamente,

probar su colocación a distintas distancias de la fuente sonora para ver distancias máximas de registro y pre-programarlos para evaluar su autonomía. Además, es recomendable escuchar las grabaciones obtenidas para familiarizarnos con el ruido generado por el propio dispositivo y diferenciarlo del sonido ambiente o ruido de fondo. Esto último, nos permitirá decidir, en base en nuestro objetivo, si nos conviene o no colocar el grabador en un lugar que pueda presentar alto ruido local de fondo que implique que las grabaciones requieran un mayor trabajo de filtración durante el análisis (Pérez-Granados et al. 2018).

### ANÁLISIS DE GRABACIONES BIOACÚSTICAS

A partir de los archivos digitales se pueden realizar análisis temporales o espectrales de parámetros que definen los sonidos registrados mediante representaciones visuales de la señal acústica (Fig. 3). Para el análisis temporal de los parámetros, se utilizan los oscilogramas, los cuales representan variaciones en los patrones de amplitud o intensidad de la señal acústica con el transcurso del tiempo. Para el análisis de los parámetros espectrales se utilizan spectrogramas que permiten visualizar el componente espectral de la señal acústica y su variación en el tiempo. Estas representaciones pueden ser realizadas con programas como Audacity, Raven (o Raven Lite, en su



**Figura 3.** Representación de un spectrograma y oscilograma de un Picaflor Rubí (*Sephanoides sepianoides*). Los diferentes colores muestran los grados de intensidad del sonido, siendo los rojos aquellos con mayor intensidad. Los rectángulos representan las anotaciones que, en este caso, segmentan diferentes componentes del canto del picaflor.

**Tabla 2.** Resumen de los principales programas (softwares) y paquetes disponibles para el análisis de datos bioacústicos de aves.

Programas	Disponibilidad	Características	Página web
Audacity	Libre, código abierto	Uso general para escuchar audios, visualizar espectrogramas, crear subconjuntos y realizar anotaciones.	<a href="https://www.audacityteam.org/">https://www.audacityteam.org/</a>
AviSoft	Libre	Visualización de espectrogramas, anotaciones, correlaciones cruzadas de espectrogramas (clasificación automatizada), herramientas para georreferenciación y análisis de ruido.	<a href="http://www.avisoft.com/">http://www.avisoft.com/</a>
Kaleidoscope	Libre (versión LITE)	Herramientas para los análisis bioacústicos como visualizar y anotar archivos, clúster, clasificación automatizada, y herramientas particulares para murciélagos.	<a href="https://www.wildlifeacoustics.com/products/kaleidoscope">https://www.wildlifeacoustics.com/products/kaleidoscope</a>
Raven	Propiedad de Raven Pro, Libre (Raven Lite)	Visualización de espectrogramas, anotaciones, detección de llamadas y correlación de espectrogramas.	<a href="https://ravensoundsoftware.com/software/raven-pro/">https://ravensoundsoftware.com/software/raven-pro/</a>
Seewave	Paquete de R, libre y de código abierto	Visualización y anotación, análisis estadísticos y cálculo de índices acústicos.	<a href="https://rug.mnhn.fr/seewave/">https://rug.mnhn.fr/seewave/</a>
Song Scope	No hay versión libre, contactarse con el propietario	Visualización de espectrogramas con una escala temporal larga.	<a href="https://www.wildlifeacoustics.com/contact-us">https://www.wildlifeacoustics.com/contact-us</a>
Soundecology	Paquete de R, libre y de código abierto	Funciones para calcular índices de paisajes sonoros	<a href="https://cran.r-project.org/web/packages/soundecology/">https://cran.r-project.org/web/packages/soundecology/</a>
WarbleR	Paquete de R, libre y de código abierto	Visualización de espectrogramas, extracción de características, funciones de correlación cruzada y evaluación de la calidad de grabación.	<a href="https://cran.r-project.org/web/packages/warbleR/index.html">https://cran.r-project.org/web/packages/warbleR/index.html</a>

versión libre), AvisoSoft, Kaleidoscope Pro (e.g., Frommolt 2017, Kułaga y Budka 2019, Manzano-Rubio et al. 2022), o R/R Studio que ofrece paquetes como tuneR, SeeWave, Soundecology, WarbleR, entre otros (Sueur 2018). La mayoría de estos programas permiten, por ejemplo, visualizar espectrogramas, realizar anotaciones o correlacionar espectrogramas.

Las anotaciones o detecciones manuales se utilizan para registrar la ubicación dentro de la grabación de los intervalos de tiempo que contienen vocalizaciones de aves de interés. Esto es fundamental para luego caracterizar los sonidos, ver cómo se componen (e.g., nota, sílaba, frase, canto) y utilizar dichas ubicaciones para programar la detección automática de las especies. Sin embargo, cuando se trabaja con comunidades de aves, los softwares mencionados requieren un reconocedor de cada vocalización de las especies en estudio. Encontrar dichas vocalizaciones en las grabaciones insume mucho tiempo de escucha. En estos casos se puede recurrir a bibliotecas digitales con sus softwares que permiten identificar diferentes aves (e.g., BirdNET, ver Cole et al. 2022, Wood et al. 2022). Sin embargo, las vocalizaciones de las especies de interés deben estar disponibles en las bibliotecas, lo cual no siempre ocurre con las especies

del Neotrópico. A partir de los parámetros acústicos que caracterizan las vocalizaciones de las aves (e.g., frecuencia fundamental, cantidad de componentes del canto), se pueden realizar análisis estadísticos según el objetivo de estudio del trabajo con los programas estadísticos tradicionales. Alternativamente, se puede recurrir al cálculo de índices acústicos. Estos índices pueden ser realizados con Kaleidoscope o con R a través de sus diferentes paquetes (ver Sueur 2018 para más detalles).

Un índice acústico es una función matemática que calcula o describe las características espetrales y/o temporales, o la complejidad de un sonido grabado. Generalmente buscan relacionar estas características con la biodiversidad (e.g., riqueza), las características del hábitat y las condiciones ambientales (Depraetere et al. 2012, Sueur 2018, Alcocer et al. 2022). Los índices son buenas herramientas para el análisis rápido de grandes conjuntos de datos al reducir el esfuerzo y el error asociados a la clasificación de especies individuales. Sin embargo, la relación entre los índices y la biodiversidad no se comprende bien en todos los sistemas de estudio, por lo que se recomienda que los resultados obtenidos de las grabaciones sean verificados en campo

**Tabla 3.** Resumen de algunos índices acústicos con su descripción, ventajas/limitaciones, paquete R con el cual se puede calcular y literatura de referencia.

Índice acústico	Características	Ventajas/Limitaciones	Paquete de R	Literatura de referencia
Índice de complejidad acústica (ACI, ICA)	Describe el grado de complejidad de un espacio acústico a la vez que filtra la antropofonía. Esta complejidad se basa en el cálculo de la variabilidad de intensidades registradas en los audios.	Es indicado para utilizar en paisajes sonoros con una intensidad constante, pero no es recomendable en aquellos en donde una especie es vocalmente dominante	SeeWave	(Pieretti et al., 2011)
Índice de diversidad acústica (ADI, IDA)	Estima la diversidad de sonidos con la entropía de Shannon en franjas de frecuencia (bins). ADI se calcula con la ocupación de sonidos de cada banda de frecuencia.	Se debe tener especial cuidado con los sonidos de baja frecuencia, dado que pueden quedar solapados con lluvia y/o viento. Ambientes con alta diversidad de insectos pueden dar resultados no tan confiables.	Soundecology	(Villanueva-Rivera et al., 2011)
Índice de entropía acústica (H)	Calcula la homogeneidad/riqueza acústica de un espacio sonoro.	Se debe tener cuidado ya que la geofonía y antropofonía puede generar valores falsos. En hábitats templados donde la actividad acústica es mucho menor y el ruido de fondo debido al viento y a la lluvia tiene una amplitud alta, el índice H no es confiable.	SeeWave	(Sueur et al., 2008)
Índice de riqueza acústica (AR, RA)	Calcula la riqueza acústica de una comunidad en un espacio sonoro.	Es más fiable que el índice H en ambientes con baja diversidad.	SeeWave	(Depraetere et al., 2012)
Índice bioacústico	Mide la relación entre el ruido de fondo y las vocalizaciones de aves.	Puede parecer similar al ADI, sin embargo, los procesos metodológicos del análisis que utilizan son diferentes.	Soundecology	(Boelman et al., 2007)
Índice de la diferencia normalizada de paisajes sonoros (NDI, DNPS)	Estima el nivel de ruido antrógenico sobre el paisaje sonoro. Considera la biofonía, con un valor en la banda de biofonía 2 kHz a 8 kHz, y la antropofonía en la banda de 200 Hz a 1.5 kHz).	Los valores de las bandas de frecuencia para biofonía y antropofonía deben ser determinados según el paisaje sonoro en el cual se realice la investigación.	SeeWave	(Kasten et al., 2012)
Índice de disimilitud acústica (D)*	Estima la disimilitud o diferencia de la composición de dos comunidades.	Es un índice acústico de la categoría $\beta$ . Compara dos sonidos de la misma duración y frecuencia.	SeeWave	(Sueur et al., 2008)

\*Los índices acústicos pueden ser  $\alpha$  o  $\beta$ . Los primeros describen la diversidad dentro de un grupo y son útiles cuando se comparan los aspectos dentro de un mismo grupo. Por otro lado, los índices  $\beta$  describen la diversidad entre grupos diferentes y son útiles cuando se determina qué tan diferentes son las múltiples comunidades acústicas.

con otros métodos de investigación tradicionales como censos y/o puntos de conteo (Depraetere et al. 2012, Merchant et al. 2015). Existen diversos índices acústicos y la selección del índice adecuado varía según el objetivo de estudio; algunos buscan explicar patrones de diversidad, otros, efectos del ruido antrópico sobre la biodiversidad o la actividad acústica de la comunidad de aves (Tabla 3). En

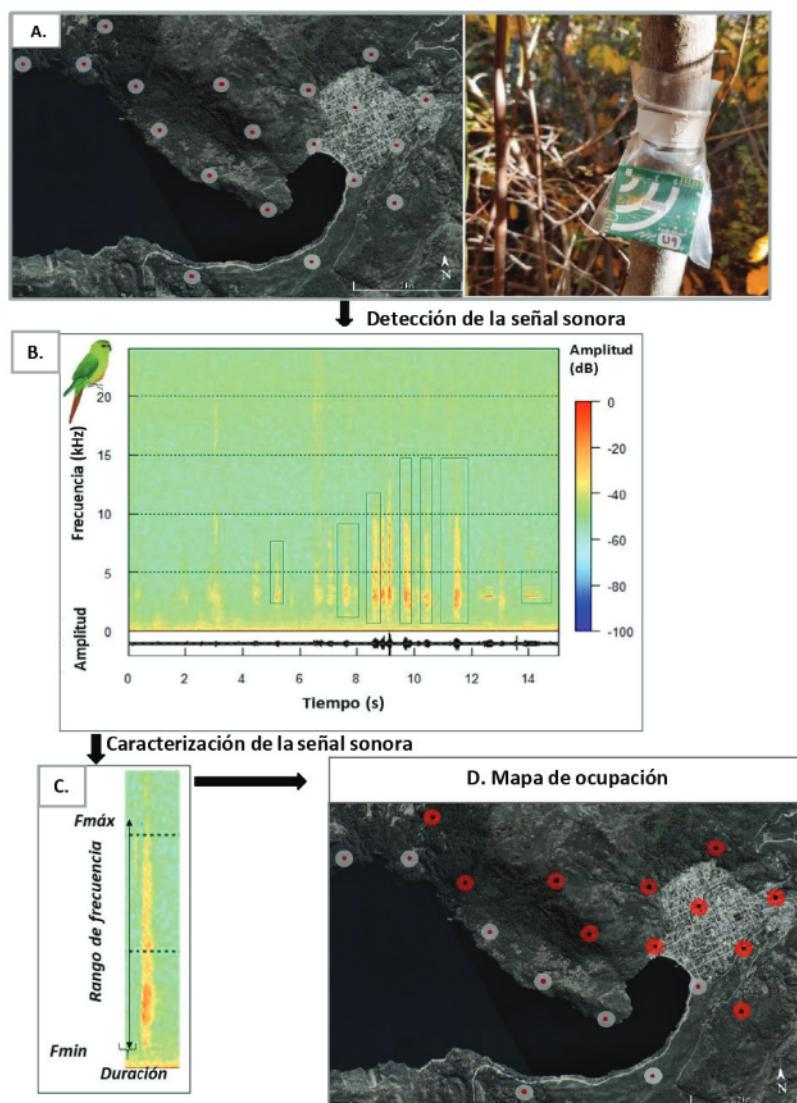
ambientes urbanos, la aplicación de índices que utilizan las medidas del nivel medio de presión sonora o la distribución de la energía sonora (e.g., índices de entropía acústica o de paisaje sonoro, ver Tabla 3), permiten cuantificar las características acústicas de los hábitats y ayudar a comprender cómo estas afectan la ecología y el comportamiento de las aves (Merchant et al. 2015).

## EJEMPLOS DE INVESTIGACIONES DE BIOACÚSTICA URBANA

### Caso de estudio 1: Cachañas en ambientes naturales y urbanos

Realizamos un trabajo de bioacústica estudiando la Cachaña (*Enicognathus ferrugineus*), una cotorra que habita en ambientes boscosos circundantes a la ciudad de Bariloche (Río Negro, Argentina). Nuestro objetivo fue determinar la presencia/ausencia de las cachañas en ambientes boscosos y urbanos, y asociar

la dinámica de uso del ambiente con la disponibilidad de alimento. En ambos ambientes trazamos transectas acorde al paisaje y colocamos grabadores AudioMoth v. 1.2.0 separados entre sí al menos por 2 km para evitar registrar los mismos individuos en más de un grabador al mismo tiempo. El radio de detección en nuestros sitios de estudio es menor a 1 km<sup>2</sup> dada la interferencia del bosque y los ambientes urbanizados, algo que evaluamos con muestreos preliminares. Para establecer cómo los grabadores detectaban a estas aves y decidir la distancia entre ellos tuvimos en cuenta que las cachañas vocalizan a bajas frecuencias y se mueven en



**Figura 4.** Representación del proceso de MAP. Para evaluar la presencia/ausencia de cachañas en ambientes naturales y urbanos colocamos grabadores AudioMoth v. 1.2.0. En la imagen A se muestran los sitios donde se colocaron grabadores (puntos rojos) y el rango de detección (borde gris). Los dispositivos realizaron la detección y grabación de los sonidos. Seleccionamos audios con vocalizaciones de cachañas, representamos los espectrogramas y en cada uno realizamos anotaciones (rectángulos, B). Luego caracterizamos cada señal sonora y anotación (C). A partir de cada anotación se realizaron las detecciones automáticas para determinar la presencia/ausencia de cachañas que pueden ser representadas en un mapa de ocupación (D). Los puntos negros con borde rojo representan un ejemplo de grabadores con presencia cachañas para ese muestreo.

bandadas lo que a priori nos facilita su detección. Otras aves de menor tamaño corporal, que vocalizan poco y/o en altas frecuencias suelen ser más difíciles de detectar, y esto debe ser considerado.

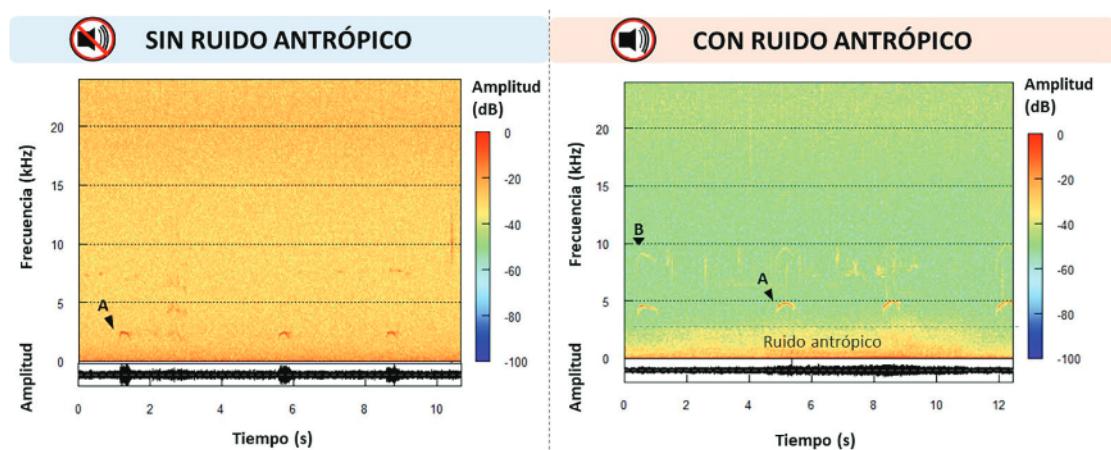
Adicionalmente, realizamos observaciones focales para disminuir la probabilidad de una interpretación errónea cuando las cachañas no eran registradas en los grabadores (i.e., una falsa ausencia). De esta manera abarcamos toda el área de muestreo complementando el uso de esas dos metodologías aumentando la fiabilidad de los datos. Una vez obtenidas las grabaciones, seleccionamos 60 audios que contenían vocalizaciones de cachañas y los procesamos en R. Allí visualizamos los espectrogramas, realizamos las anotaciones (i.e., marcamos en cada audio el momento en el cual una cachaña vocalizaba) y caracterizamos sus vocalizaciones. Esos audios seleccionados y sus anotaciones, nos permitieron formar una base de datos de sonidos de cachañas para realizar correlaciones de espectrogramas y así detectar automáticamente las cachañas en el resto de los audios obtenidos. Finalmente, los datos de presencia o ausencia de cachañas en cada ambiente pueden ser volcados en un mapa de ocupación y, en nuestro caso, relacionarlo con la disponibilidad de recurso alimenticio en cada ambiente (Fig. 4).

#### Caso de estudio 2: Aves del bosque Andino-patagónico y su relación con el ruido antrópico

Realizamos un estudio evaluando la respuesta sonora de diferentes aves del bosque Andino-Patagónico

ante los ruidos antrópicos (automóviles, aviones y helicópteros). Para esto, seleccionamos ambientes boscosos que rodean la ciudad de Bariloche, colocamos grabadores a lo largo de transectas paralelas a rutas y los programamos para que graben durante 20 días por mes durante un año, desde el amanecer hasta el atardecer con períodos de 1 min de grabación / 1 min de pausa, ahorrando batería para lograr un período largo de grabación. Además, establecer períodos regulares nos permitió grabar 6 h por cada día de muestreo repartidas equitativamente a lo largo de las horas luz. Finalmente, una vez obtenidos los archivos de sonido, realizamos espectrogramas de las vocalizaciones de las aves antes, durante y luego de un ruido antrópico (Fig. 5). En cada caso, evaluamos la respuesta sonora de las aves a través de la estimación de diferentes parámetros bioacústicos para cada vocalización (i.e., frecuencia mínima y frecuencia máxima, frecuencia dominante, duración del canto, duración de la pausa entre los elementos del canto). A través de análisis GLMM (Análisis de Modelos Lineales Generalizados Mixtos), comparamos los parámetros bioacústicos (i.e., nuestras variables respuesta) según el momento en el cual el ave se encontraba vocalizando (i.e., antes, durante y luego del disturbio) (Bahía et al. 2022). Sin embargo, los autores que utilicen esta metodología podrán elegir el análisis estadístico acorde a sus datos que permita responder su pregunta de investigación.

Las posibilidades de trabajo con esta herramienta son muchas y variadas. Con estos breves ejemplos solo queremos mostrar su potencial e incentivar a quienes



**Figura 5.** Representación de espectrogramas obtenidos a partir de un estudio de aves del bosque Andino-patagónico y su relación con el ruido antrópico (caso de estudio 2). Se comparan las vocalizaciones de un Fio-Fio Silbón (*Elaenia albiceps*) antes del disturbio antrópico y luego del mismo. Se puede observar un aumento de la frecuencia fundamental (A) cuando hay ruido antrópico, así como un aumento de la intensidad en el sonido del canto que se representa en la aparición de un 2do armónico (en frecuencia más alta) (B). A modo de aclaración se marca la banda de frecuencia correspondiente al ruido antrópico.

aún no se han acercado al mundo de la bioacústica a que la consideren cuando los objetivos de su trabajo lo ameriten.

### SUGERENCIAS PARA EL MONITOREO ACÚSTICO PASIVO

- Antes de salir al campo a colocar grabadores debemos: i) saber la frecuencia de vocalización de las aves con las cuales trabajaremos, ii) conocer los grabadores con los cuales trabajaremos y iii) analizar el área de muestreo (cómo es el paisaje, la cobertura y composición vegetal, potenciales ruidos, clima).
- Los grabadores deben configurarse para grabar en la frecuencia adecuada (en aves 44.1 kHz, aunque algunos grabadores automáticamente configuran a 48 kHz), con una frecuencia de muestreo de 16 bits. Esto es recomendado si no se conoce la frecuencia de vocalización de las aves en estudio o si se trabaja con comunidades de aves que vocalizan en rangos muy diferentes. Si se conoce la frecuencia de vocalización de la o las aves en estudio uno puede ajustar la tasa de muestreo para ahorrar batería y espacio de almacenamiento.
- Los archivos preferentemente deben ser almacenados en la extensión ".wav" debido a que son formatos no comprimidos, aunque hay otras extensiones disponibles (Tabla 1).
- Es importante realizar un muestreo piloto donde se compruebe el correcto funcionamiento de los grabadores, se conozca el ruido mecánico propio del micrófono de cada dispositivo y se evalúe diferentes distancias de detección sonora. De igual manera, este muestreo piloto nos permitirá saber la autonomía del dispositivo.
- Al momento de diseñar el muestreo debe considerarse la disposición espacial y la distancia a la fuente de sonido. Esto dependerá del área de muestreo, de las características del paisaje y del ambiente, y de la frecuencia de vocalización de las aves. En términos generales, cuanto más barreras tenga el ambiente a muestrear (e.g., infraestructuras en ambientes antrópicos o complejidad estructural en ambientes naturales), mayor será la dispersión de ondas de sonido y, probablemente, se deberá colocar un mayor número de grabadores. Sin embargo, un muestreo piloto es clave para evaluar la distancia a la cual colocar los grabadores entre sí y de la fuente de sonido.
- Si se quiere aumentar la autonomía del grabador es fundamental establecer períodos de grabación acorde a las necesidades mínimas para cumplir con los objetivos de la investigación. Si esta opción no es viable por nuestro objetivo de muestreo, hay que considerar que, si bien obtendremos muchos datos útiles, consumiremos más batería y más espacio de almacenamiento, y se requerirá un gran esfuerzo en análisis posteriores de esos datos. Posibles soluciones a este conflicto es el trabajo en colaboración y el uso de plataformas abiertas para subir los datos.
- Se debe proteger los grabadores de audio de la lluvia, el viento y posibles animales que puedan dañarlos.
- Es importante complementar las grabaciones con censos u otros muestreos presenciales, al menos para proyectos nuevos.
- Una vez descargados los audios, es recomendable tener más de una fuente de almacenamiento. Se recomienda usar las plataformas virtuales que brindan los propios softwares (e.g., Sieve-analytics, ver software de wildlifeacoustics) u otro medio de almacenamiento en la nube (e.g., Google Drive ).
- El primer paso al analizar los audios es a través de sus representaciones visuales, como los espectrogramas y oscilogramas, para poder así comenzar a clasificar las señales sonoras.
- Para análisis bioacústicos, los índices acústicos (ver Tabla 3) son una buena herramienta que permite analizar gran contenido de información y relacionar estas características con la biodiversidad y el hábitat. Sin embargo, deben ser usados con cautela, considerando las particularidades de cada ambiente y comunidad de aves en la cuales se desarrolla la investigación, debido a que factores como la humedad y el viento pueden dar falsos resultados o interpretaciones erróneas.
- Las bibliotecas o repositorios digitales (e.g., e-Bird) son muy útiles para la detección e identificación de diferentes especies de aves. Además, otras plataformas digitales, o aplicaciones como BirdNET, funcionan como softwares permitiendo

la detección y análisis de grandes cantidades de audios a través de algoritmos de machine learning, algo fundamental al trabajar con comunidades de aves. Sin embargo, eventualmente, hay que considerar que algunas especies de aves pueden no estar en las bases de datos.

## CONCLUSIÓN

El monitoreo acústico pasivo se ha convertido en una herramienta fundamental en las investigaciones de ornitología, dado que posee varias ventajas como ser un método no invasivo, poder detectar especies crípticas o permitir monitoreos a gran escala y a largo plazo. Sin embargo, también implica un desafío para quienes aplican estas nuevas tecnologías. Conocer aspectos básicos sobre el sonido, el proceso de grabación y el diseño de muestreo puede ayudar a optimizar una investigación que considere el uso de grabadores de audios. Esta es un área de estudio que se encuentra en franco crecimiento y desarrollo, sobre todo de la mano de nueva tecnología, costos más asequibles, y programas que permiten manejar y analizar la información de manera más amena y eficiente. Instamos a los ornitólogos neotropicales a considerar esta herramienta para el estudio de aves en ambientes complejos en cuanto a la factibilidad de hacer estudios intensivos en ellos, donde las posibilidades de observación de aves son limitadas o para monitoreos a largo plazo a un costo relativamente bajo.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a FONCYT PICT 2018-1623 y la Universidad Nacional del Comahue (proyecto 04/B227) por financiar este trabajo. También queremos agradecer a los tres revisores anónimos y al Editor Asociado por sus valiosos comentarios que han permitido mejorar este manuscrito.

## BIBLIOGRAFÍA CITADA

- AIDE TM, CORRADA-BRAVO C, CAMPOS-CERQUEIRA M, MILAN C, VEGA G Y ALVAREZ R (2013) Real-time bioacoustics monitoring and automated species identification. *PeerJ* 1:e103.
- ALCOCER I, LIMA H, SUGAI LSM Y LLUSIA D (2022). Acoustic indices as proxies for biodiversity: a meta-analysis. *Biological Reviews* 97:2209-2236.

- ARONSON MF, LA SORTE FA, NILON CH, KATTI M, GODDARD MA, LEPCZYK CA, WARREN PS, WILLIAMS NS, CILLIERS S Y CLARKSON B (2014) A global analysis of the impacts of urbanization on bird and plant diversity reveals key anthropogenic drivers. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 281:20133330.
- BAHIA R, LAMBERTUCCI SA, PLAZA PI Y SPEZIALE KL (2021) Antagonistic-mutualistic interaction between parrots and plants in the context of global change: Biological introductions and novel ecosystems. *Biological Conservation*, 109399.
- BAHIA R, SPEZIALE KL Y LAMBERTUCCI SA (2022) Sacar la voz: Tres especies de aves del Bosque Andino-Patagónico cambian sus vocalizaciones en respuesta al sonido antrópico. XIX Reunión Argentina de Ornitológia, Puerto Madryn. doi: 10.13140/RG.2.2.27591.78241
- BAKER MC Y LOGUE DM (2007) A comparison of three noise reduction procedures applied to bird vocal signals. *Journal of Field Ornithology* 78:240–253.
- BLUMSTEIN DT, MENNILL DJ, CLEMINS P, GIROD L, YAO K, PATRICELLI G, DEPPE JL, KRAKAUER AH, CLARK C Y CORTOPASSI KA (2011) Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus. *Journal of Applied Ecology* 48:758–767.
- BOELMAN NT, ASNER GP, HART PJ Y MARTIN RE (2007) Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing. *Ecological Applications* 17:2137–2144.
- BORKER AL, MCKOWN MW, ACKERMAN JT, EAGLES-SMITH CA, TERSHY BR Y CROLL DA (2014) Vocal activity as a low cost and scalable index of seabird colony size. *Conservation Biology* 28: 1100–1108.
- BRADBURY J Y VEHRENCAMP S (2011) Principles of animal communication, 2nd edn Sunderland. MA: Sinauer Associates.
- BROWNING E, GIBB R, GLOVER-KAPPER P Y JONES KE (2017) Passive acoustic monitoring in ecology and conservation. 76pp. WWF Conservation Technology Series 1(2).
- BRUMM H (2004) The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird. *Journal of Animal Ecology*, 434–440.
- BRUMM H Y SLABBEKOORN H (2005) Acoustic communication in noise. *Advances in the Study of Behavior* 35:151–209.
- CATCHPOLE CK Y SLATER PJ (2003) *Bird song: biological themes and variations*. Cambridge University press.
- CAYCEDO-ROMALES PC, RUIZ-MUÑOZ JF Y OROZCO-ALZATE M (2013) Reconocimiento automatizado de señales bioacústicas: Una revisión de métodos y aplicaciones. *Ingierencia y Ciencia* 9:171–195.

- CHACE JF Y WALSH JJ (2006) Urban effects on native avifauna: a review. *Landscape and Urban Planning* 74:46–69.
- CHAMBERT T, WADDLE JH, MILLER DA, WALLS SC Y NICHOLS JD (2018) A new framework for analysing automated acoustic species detection data: Occupancy estimation and optimization of recordings post-processing. *Methods in Ecology and Evolution* 9:560–570.
- COLE JS, MICHEL NL, EMERSON SA Y SIEGEL RB (2022) Automated bird sound classifications of long-duration recordings produce occupancy model outputs similar to manually annotated data. *Ornithological Applications* 124:duac003.
- DARRAS K, FURNAS B, FITRIAWAN I, MULYANI Y Y TSCHARNTKE T (2018) Estimating bird detection distances in sound recordings for standardizing detection ranges and distance sampling. *Methods in Ecology and Evolution* 9:1928–1938.
- DARRAS K, PÜTZ P, REMBOLD K Y TSCHARNTKE T (2016) Measuring sound detection spaces for acoustic animal sampling and monitoring. *Biological Conservation* 201:29–37.
- DEICHMANN JL, HERNÁNDEZ-SERNA A, CAMPOS-CERQUEIRA M Y AIDE TM (2017) Soundscape analysis and acoustic monitoring document impacts of natural gas exploration on biodiversity in a tropical forest. *Ecological Indicators* 74:39–48.
- DEPRAETERE M, PAVOINE S, JIGUET F, GASC A, DUVAIL S Y SUEUR J (2012) Monitoring animal diversity using acoustic indices: implementation in a temperate woodland. *Ecological Indicators* 13:46–54.
- ELIZALDE L Y LAMBERTUCCI SA (2022) Private gardens in a town immersed in a National Park: Potential for conservation and highly valued under COVID lockdown. *Landscape and Urban Planning* 226:104481.
- FIGUEIRA L, TELLA JL, CAMARGO UM Y FERRAZ G (2015) Autonomous sound monitoring shows higher use of Amazon old growth than secondary forest by parrots. *Biological Conservation* 184:27–35.
- FISCHER JD, SCHNEIDER SC, AHLERS AA Y MILLER JR (2015) Categorizing wildlife responses to urbanization and conservation implications of terminology. *Conservation Biology* 29:1246–1248.
- FONTANA CS, BURGER MI Y MAGNUSSON WE (2011) Bird diversity in a subtropical South-American City: effects of noise levels, arborisation and human population density. *Urban Ecosystems* 14:341–360.
- FROMMOLT K-H (2017) Information obtained from long-term acoustic recordings: applying bioacoustic techniques for monitoring wetland birds during breeding season. *Journal of Ornithology* 158:659–668.
- GARAFFA PI, FILLOY J Y BELLOCQ MI (2009) Bird community responses along urban–rural gradients: does the size of the urbanized area matter? *Landscape and Urban Planning* 90:33–41.
- GASC A, FRANCOMANO D, DUNNING JB Y PIJANOWSKI BC (2017) Future directions for soundscape ecology: The importance of ornithological contributions. *The Auk: Ornithological Advances* 134:215–228.
- GIL D Y BRUMM H (2014) *Avian urban ecology*. Oxford University Press.
- GIL D, HONARMAND M, PASCUAL J, PÉREZ-MENA E Y MACÍAS GARCÍA C (2015) Birds living near airports advance their dawn chorus and reduce overlap with aircraft noise. *Behavioral Ecology* 26:435–443.
- GODDARD MA, IKIN K Y LERMAN SB (2017). Ecological and social factors determining the diversity of birds in residential yards and gardens. Pp: 371-397. In: *Ecology and conservation of birds in urban environments*. Springer, Cham.
- GOMES L, SOLÉ M, SOUSA-LIMA RS Y BAUMGARTEN JE (2022) influence of anthropogenic sounds on insect, anuran and bird acoustic signals: A Meta-Analysis. *Frontiers in Ecology and Evolution* 10:827440.
- GONÇALVES SF, DE PAULA LOURENCO AC, DE SOUSA BUENO FILHO JS Y DE TOLEDO MCB (2021) Characteristics of residential backyards that contribute to conservation and diversity of urban birds: A case study in a Southeastern Brazilian city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 61:127095.
- GOYTET JL, HOWE RW, WOLF AT Y ROBINSON WD (2011) Detecting tropical nocturnal birds using automated audio recordings. *Journal of Field Ornithology* 82:279–287.
- HANSEN AJ, KNIGHT RL, MARZLUFF JM, POWELL S, BROWN K, GUDE PH Y JONES K (2005) Effects of exurban development on biodiversity: patterns, mechanisms, and research needs. *Ecological Applications* 15:1893–1905.
- HARDING HR, GORDON TA, EASTCOTT E, SIMPSON SD Y RADFORD AN (2019) Causes and consequences of intraspecific variation in animal responses to anthropogenic noise. *Behavioral Ecology* 30:1501–1511.
- HERRERA F (2002) Ecolocalización en guácharos: volando en la oscuridad. *Boletín de la sociedad Venezolana de Espeleología* 36:6–10.
- HU Y Y CARDOSO GC (2010) Which birds adjust the frequency of vocalizations in urban noise? *Animal Behaviour* 79:863–867.
- KASTEN EP, GAGE SH, FOX J Y JOO W (2012) The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: An archive for studying soundscape ecology. *Ecological informatics* 12:50–67.
- KOWARIK I (2011) Novel urban ecosystems, biodiversity, and conservation. *Environmental Pollution* 159:1974–1983.

- KUŁAGA K Y BUDKA M (2019) Bird species detection by an observer and an autonomous sound recorder in two different environments: Forest and farmland. *PLoS One* 14:e0211970.
- LAILO P (2010) The emerging significance of bioacoustics in animal species conservation. *Biological Conservation* 143:1635–1645.
- LAMBERT KT Y McDONALD PG (2014) A low-cost, yet simple and highly repeatable system for acoustically surveying cryptic species. *Austral Ecology* 39:779–785.
- LEÓN E, BELTZER A Y QUIROGA M (2014) El jilguero dorado (*Sicalis flaveola*) modifica la estructura de sus vocalizaciones para adaptarse a hábitats urbanos. *Revista mexicana de Biodiversidad* 85:546–552.
- DE MAGALHÃES TOLENTINO VC, BAESSE CQ Y DE MELO C (2018) Dominant frequency of songs in tropical bird species is higher in sites with high noise pollution. *Environmental Pollution* 235:983–992.
- MANZANO R, BOTA G, BROTONS L, SOTO-LARGO E Y PÉREZ-GRANADOS C (2022) Low-cost open-source recorders and ready-to-use machine learning approaches provide effective monitoring of threatened species. *Ecological Informatics* 101910.
- MCCLURE CJ, WARE HE, CARLISLE J, KALTENECKER G Y BARBER JR (2013) An experimental investigation into the effects of traffic noise on distributions of birds: avoiding the phantom road. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 280:20132290.
- MENDES S, COLINO-RABANAL VJ Y PERIS SJ (2011) Diferencias en el canto de la ratona común (*Troglodytes musculus*) en ambientes con distintos niveles de influencia humana. *Hornero* 26:85–93.
- MERCHANT ND, FRISTRUP KM, JOHNSON MP, TYACK PL, WITT MJ, BLONDEL P Y PARKS SE (2015) Measuring acoustic habitats. *Methods in Ecology and Evolution* 6:257–265.
- MUNRO J, WILLIAMSON I Y FULLER S (2018) Traffic noise impacts on urban forest soundscapes in south-eastern Australia. *Austral Ecology* 43:180–190.
- NEMETH E, PIERETTI N, ZOLLINGER SA, GEBERZAHN N, PARTECKE J, MIRANDA AC Y BRUMM H (2013) Bird song and anthropogenic noise: vocal constraints may explain why birds sing higher-frequency songs in cities. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 280: 20122798.
- NEWMAN G, WIGGINS A, CRALL A, GRAHAM E, NEWMAN S Y CROWSTON K (2012) The future of citizen science: emerging technologies and shifting paradigms. *Frontiers in Ecology and the Environment* 10:298–304.
- PÉREZ-GRANADOS C, BOTA G, GIRALT D Y TRABA J (2018) A cost-effective protocol for monitoring birds using autonomous recording units: a case study with a night-time singing passerine. *Bird study* 65:338–345.
- PÉREZ-GRANADOS C, GÓMEZ-CATASÚS J, BUSTILLO-DE LA ROSA D, BARRERO A, REVERTER M Y TRABA J (2019) Effort needed to accurately estimate Vocal Activity Rate index using acoustic monitoring: A case study with a dawn-time singing passerine. *Ecological Indicators* 107:105608.
- PÉREZ-GRANADOS C Y SCHUCHMANN K-L (2020) Monitoring the annual vocal activity of two enigmatic nocturnal Neotropical birds: the Common Potoo (*Nyctibius griseus*) and the Great Potoo (*Nyctibius grandis*). *Journal of Ornithology* 161:1129–1141.
- PÉREZ-GRANADOS C Y TRABA J (2021) Estimating bird density using passive acoustic monitoring: a review of methods and suggestions for further research. *Ibis* 163:765–783.
- PETRUSKOVÁ T, PIŠVEJCOVÁ I, KINŠTOVÁ A, BRINKE T Y PETRUŠEK A (2016) Repertoire-based individual acoustic monitoring of a migratory passerine bird with complex song as an efficient tool for tracking territorial dynamics and annual return rates. *Methods in Ecology and Evolution* 7:274–284.
- PIERETTI N, FARINA A Y MORRI D (2011) A new methodology to infer the singing activity of an avian community: the Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecological Indicators* 11:868–873.
- PIJANOWSKI BC, FARINA A, GAGE SH, DUMYAHN SL Y KRAUSE BL (2011) What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecology* 26:1213–1232.
- PRIYADARSHANI N, CASTRO I Y MARSLAND S (2018) The impact of environmental factors in birdsong acquisition using automated recorders. *Ecology and Evolution* 8:5016–5033.
- REMPEL RS, HOBSON KA, HOLBORN G, VAN WILGENBURG SL Y ELLIOTT J (2005) Bioacoustic monitoring of forest songbirds: interpreter variability and effects of configuration and digital processing methods in the laboratory. *Journal of Field Ornithology* 76:1–11.
- RIBEIRO JW, SUGAI LSM Y CAMPOS-CERQUEIRA M (2017) Passive acoustic monitoring as a complementary strategy to assess biodiversity in the Brazilian Amazonia. *Biodiversity and Conservation* 26:2999–3002.
- RODRÍGUEZ-VARGAS RR Y PERDOMO-VELÁZQUEZ H (2014) Tecnología para captar el sonido: Una comparación de los micrófonos utilizados en bioacústica. *Quehacer Científico en Chiapas* 9:34–47.
- SAYERS II C, MORELAND C, MORGAN H Y AREVALO JE (2019) Efecto de corto plazo del ruido por tráfico sobre coros de aves en un bosque nuboso neotropical. *Zelodonias* 23(2):8–28.

- SEBASTIÁN-GONZÁLEZ E, PANG-CHING J, BARBOSA, JM Y HART P (2015) Bioacoustics for species management: two case studies with a Hawaiian forest bird. *Ecology and evolution* 5:4696–4705.
- SHONFIELD J Y BAYNE E (2017) Autonomous recording units in avian ecological research: current use and future applications. *Avian Conservation and Ecology* 12.
- SLABBEKOORN H Y DEN BOER-VISSEN A (2006) Cities change the songs of birds. *Current Biology* 16:2326–2331.
- SLABBEKOORN H Y RIPMEESTER EAP (2008) Birdsong and anthropogenic noise: implications and applications for conservation. *Molecular Ecology* 17:72–83.
- SNADDON J, PETROKOFSKY G, JEPSON P Y WILLIS KJ (2013) Biodiversity technologies: tools as change agents. *Biology Letter* 9: 20121029.
- SOARES L, COCKLE K, INZUNZA ER, IEARRA JT, MIÑO CI, ZULUAGA S, BONACORSO E, RÍOS-ORJUELA JC, MONTANO-CENTELLAS FA, FREILE JF, ET AL. (2023) Neotropical Ornithology: Reckoning with historical assumptions, removing systemic barriers, and reimagining the future. *Ornithological Applications*. <https://doi.org/10.1093/ornithapp/duac046>
- SUEUR J (2018) Sound analysis and synthesis with R. Springer Cham.
- SUEUR J, AUBIN T Y SIMONIS C (2008) Seewave, a free modular tool for sound analysis and synthesis. *Bioacoustics* 18:213–226.
- SUEUR J Y FARINA A (2015) Ecoacoustics: the ecological investigation and interpretation of environmental sound. *Biosemiotics* 8:493–502.
- SUGAI LSM, DESJONQUERES C, SILVA TSF Y LLUSIA D (2020) A roadmap for survey designs in terrestrial acoustic monitoring. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 6:220–235.
- SUGAI LSM, SILVA TSF, RIBEIRO JR JW Y LLUSIA D (2019) Terrestrial passive acoustic monitoring: review and perspectives. *BioScience* 69:15–25.
- TURGEON P, VAN WILGENBURG S Y DRAKE K (2017) Microphone variability and degradation: implications for monitoring programs employing autonomous recording units. *Avian Conservation and Ecology* 12.
- VILLANUEVA-RIVERA LJ, PIJANOWSKI BC, DOUCETTE J Y PEKIN B (2011) A primer of acoustic analysis for landscape ecologists. *Landscape Ecology* 26:1233–1246.
- WILLIAMS EM, O'DONNELL CF Y ARMSTRONG DP (2018) Cost-benefit analysis of acoustic recorders as a solution to sampling challenges experienced monitoring cryptic species. *Ecology and Evolution* 8:6839–6848.
- WIMMER, J, TOWSEY M, ROE P Y WILLIAMSON I (2013) Sampling environmental acoustic recordings to determine bird species richness. *Ecological Applications* 23:1419–1428.
- WOOD CM, KAHL S, CHAON P, PEERY MZ Y KLINCK H (2021) Survey coverage, recording duration and community composition affect observed species richness in passive acoustic surveys. *Methods in Ecology and Evolution* 12:885–896.
- WOOD CM, KAHL S, RAHAMAN A Y KLINCK H (2022) The machine learning-powered BirdNET App reduces barriers to global bird research by enabling citizen science participation. *PLoS Biology* 20:e3001670.
- WOOD WE Y YEZERINAC SM (2006) Song Sparrow (*Melospiza melodia*) song varies with urban noise. *The Auk* 123:650–659.