



**Descripción y caracterización de las llamadas de ecolocalización de murciélagos
insectívoros en tres localidades de Antioquia**

Melisa Andrea Castro Marín

Trabajo presentado para optar al título de bióloga

Sergio Solari Torres
Asesor

Leidy L. López Sepúlveda
Coasesor

Universidad de Antioquia
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Biología
El Carmen de Viboral, Antioquia, Colombia
2022

Cita	(Castro-Marín et al., 2022)
Referencia	Castro Marín, M. A., López Sepúlveda, L.L. & Solari Torres, S.A. (2022). <i>Descripción y caracterización de las llamadas de ecolocalización de murciélagos insectívoros en tres localidades de Antioquia</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, El Carmen de Viboral, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Biblioteca Seccional Oriente (El Carmen de Viboral)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/director: Adriana Echeverry Isaza

Jefe departamento: Ana Esperanza ranco Molano.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Descripción y caracterización de las llamadas de ecolocalización de murciélagos insectívoros en tres localidades de Antioquia

Melisa Castro-Marín^{1,3}, Leidy L. López Sepúlveda^{1,4}, Sergio Solari^{1,2,5}

¹Grupo Mastozoología, Universidad de Antioquia

²Instituto de Biología, Universidad de Antioquia. Medellín (Antioquia), Colombia

Correos electrónicos

³melisa.castro@udea.edu.co, ⁴leidy.lopezs@udea.edu.co, ⁵sergio.solari@udea.edu.co,

Número de páginas: 26; **Número de figuras:** 7; **Número de figuras suplementarias:** 0; **Número de tablas:** 5; **Número de palabras:** 6660; **Resumen:** 241; **Introducción:** 533; **Discusión:** 848.

Abreviatura: Duración: Dr; Frecuencia inicial: FS; Frecuencia final: FE; Frecuencia máxima: Fmax; Frecuencia mínima: Fmin; Frecuencia media: Fmean; Frecuencia de máxima energía: FME; Ancho de Banda: AB; Pulso bajo: FB; Pulso medio: FM; Pulso alto: FA; Frecuencia modulada: FM; Frecuencia constante: FC; Frecuencia cuasi constante: FQC.

Declaración de significancia: Al registrar nuevas llamadas de ecolocalización de murciélagos insectívoros en tres municipios de Antioquia se puede contribuir a la consolidación de datos acústicos para la construcción de una colección acústica pública para nuestro país. Considerando que, Colombia, aún no cuenta con una biblioteca de referencia para la identificación de murciélagos, así pues, este trabajo de grado sería un aporte muy valioso para futuros estudios de diversidad, abundancia y ecología de murciélagos neotropicales.

Resumen

Las metodologías implementadas para la caracterización de las comunidades de murciélagos involucran metodologías enfocadas en especies que forrajea cerca al suelo, mientras que, aquellas que presentan un vuelo en estratos superiores generalmente son nula o escasamente

detectadas. Muchas de estas especies usualmente utilizan señales de ecolocalización especializadas que son emitidas para orientarse en vuelo y capturar presas, es decir que son mayormente insectívoras (o artropodófagas). Debido a estas limitaciones, la implementación de metodologías complementarias a los muestreos tradicionales, como el monitoreo acústico, permite detectar especies de estos murciélagos insectívoros con mayor precisión. En este trabajo, caracterizamos, identificamos y describimos las llamadas de ecolocalización de murciélagos insectívoros presentes en tres municipios del departamento de Antioquia, mediante monitoreo pasivo y activo. Se analizaron 403 grabaciones acústicas, que corresponde a 234 registros que se encuentran agrupados en 15 especies y 3 sonotipos, que pertenecen a cuatro familias y ocho géneros. La comunidad de murciélagos caracterizada en este estudio representa el 8% de la diversidad total para el país y el 15% de la registrada para el departamento; así mismo, esta diversidad representa el 21% de la comunidad de murciélagos insectívoros del país, y el 34% de la del departamento. Por lo tanto, este trabajo constituye una aproximación metodológica a la caracterización acústica de los murciélagos insectívoros a partir del uso de metodologías acústicas (pasiva o activa) con un software abierto, libre y fácil de usar, accesible a cualquier investigador que desee implementar estas metodologías.

Palabras clave: Ecolocalización, Murciélagos insectívoros, Caracterización, Monitoreo acústico.

Introducción

Los murciélagos son el segundo grupo de mamíferos con mayor diversidad en términos ecológicos y taxonómicos (Thomas H. Kunz & Fenton, 2005; Solari et al., 2019) Actualmente existen más de 1.400 especies a nivel mundial (Burgin et al., 2018; Mammal Diversity Database, 2022) siendo Colombia el segundo país con mayor diversidad de murciélagos en el mundo, con 217 especies registradas (Ramírez-Chaves et al., 2021). El departamento de Antioquia a su vez, presenta una diversidad de 120 especies (Cuartas-Calle & Muñoz-Arango, 2003; Solari et al., 2013). Los murciélagos resaltan como indicadores del estado de los ecosistemas, debido a su sensibilidad ante los efectos de la perturbación antrópica como el uso de suelo y la fragmentación (Fenton et al., 1999; Galindo-González, 1998; Gorresen & Willig, 2004; Jones et al., 2009). Adicionalmente, proporcionan servicios ecosistémicos y de salud al ser humano, como el control biológico de plagas, alimentándose de gran variedad de insectos y artrópodos (Boyles et al., 2011; Kalka et al., 2008; Kunz et al., 2011).

En la actualidad, las metodologías implementadas para la caracterización de las comunidades de murciélagos involucran, principalmente, redes de niebla o trampas arpa (MacSwiney et al., 2008), las cuales están muy limitadas a especies que vuelan y/o forrajean cerca del suelo, pertenecientes a la familia Phyllostomidae, que es la familia más diversa del Neotrópico, en términos ecológicos y taxonómicos (Mantilla-Meluk, 2009; Ramírez-Chaves et al., 2021) Por lo tanto, los murciélagos que presentan un vuelo en estratos superiores, con un forrajeo principalmente de presas en movimiento (insectos y algunos vertebrados), que representan aproximadamente el 40% de la diversidad de los murciélagos del país, generalmente no son detectados (Jung et al., 2014; Jung & Kalko, 2011a). Estas especies usualmente utilizan

señales de ecolocación especializadas que son emitidas para orientarse en vuelo, cazar y capturar presas (Arita & Fenton, 1997; Kalko et al., 2008).

Debido a estas limitaciones para realizar inventarios y caracterizaciones de estas especies, en los últimos años se han desarrollado metodologías complementarias a los muestreos tradicionales que permiten detectar especies de murciélagos insectívoros (Gregorin et al., 2022). Estas metodologías incluyen monitoreos acústicos, los cuales permiten, a partir de la detección de señales de ecolocación o vocalizaciones de los individuos, identificar algunas especies a partir de parámetros acústicos seleccionados, como duración de la llamada y/pulso, frecuencias, estructura del pulso, entre otros, en comparación con bibliografía disponible y bibliotecas acústicas construidas a partir de grabaciones de referencia (grabaciones a individuos capturados) (Martínez-Medina et al., 2021; Schnitzler & Kalko, 2001; Zamora-Gutierrez et al., 2020; Zurc et al., 2017). Adicionalmente, es posible estudiar diferentes aspectos de la historia natural de las especies cómo la preferencia de hábitat, ambiente de forrajeo y caza, patrones sociales, entre otros (Gessinger et al., 2019).

Por esta razón, se hace importante implementar las metodologías acústicas dentro de las caracterizaciones de las comunidades de murciélagos, que permiten detectar especies insectívoras en los muestreos y de esta manera se puedan generar aproximaciones más precisas a la comunidad de murciélagos. (Barboza et al., 2009). Por lo tanto, como una aproximación metodológica a la bioacústica de murciélagos, esta investigación caracteriza y describe las llamadas de ecolocación de los murciélagos insectívoros de tres localidades de Antioquia implementando metodologías acústicas (pasiva y activa).

Metodología

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en localidades específicas de tres municipios del departamento de Antioquia, Támesis, Caucasia y Carepa, cada uno de estos representa tres biomas diferentes: bosque de niebla alto andino, bosque húmedo tropical y bosque húmedo-lluvioso tropical, respectivamente (**Fig. 1**).

La Reserva Natural el Globo, ubicada en la parte alta del municipio de Támesis, específicamente en la vereda el Tacón, hace parte de las áreas protegidas como reserva de la sociedad civil. Con una elevación entre 2.200 y 2.800 msnm, con una temperatura promedio de 15°C. Su ecosistema es Bosque de niebla Alto Andino. Lugar característico por sus ecosistemas en transición (VerdeAgua, 2021) .

Hacienda la Candelaria, ubicada en el municipio de Caucasia sobre la vía que conduce de Caucasia al municipio de Nechí, a una altura aproximada de 50 msnm. La zona de vida que la caracteriza es el Bosque húmedo tropical con una temperatura promedio de 26°C. Compuesto por, parches de bosques fragmentados y ecosistemas en recuperación con áreas abiertas, vegetación secundaria, pastos, bosque ripario y pocos bosques densos (Toro R, 2017).

Tulenapa, sede de estudios ecológicos y ambientales de la Universidad de Antioquia, ubicada en la región de Urabá, específicamente en el municipio de Carepa. Región reconocida por ser una zona bananera, con cerca de 34 mil hectáreas de cultivos y 90 mil hectáreas de potrero. El bosque primario es prácticamente inexistente y está representado por los manglares y los

humedales de agua dulce, y por un pequeño parche de selva húmeda-lluviosa tropical. El clima oscila entre 28°C, con precipitaciones entre 2100 y 3800 mm al año, con una altura de 28 msnm (Blanco L, 2018).

Muestreo acústico

Realizamos tres salidas de campo durante los meses de marzo a julio del 2022, una visita por localidad evaluada y durante cuatro días se tomaron los datos acústicos. Hicimos las grabaciones implementando dos dispositivos de monitoreo acústico. El primero es un equipo de grabación pasiva, AudioMoth (Open Acoustics Devices), el cual funciona con activación automática y se configuro con una tasa de muestreo de 384 kHz y una ganancia media, generando grabaciones de 1 minuto cada 10 minutos entre las 17:40 y 5:40 horas en cada noche de muestreo. Para cada localidad se instalaron dos grabadoras en áreas abiertas a una altura de aproximadamente 1,5 a 2,0 m sobre el nivel del suelo, con una inclinación de 45° orientada hacia la trayectoria de vuelo de los murciélagos (Adams et al., 2012). El segundo es un equipo de grabación activa, en el cual se registran, escuchan, y visualizan, en tiempo real las llamadas de ecolocalización, y se pueden grabar de acuerdo con la actividad registrada, el equipo utilizado fue el Echo Meter Touch 2 PRO (Wildlife Acoustics) conectado a través de una extensión USB a un dispositivo Android; este equipo se configuro con una tasa de muestreo de 256 kHz y una ganancia media. Las señales de ecolocalización fueron visualizadas en la aplicación para Android Echometer Bat detector y para cada localidad se hicieron grabaciones entre las 18:00 y 20:00 horas dependiendo de la actividad registrada.

Análisis de datos

Los registros acústicos fueron analizados utilizando el software Kaleidoscope (versión 5.1.9)

(Wildlife Acoustics, Maynard, Massachusetts, EE. UU.), software propuesto por los autores del micrófono activo Echo Meter Touch 2 PRO. La configuración la hicimos siguiendo la propuesta de Martínez-Medina et al. (2021), con una ventana de Hamming con un tamaño de FFT 1024, tamaño de ventana 256 y tamaño de caché 256 MB. Las grabaciones con pulsos muy débiles o indistinguibles fueron excluidas de los análisis. La identificación de las especies se hizo manualmente, midiendo los parámetros acústicos de al menos 20 pulsos usando la metodología de “Zero-crossing”, donde tomamos las variables espectrales y una temporal de los pulsos de la fase de búsqueda del armónico donde se concentra la mayor energía (Jung et al. 2007). Las variables espectrales medidas fueron: la frecuencia inicial (FS), frecuencia de máxima energía (FME), frecuencia final (FE), frecuencia mínima (Fmin), frecuencia máxima (Fmax), frecuencia media (Fmean) y la variable temporal corresponden a la duración del pulso (Dr). Las frecuencias se miden en kiloHertz (kHz) y la duración en milisegundos (ms). Además, se clasificaron los pulsos según su estructura, constante (CF), cuasi constante (QCF) y frecuencia modulada (FM), así como los elementos que los componen (únicos o mixtos). Finalmente, las caracterizaciones de los pulsos fueron comparadas con bibliotecas acústicas disponibles en la web (Briones-Salas et al., 2013; Denzinger & Schnitzler, 2013; Gómez-Corea et al., 2019; Ochoa et al., 2000; Ortega et al., 2022; Rivera-Parra & Burneo, 2013; Zurc Danny, 2017) y grabaciones de referencias personales elaboradas previamente en algunas localidades del departamento de Antioquia.

Resultados

Se obtuvieron un total de 336 grabaciones por localidad evaluada, para un total de 1,008 grabaciones, de las que se analizaron 403 (40%), esto corresponde a 234 registros agrupados

en 15 especies y 3 sonotipos que pertenecen a 4 familias y 8 géneros (**Tabla 1**). La familia Molossidae fue la más diversa con 81 llamadas registradas (20%) seguida de las familias Emballonuridae y Vespertilionidae con 79 (19%) y con 71 registros (17.6%), respectivamente. La familia menos diversa fue Noctilionidae con 3 registros (0.74%). Finalmente, obtuvimos un total de 3 (0.74%) sonotipos, los cuales se lograron identificar sólo hasta el nivel taxonómico de familia (**Tabla 1**).

En este estudio, las especies con mayor número de registros fueron: *Saccopteryx bilineata* con 37 (15.81%), *Molossus molossus* con 35 (14.96%), *Saccopteryx leptura* con 32 (13.68%), *Molossus bondae* con 31 (13.25%), *Myotis riparius* con 25 (10.68%), *Myotis nigricans* con 16 (6.84%). *Eumops glaucinus* y *Myotis Keasy* con 15 (6.41%) registros cada uno. Las especies con menor número de registros fueron: *Saccopteryx canescens* con seis (2.56%), *Eptesicus furinalis* con cinco (2.14%), *Cormura brevirostris*, *Eptesicus chiriquinus*, *Lasiurus ega* con cuatro (1.71%) registros cada uno. *Noctilio albiventris* con tres (1.28%) registros y finalmente *Eptesicus fuscus* con sólo dos (0.85%) registros (**Tabla 1**).

Familia Molossidae: se caracteriza por emitir pulsos de QFC, al menos en uno de los tipos de pulso, a veces con pequeñas señales de FM, presentando la mayor energía en el primer armónico, con alternancia de pulsos, bajos (FB) medios (FM), y en ocasiones, altos (FA), y los parámetros acústicos para tener en cuenta para su identificación son Fmax, Fmin, Ancho de banda, y Dr (Jung et al., 2014; Jung & Kalko, 2011b). Esta familia posee una alta plasticidad en los parámetros de los pulsos de ecolocalización y presentan un diseño típico para el forrajeo en espacio abierto (Ossa, 2010). Dentro de esta familia se registraron tres especies *Molossus molossus*, *Molossus bondae*, y *Eumops glaucinus* para las localidades de

Caucasia y Carepa (**Tabla 2; Fig. 2**)

Molossus molossus, emitió FB y FM. Iniciando con una frecuencia de 33.65 kHz, descendiendo en una frecuencia de 28.42 kHz, con Fmax de 33.26 kHz, Fmin de 30.31 kHz, Aban de 5.23 kHz, y una Dr de 5.94 ms en FB. En FM, inició con una frecuencia de 33.50 kHz, descendiendo en una frecuencia de 35.60 kHz, con Fmax de 39.90 kHz, Fmin de 36.36 kHz, Aban de 3.80 kHz, y Dr de 4.59 ms para la localidad de Caucasia. Mientras que, para la localidad de Carepa, para los FB se obtuvo una Fmax de 35.96 kHz, Fmin de 32.12 kHz, Aban de 6.27 kHz y Dr de 6.63 ms; y, para los FM, su Fmax-Fmin, AB, y Dr fueron de 43.11 kHz – 38.76 kHz – 7.25 kHz y 5.06 ms, respectivamente (**Tabla 2; Fig. 2**).

Molossus bondae, emitió FB y medios FM. Iniciando con una frecuencia de 31.72 kHz y descendiendo en una frecuencia de 23.84 kHz, con Fmax de 30.97 kHz, Fmin de 25.12 kHz, Aban de 7.88 kHz y Dr de 11.24 ms para FB. En FM inició con una frecuencia de 36.92 kHz y descendió en una frecuencia de 31.69 kHz, con Fmax de 36.18 kHz, Fmin de 32.48 kHz, Aban 5.23 kHz, y Dr de 9.34 ms para la localidad de Caucasia. Mientras que, para la localidad de Carepa se obtuvo una Fmax de 32.62 kHz, Fmin de 25.53 kHz, Aban de 10.60 kHz y Dr de 13.05 ms para los FB. En FM su Fmax- Fmin, AB, y Dr fue de 34.08 kHz – 31.52 kHz – 3.59 kHz y 8.21 ms, respectivamente (**Tabla 2; Fig. 2**).

Eumops glaucinus, emitió FB y FA, iniciando con una frecuencia de 24.18 kHz y descendiendo en una frecuencia de 20.30 kHz, con Fmax de 31.47 kHz, Fmin de 26.01 kHz, Aban de 7.87 kHz y Dr de 10.85 ms para FA. En FB inicio con una frecuencia de 26.37 kHz y descendió en una frecuencia de 19.57 kHz, con Fmax de 25.42 kHz, Fmin de 21.81 kHz,

Aban de 6.80 kHz y Dr de 8.47 ms para la localidad de Caucasia. Para la localidad de Carepa se obtuvo una Fmax de 31.21 kHz, Fmin de 25.32 kHz, Aban de 7.27 kHz y Dr de 12.27 ms para FA. En FB su Fmax - Fmin - Aban y Dr fue de 24.57 kHz - 21.20.26 kHz - 7.04 kHz y 10.87 ms, respectivamente (**Tabla 2; Fig. 2**).

Familia Emballonuridae: se caracteriza por emitir pulsos QCF, con componentes FC con forma de U invertida, presentando la mayor energía en el segundo armónico. Su FMax, y la presencia de alternancia, son parámetros importantes para la identificación de especies (Arias-Aguilar et al., 2018; Jung et al., 2007; Kalko & Condon, 1998). Para esta familia se registraron cuatro especies *Saccopteryx bilineata*, *S. leptura*, *S. canescens* y *Cormura brevirostris*, dentro de las localidades de Caucasia y Carepa (**Tabla 3; Fig. 3**).

Saccopteryx bilineata, emitió pulsos FA y FB de forma alterna, con un rango de Fmax de 47,15 y 44,81(kHz) en FA y de 44.79 y 42.40 (kHz) en FB. FB iniciaron, en promedio con una frecuencia de 40.80 kHz y descendieron hasta de 44.79 kHz, con FME de 44.50 y 41.51 (kHz). FA iniciaron en una frecuencia de 42.70 kHz y terminaron en 47.48 kHz, con FME de 46.86 kHz en Carepa y 44.76 kHz en Caucasia. La Dr de FA Y FB fue muy similar, 5.91 ms para los FA y 5.8 ms para los FB en ambas localidades (**Tabla 3; Fig. 3**).

Saccopteryx leptura, emitió FA y FB de forma alterna, con rango de Fmax de 47.59 y 48.17 (kHz) en FA y de 46.02 y 45.30 (kHz) en FB para Caucasia y Carepa respectivamente. FA iniciaron con una frecuencia de 45.05 kHz y terminaron en una frecuencia de 48.74 kHz; la FME vario entre localidades siendo 47.43 kHz para Caucasia y 46.85 kHz para Carepa. Para FB iniciaron con una frecuencia de 42.54 kHz y terminaron con una frecuencia de 46.43 kHz;

y hubo variación de FME entre localidades, FME 45.68 kHz para Caucasia y 45.15 kHz para Carepa. La Dr de los pulsos fue similar entre localidades, siendo 6.05 ms y 5.71 ms para Caucasia y Carepa respectivamente (**Tabla 3; Fig. 3**).

Saccopteryx canescens, no emitió pulsos alternos, todos estaban bajo la misma banda de frecuencia y sólo fue registrada para la localidad de Caucasia. Iniciando con una frecuencia de 49.05 kHz, su Fmax de 54.33 kHz, y terminado con una frecuencia de 55.47 kHz, su FME de 53.94 kHz y con una Dr promedio de 5.93 ms (**Tabla 3; Fig. 3**).

Cormura brevirostris, su llamada está compuesta por tres pulsos, FB, FM y alto FA, pero uno de los pulsos puede omitirse en algunas circunstancias (Arias-Aguilar et al., 2018; K. Jung et al., 2007; Surlykke & Kalko, 2008). En este estudio no se encontraron pulsos FA dentro de la secuencia de pulsos registrados. Para la localidad de Caucasia, los FB iniciaron a una frecuencia de 28.01 kHz y descendieron hasta una frecuencia de 31.23 kHz. Alcanzaron una Fmax de 30.48 kHz, con una FME de 29.73 kHz y una Dr de 8.17 ms. Los pulsos FM iniciaron a una frecuencia de 28.82 kHz y descendieron hasta una frecuencia de 32.27 kHz. Alcanzaron una Fmax de 30.83 kHz, con una FME de 30.07 kHz y una Dr de 3.71 ms. Mientras que, para la localidad de Carepa, los FB iniciaron a una frecuencia de 24.07 kHz y descendieron hasta una frecuencia de 28.15 kHz. Alcanzaron una Fmax de 26.74 kHz, con una FME de 26.17 kHz y una Dr de 6.90 ms. Los pulsos FM iniciaron a una frecuencia de 24.28 kHz y descendieron hasta una frecuencia de 28.10 kHz. Alcanzaron una Fmax de 26.49 kHz, con una FME de 25.71 kHz y una Dr de 3.20 ms (**Tabla 3; Fig. 3**).

Familia Vespertilionidae: se caracteriza por emitir pulsos por encima de los 40 kHz de FM

y QF al final, presentando en la mayoría de las especies la mayor energía en el primer armónico y algunas otras especies en el segundo armónico (Denzinger et al., 2001; Martínez-Medina et al., 2021). Los parámetros acústicos importantes para la identificación de las especies de esta familia son Fmin, duración del pulso y estructura del pulso (O'Farrell & Miller, 1999). Las llamadas de esta familia son características de forrajeo cerca de la vegetación. (Wowk et al., 2001), Para esta familia se registraron seis especies, tres del género *Myotis* (*nigricans*, *riparius* y *pilosatibialis*), tres del género *Eptesicus* (*chiriquinus*, *furinalis* y *fuscus*) y *Lasiurus ega* (**Tabla 4; Fig. 4**). La representatividad de los géneros varió con respecto a la localidad evaluada, donde las especies del género *Eptesicus* fueron registradas sólo en la localidad de Támesis, mientras que las especies del género *Myotis* en las localidades bajas de Carepa y Caucasia, *Lasiurus* en Támesis y Carepa (**Tabla 1**).

Eptesicus chiriquinus, presenta una FS con una frecuencia de 54.33 kHz, finalizando con una frecuencia de 31.54 kHz, Fmax de 51.91 kHz, Fmin de 32.62 kHz, FME de 32.78 kHz y Dr de 7.06 ms. La estructura del pulso con componente FM descendente terminando con QFC (**Tabla 4; Fig. 4**).

Eptesicus furinalis, inicio con una frecuencia de 40.72 kHz, finalizando con una frecuencia de 62.92 kHz, Fmax de 60.96 kHz, Fmin de 41.16 kHz, FME de 41.56 kHz y Dr de 4.22 ms. La estructura del pulso con componente FM descendente terminando con QFC de banda estrecha (**Tabla 4; Fig. 4**).

Eptesicus fuscus, inicio con una frecuencia de 33.53 kHz, finalizando con una frecuencia de 55.37 kHz, Fmax de 62.2 kHz, Fmin de 34.22 kHz, FME de 34.5 kHz y Dr de 4.79 ms. La

estructura del pulso con componente FM descendente con una leve terminación en QFC de banda estrecha (**Tabla 4; Fig. 4**).

Lasiurus ega, inicio con una frecuencia de 44.97 kHz, finalizando con una frecuencia de 75.49 kHz, Fmax de 73.44 kHz, Fmin de 45.2 kHz, FME de 46.35 kHz y Dr de 2.61 ms, en la localidad de Támesis, para Carepa inicio con una frecuencia de 39.96 kHz, finalizando con una frecuencia de 57.23 kHz, Fmax de 56.5, Fmin de 43.43, FME de 45.06 kHz y Dr de 2.94 ms. La estructura del pulso con componente FM descendente y QFC terminal de banda estrecha con corta duración (**Tabla 4; Fig. 4**).

Myotis pilosatibialis, inicio con una frecuencia de 52.83 kHz, finalizando con una frecuencia de 70.88 kHz, Fmax de 84.96 kHz, Fmin de 53.53 kHz, FME de 54.21 kHz y Dr de 5.14 ms en la localidad de Caucasia, para Carepa inicio con una frecuencia de 50.67 kHz, finalizando con una frecuencia de 68.15 kHz, Fmax de 63.41 kHz, Fmin de 52.25 kHz, FME de 52.88 kHz y Dr de 4.78 ms. La estructura de su pulso con componente QCF en su cola (parte terminal) de banda estrecha y FM descendente (**Tabla 4; Fig. 4**).

Myotis riparius, inicio con una frecuencia de 65.43 kHz, finalizando con una frecuencia de 65.43 kHz, Fmax de 62.77 kHz, Fmin de 55.14 kHz, FME de 55.55 kHz y Dr de 3.31 ms. La estructura de su pulso con componente de FM descendente poco empinado finalizando con QFC (**Tabla 4; Fig. 4**).

Myotis nigricans, inicio con una frecuencia de 47.37 kHz, finalizando con una frecuencia de 74.24 kHz, Fmax de 69.63 kHz, Fmin de 49.37 kHz, FME de 52.27 kHz y Dr de 2.73 ms en

la localidad de Caucasia para Carepa inicio con una frecuencia de 47.27 kHz, finalizando con una frecuencia de 64.76 kHz, Fmax de 63.34 kHz, Fmin de 48.33 kHz, FME de 50.57 kHz y Dr de 3.94 ms. La estructura de su pulso con componente de FM descendente poco empinado, finalizando con QFC (**Tabla 4; Fig. 4**).

Familia Noctilionidae: se caracteriza por emitir pulsos QCF, con frecuencia constante FC al inicio del pulso y FM descendente, los cuales se denominan pulsos altos, mientras que los pulsos que presentan un segmento de frecuencia FQC al inicio y terminando con frecuencia modulada FM, se le denominan pulsos bajos (Martínez-Medina et al., 2021). Para esta familia se registró la especie *Noctilio albiventris* dentro de las localidades de Carepa y Caucasia, y se midió un solo pulso con la metodología de zero crossing (**Tabla 5; Fig. 5**).

Noctilio albiventris, no emitió pulsos alternos. Para la localidad de Carepa, los pulsos iniciaron con una frecuencia promedio de 66.90 kHz, finalizando con una frecuencia de 70.34 kHz, con una Fmax de 70.04 kHz y FME de 68.94 kHz, con una Dr de 4.51 ms. Para la localidad de Caucasia, sus pulsos iniciaron con una frecuencia promedio de 70.54 kHz, finalizando con una frecuencia de 75.32 kHz, con una Fmax de 70.54 kHz y FME de 72.8 kHz con una Dr de 5.46 ms (**Tabla 5; Fig 5**).

Finalmente, para los sonotipos no identificados, se hizo una aproximación taxonómica a través de la estructura del pulso y sus frecuencias características, pero las identificaciones no fueron concluyentes, a causa de los pocos registros de estas llamadas en los sitios de muestreo. El sonotipo 1, procedente del municipio de Caucasia, tiene una estructura acústica que se asocia posiblemente con la familia Emballonuridae, por la forma cóncava del pulso.

Por el contrario, el sonotipo 2, registrado en Caucasia, tiene una estructura acústica que se relaciona con algunas especies de pertenecientes a la familia Vespertilionidae. Y finalmente, el sonotipo 3, registrado en Caucasia, se asocia con especies de la familia Molossidae (**Fig 6**).

Discusión

La comunidad de murciélagos caracterizada en este estudio representa el 8% de la diversidad total de los murciélagos reportados para el país, y el 15% de la registrada para el departamento de Antioquia (Cuartas-Calle & Muñoz-Arango, 2003; Ramírez-Chaves et al., 2021). Así mismo, esta diversidad representa en términos de riqueza de murciélagos insectívoros el 21% de la comunidad del país, y el 34% de la riqueza del departamento (Cuartas-Calle & Muñoz-Arango, 2003; Ramírez-Chaves et al., 2021).

En cuanto a las localidades, Caucasia fue la que presentó mayor riqueza de especies y número de registros, con 12 especies reportadas (67%) y 141 registros (60%) obtenidos, mientras que para la localidad de Carepa se presentó una riqueza de 10 especies (55%) y 80 registros (34%), y finalmente, Támesis presentó la menor riqueza de especies (cuatro, 22%) y el menor número de registros (13, 6%), todos correspondientes a la familia Vespertilionidae (**Tabla 1**). Estos resultados están en línea con lo reportado en la literatura para los chiropteros, los cuales responden a gradientes altitudinales y siguen un patrón característico y aparentemente consistente, donde la riqueza de especies disminuye notoriamente al incrementar la altitud (Bejarano et al., 2007; Bracamonte, 2018; Briones-Salas et al., 2005;

Lomolino, 2001), y que además lo hace de manera diferente entre las distintas familias. Estos resultados reflejan la importancia de incluir las metodologías acústicas para tener un acercamiento más preciso a la comunidad de murciélagos de las localidades y hábitats evaluados, de esta manera se podría complementar la lista de especies y contribuir a las bibliotecas acústicas que permitan comparar e identificar especies y documentar como varía la plasticidad de los pulsos de las especies en las distintas localidades (Martínez-Medina et al., 2021).

La detectabilidad en los muestreos acústicos, varía por distintos factores como la ubicación del micrófono acústico, el tiempo y hábitat muestreado, los equipos de grabación y el software de análisis de las grabaciones acústicas, así como la experticia del investigador (Briones-Salas et al., 2013). Además, las llamadas de ecolocalización de los murciélagos insectívoros son muy variables debido a múltiples factores como el tipo de hábitat en el que forrajean, el ruido ambiental y solapamiento de las llamadas de algunas especies (Vespertilionidae) y la plasticidad de los pulsos asociada al tipo de ecosistema donde habitan (Barclay, 1999; Zurc et al., 2017). Sin embargo, cada familia presenta estructuras del pulso y parámetros acústicos diferenciales entre sus especies que permiten su identificación, la estratificación de frecuencias entre las especies de la misma familia se resalta como un ejemplo de nicho acústico; los pulsos de muchas especies han sufrido un desplazamiento para reducir o evitar la superposición interespecífica (Denzinger et al., 2001). Aunque se presentan todas estas variaciones, es posible identificar muchas especies insectívoras a partir de las metodologías acústicas.

La identificación de las especies difiere entre familias, siendo Emballonuridae y

Noctilionidae las que suelen ser más fáciles de identificar, y por el contrario, las familias Vespertilionidae y Molossidae suelen ser un poco más compleja por la similitud de la estructura del pulso y frecuencias (Briones-Salas et al., 2013; Gómez-Corea et al., 2019; O'Farrell & Miller, 1999) No obstante, en este estudio, los parámetros acústicos de las especies identificadas coincide con los parámetros acústicos reportados en las bibliotecas acústicas disponibles (Briones-Salas et al., 2013; Denzinger & Schnitzler, 2013; Gómez-Corea et al., 2019; Ochoa et al., 2000; Ortega et al., 2022; Rivera-Parra & Burneo, 2013; Zurc Danny, 2017) y las grabaciones de referencias personales construidas previamente en algunas localidades del departamento de Antioquia.

En esta investigación, quisiéramos hacer varias recomendaciones para el uso de las metodologías acústicas, usando el software Kaleidoscope, el cual es gratuito, abierto y fácil de usar para la caracterización acústica con la metodología Zero Crossing, ya que permite obtener los parámetros acústicos de manera automática, mientras que Full Spectrum implica tomar las frecuencias mínimas y máximas de manera manual, lo que incluye un error adicional asociado al efecto del investigador. Al no considerar Full Spectrum suelen perderse los datos de ancho de banda, pero para este caso particular al tomar los parámetros de F_{min} y F_{max} de manera manual, y dependiendo del contraste del software, se genera una incertidumbre con un amplio rango de variación en la medida. Así mismo, se resalta la importancia de la construcción e implementación de las grabaciones de referencia o bibliotecas acústicas, que permitan hacer una identificación más precisa de las especies, apoyada en la medición de los parámetros acústicos de una manera sistemática.

Resulta importante incluir las metodologías acústicas dentro de las caracterizaciones de las comunidades de murciélagos con el fin de aumentar la probabilidad de detección de las especies insectívoras debido a que la diversidad que representan dentro del orden Chiroptera es aproximadamente del 40% y su detección ayuda a caracterizar de manera más precisa las comunidades de murciélago en las localidades de estudio. Por lo tanto, que este trabajo constituye una aproximación metodológica a la caracterización acústica de los murciélagos insectívoros a partir del uso de metodologías acústicas (pasivas o activas) con un software abierto, libre y fácil de usar, accesible a cualquier investigador que desee implementar estas metodologías.

Agradecimientos

Quiero agradecer al grupo de Mastozoología de la Universidad de Antioquia por permitirme realizar este trabajo, especialmente al profesor Sergio Solari y la bióloga Leidy López-S. por su acompañamiento, tiempo y dedicación. A mis profesores durante toda la carrera, a mis compañeras, a Carolina Gómez que falleció haciendo lo que ama. A mi familia por su comprensión y acompañamiento durante mi carrera. A todas las personas involucradas en mi formación como bióloga.

Referencias

- Adams, A. M., Jantzen, M. K., Hamilton, R. M., & Fenton, M. B. (2012). ¿Do you hear what I hear? Implications of detector selection for acoustic monitoring of bats. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(6), 992-998.
- Arias-Aguilar, A., Hintze, F., Aguiar, L., Rufay, V., Bernard, E., & Pereira, M. J. R. (2018). Who's calling? Acoustic identification of Brazilian bats. *Mammal Research*, 63(3), 231-253.
- Arita, H. T., & Fenton, M. B. (1997). Flight and echolocation in the ecology and evolution of

- bats. *Trends in Ecology & Evolution*, 12(2), 53-58.
- Barboza, K., Pérez, J., Kalko, E., Aguirre, L., Estrada, S., & Ossa, G. (2009). The importance of acoustic monitoring in the study of the communities of 41 bats in Latin America. *Memorias Del Primer Simposio Ecuatoriano Sobre Investigación y Conservación de Murciélagos (Tirira, D., Ed). Ecuador (Pp. 30-31).*, May 2009.
- Barclay, R. M. (1999). Bats are not birds—a cautionary note on using echolocation calls to identify bats: a comment. *Journal of Mammalogy*, 80(1), 290-296.
- Bejarano-Bonilla, D. A., Yate-Rivas, A., & Bernal-Bautista, M. H. (2007). Diversidad y distribución de la fauna quiróptera en un transecto altitudinal en el departamento del Tolima, Colombia. *Caldasia*, 29(2), 297-308.
- Boyles, J. G., Cryan, P. M., McCracken, G. F., & Kunz, T. H. (2011). Economic importance of bats in agriculture. *Science*, 332(6025), 41-42.
- Bracamonte, J. C. (2018). Sampling protocol for the estimation of bat diversity with mist nets in ecological studies. *Ecología Austral*, 28(02), 446-454.
- Briones-Salas, M. A., Sánchez-Cordero, V., & Santos-Moreno, A. (2005). Diversidad de murciélagos en un gradiente altitudinal de la Sierra Mazateca Oaxaca, México. *Contribuciones Mastozoológicas En Homenaje a Bernardo Villa, March 2017*, 65–74.
- Briones-Salas, M., Peralta-Pérez, M., & García-Luis, M. (2013). Acoustic characterization of new species of bats for the State of Oaxaca, Mexico. *Therya*, 4(1), 15-32.
- Cuartas-Calle, C. A., & Muñoz-Arango, J. (2003). Lista de los Mamíferos (Mammalia: Theria) del departamento de Antioquia, Colombia. *Biota Colombiana*, 4(1), 65–78. <https://doi.org/10.21068/c001>
- Denzinger, A., & Schnitzler, H. U. (2013). Bat guilds, a concept to classify the highly diverse foraging and echolocation behaviors of microchiropteran bats. *Frontiers in physiology*, 4, 164.
- Denzinger, A., Siemers, B. M., Schaub, A., & Schnitzler, H. U. (2001). Echolocation by the barbastelle bat, *Barbastella barbastellus*. *Journal of Comparative Physiology A*, 187(7), 521-528.
- Fenton, M. B., Rydell, J., Vonhof, M. J., Eklöf, J., & Lancaster, W. C. (2000). Constant-frequency and frequency-modulated components in the echolocation calls of three species of small bats (Emballonuridae, Thyropteridae, and Vespertilionidae). *Canadian Journal of*

Zoology, 77(12), 1891-1900.

- González, J. G. (1998). Dispersión de semillas por murciélagos: su importancia en la conservación y regeneración del bosque tropical. *Acta Zoológica Mexicana (ns)*, (73), 57-74.
- Gómez-Corea, W. N., España, F. G., Mejía-Quintanilla, D. J., & Figueroa-Grande, A. N. (2021). Bats (Mammalia, Chiroptera) from Yuscarán in Eastern Honduras: Conservation and acoustic characterization for the insectivorous species. *Papéis Avulsos de Zoologia*, 61.
- Gorresen, P. M., & Willig, M. R. (2004). Landscape responses of bats to habitat fragmentation in Atlantic forest of Paraguay. *Journal of Mammalogy*, 85(4), 688-697.
- Jones, G., Jacobs, D. S., Kunz, T. H., Willig, M. R., & Racey, P. A. (2009). Carpe noctem: the importance of bats as bioindicators. *Endangered species research*, 8(1-2), 93-115.
- Jung, K., Kalko, E. A. V., & Von Helversen, O. (2007). Echolocation calls in Central American emballonurid bats: signal design and call frequency alternation. *Journal of Zoology*, 272(2), 125-137.
- Jung, K., & Kalko, E. K. (2011). Adaptability and vulnerability of high flying Neotropical aerial insectivorous bats to urbanization. *Diversity and distributions*, 17(2), 262-274.
- Jung, K., Molinari, J., & Kalko, E. K. (2014). Driving factors for the evolution of species-specific echolocation call design in new world free-tailed bats (Molossidae). *PloS one*, 9(1), e85279.
- Kalka, M. B., Smith, A. R., & Kalko, E. K. (2008). Bats limit arthropods and herbivory in a tropical forest. *Science*, 320(5872), 71-71.
- Kalko, E. K., Estrada Villegas, S., Schmidt, M., Wegmann, M., & Meyer, C. F. (2008). Flying high—assessing the use of the aerosphere by bats. *Integrative and Comparative Biology*, 48(1), 60-73.
- Kalko, E. K., & Condon, M. A. (1998). Echolocation, olfaction and fruit display: how bats find fruit of flagelliferous cucurbits. *Functional Ecology*, 12(3), 364-372.
- Kunz, T. H., Braun de Torrez, E., Bauer, D., Lobova, T., & Fleming, T. H. (2011). Ecosystem services provided by bats. *Annals of the New York academy of sciences*, 1223(1), 1-38.
- Kunz, T. H., & Fenton, M. B. (Eds.). (2005). *Bat ecology*. University of Chicago Press.
- Lomolino, M. V. (2001). Elevation gradients of species-density: historical and prospective views. *Global Ecology and biogeography*, 10(1), 3-13.
- MacSwiney G, M. C., Clarke, F. M., & Racey, P. A. (2008). What you see is not what you get: the role of ultrasonic detectors in increasing inventory completeness in Neotropical bat

- assemblages. *Journal of applied Ecology*, 45(5), 1364-1371.
- Mantilla-Meluk, H., Jiménez-Ortega, A. M., & Baker, R. J. (2009). *Phyllostomid bats of Colombia: annotated checklist, distribution, and biogeography*. Museum of Texas Tech University;.
- Martínez-Medina, D., Sánchez, J., Zurc, D., Sánchez, F., Otálora-Ardila, A., Restrepo-Giraldo, C., ... & Lizcano, DJ (2021). Estándares para el registro de señales de ecolocalización y construcción de bibliotecas de referencia de murciélagos en Colombia. *Biota colombiana*, 22 (1), 36-56.
- O'Farrell, M. J., & Miller, B. W. (1999). Use of vocal signatures for the inventory of free-flying Neotropical bats 1. *Biotropica*, 31(3), 507-516.
- Ochoa, J., O'Farrell, M. J., & Miller, B. W. (2000). Contribution of acoustic methods to the study of insectivorous bat diversity in protected areas from northern Venezuela. *Acta Chiropterologica*, 2(2), 171-183.
- Ortega, J., MacSwiney G., M. C., & Zamora Gutiérrez, V. (2022). *Compendio de los llamados de ecolocalización de los murciélagos insectívoros mexicanos*. *Asociación Mexicana de Mastozoología A.C*, 1(1), 23-216.
- Gómez, G. O. (2010). *Métodos bioacústicos: una aproximación a la ecología de comunidades de murciélagos en las eco-regiones mediterránea y el bosque templado de Chile*.
- Gregorin, R., Tahara, A., Mancini, M., Lobão, K., Oliveira, L., & Tavares, V. (2022). Mixed sampling methods reveal elevated bat richness in a semideciduous Atlantic forest remnant. *Acta Chiropterologica*, 24(1), 139-150.
- Ramírez-Chaves H E, Suárez Castro A F, Morales-Martínez D M, Rodríguez-Posada M E, Zurc D, Concha Osbahr D C, Trujillo A, Noguera Urbano E A, Pantoja Peña G E, González Maya J F, Pérez Torres J, Mantilla Meluk H, López Castañeda C, Velásquez Valencia A, Z. C. D. (2021). *Mamíferos de Colombia*. 1(12). Sociedad Colombiana de Mastozoología. Dataset/Checklist. <https://doi.org/https://doi.org/10.15472/k11whs>
- Rivera-Parra, P., & Burneo, S. F. (2013). Primera biblioteca de llamadas de ecolocalización de murciélagos del Ecuador. *Therya*, 4(1), 79-88.
- S Schnitzler, H. U., & Kalko, E. K. (2001). Echolocation by insect-eating bats: we define four distinct functional groups of bats and find differences in signal structure that correlate with the typical echolocation tasks faced by each group. *Bioscience*, 51(7), 557-569.

- Solari, S., Sotero-Caio, C. G., & Baker, R. J. (2019). Advances in systematics of bats: towards a consensus on species delimitation and classifications through integrative taxonomy. *Journal of Mammalogy*, *100*(3), 838-851.
- Surlykke, A., & Kalko, E. K. (2008). Echolocating bats cry out loud to detect their prey. *PLoS one*, *3*(4), e2036.
- Siemers, B. M., Kalko, E. K., & Schnitzler, H. U. (2001). Echolocation behavior and signal plasticity in the Neotropical bat *Myotis nigricans* (Schinz, 1821) (Vespertilionidae): a convergent case with European species of *Pipistrellus*?. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, *50*(4), 317-328.
- Zamora-Gutierrez, V., Ortega, J., Avila-Flores, R., Aguilar-Rodríguez, P. A., Alarcón-Montano, M., Avila-Torresagatón, L. G., ... & MacSwiney G, M. C. (2020). The Sonozotz project: Assembling an echolocation call library for bats in a megadiverse country. *Ecology and Evolution*, *10*(11), 4928-4943.
- Zurc, D., Guillén-Servent, A., & Solari, S. (2017). Chillidos de ecolocación de murciélagos Emballonuridae en una sábana xerófila-semiseca del Caribe Colombiano. *Mastozoología neotropical*, *24*(1), 201-218.
- Blanco L, J. F. (2018). *Universidad de Antioquia/Revista Experimenta*. Obtenido de <https://udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/udea-noticias/udea-noticia/>
- Toro R, J. D. (2017). *Universidad de Antioquia/Noticias*. Obtenido de <https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/udea-noticias/udea-noticia/>
- VerdeAgua, C. (2021). *Corporación VerdeAgua*. Obtenido de <https://corporacion-verdeagua.org/index.php/reserva-natural-el-globo/>

Leyenda de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica de las áreas de estudio. A) Reserva Natural el Globo, B) Hacienda la Candelaria, C) Tulenapa.

Figura 2. Espectrogramas de las especies identificadas pertenecientes a la familia Molossidae.

Figura 3. Espectrogramas de las especies identificadas pertenecientes a la familia Emballonuridae.

Figura 4. Espectrogramas de los individuos identificados pertenecientes a la familia Vespertilionidae.

Figura 5. Espectrogramas de los individuos identificados pertenecientes a la familia Vespertilionidae.

Figura 6. Espectrogramas de los individuos identificados pertenecientes a la familia Noctilionidae.

Figura 7. Sonotipos registrados durante el estudio.

Tabla 1. Número de registros de las especies de murciélagos insectívoros registrados en cada una de las localidades evaluadas.

Tabla 2. Parámetros de las señales de ecolocación en fase de búsqueda de tres especies de murciélagos de la familia Molossidae. Promedio \pm Desviación estándar ($X \pm SE$), ms = milisegundos, kHz = kilohertzio.

Tabla 3. Parámetros de las señales de ecolocación en fase de búsqueda de cuatro especies de murciélagos de la familia Emballonuridae. Promedio \pm Desviación estándar ($X \pm SE$), ms = milisegundos, kHz = kilohertzio.

Tabla 4. Parámetros de las señales de ecolocación en fase de búsqueda de siete especies de murciélagos de la familia Vespertilionidae. Promedio \pm Desviación estándar ($X \pm SE$), ms = milisegundos, kHz = kilohertzio.

Tabla 5. Parámetros de las señales de ecolocación en fase de búsqueda de una especie de murciélago de la familia Noctilionidae. Promedio \pm Desviación estándar ($X \pm SE$), ms = milisegundos, kHz= kilohertzio.

