Patrones de comunicación acústica a lo largo de un gradiente de distribución geográfica en una especie de ave neotropical

Valentina Tamayo Quevedo

UNIVERSIDAD ICESI

FACULTAD DE INGENIERÍA, DISEÑO Y CIENCIAS APLICADAS

Biología

Santiago de Cali

2024

Patrones de comunicación acústica a lo largo de un gradiente de distribución geográfica en una especie de ave neotropical

Valentina Tamayo Quevedo

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DEL PROGRAMA DE BIOLOGÍA

Ghislaine Cárdenas Posada – Bióloga/ PhD

Gustavo Adolfo Londoño Guerrero – Biólogo/ PhD

Santiago de Cali

2024

AVAL PARA LA ENTREGA DE PDG II

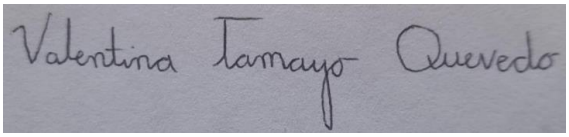
Firma del Asesor:

Ghislaine Cárdenas Posada

Firma del Asesor 2:

Gustavo Adolfo Lodoño Guerrero

Firma del estudiante:



Valentina Tamayo Quevedo

Resumen

El carpintero habado (*Melanerpes rubricapillus*) es una especie neotropical cuya comunicación vocal juega un papel clave en su ecología y comportamiento. Sin embargo, su variabilidad acústica en función de factores geográficos, ambientales y sociales ha sido poco estudiada, especialmente tras su reciente expansión en Colombia. Este trabajo analiza cómo estos factores influyen en sus vocalizaciones, con el objetivo de aportar herramientas para su monitoreo y conservación.

Se plantearon tres objetivos: 1. caracterizar las vocalizaciones según la distribución geográfica, 2. analizar el impacto de factores ambientales como la cobertura arbórea y 3. explorar el solapamiento acústico con otras especies de pájaros carpinteros. Utilizando 94 grabaciones de Xeno-canto, procesadas en Raven Pro 1.6, se aplicaron análisis de componentes principales y pruebas estadísticas multivariadas.

Los resultados destacan que variables como la Frecuencia Central, la Entropía Agregada y el Ancho de Banda son determinantes en la diferenciación acústica. Aunque no se observaron patrones claros por latitud o longitud, las variaciones acústicas parecen estar relacionadas con factores locales como el ruido ambiental y las dinámicas sociales. Además, se identificó un solapamiento acústico con otras especies, evidenciando la flexibilidad vocal de *M. rubricapillus* como una estrategia adaptativa.

El estudio aporta al conocimiento de la especie al mostrar cómo sus vocalizaciones reflejan adaptaciones a su entorno, contribuyendo a comprender los patrones de comunicación acústica en aves neotropicales. Esto refuerza la importancia de las vocalizaciones como herramientas prácticas para monitoreo y conservación.

Palabras clave: Comunicación vocal, Bioacústica, Adaptación acústica, Picidae

Introducción

La comunicación vocal en aves es un fenómeno complejo y esencial que desempeña un papel crucial en diversos aspectos de su ecología y comportamiento. Las vocalizaciones son fundamentales para la atracción de pareja, la defensa territorial y el reconocimiento intraespecífico e interespecífico, siendo una herramienta clave para garantizar el éxito reproductivo, la supervivencia y la cohesión social en muchas especies. Estas señales acústicas no solo permiten la interacción efectiva entre individuos, sino que también transmiten información sobre el estado físico del emisor, sus motivaciones y posibles comportamientos futuros. Así, las vocalizaciones no son meros sonidos, sino mensajes complejos moldeados por procesos evolutivos, biológicos y ecológicos. En términos generales, la comunicación vocal en aves se ve afectada por una combinación de factores biológicos, sociales y ambientales, incluyendo las características físicas del entorno y las interacciones entre individuos[1–3].

El canto en aves es particularmente interesante debido a su flexibilidad, ya que puede variar según condiciones ambientales, fisiológicas y sociales. Por ejemplo, en hábitats con alta densidad vegetal, las frecuencias más bajas tienden a propagarse mejor, lo que lleva a una selección evolutiva hacia vocalizaciones adaptadas a estas condiciones[3,4]. Además, factores como el ruido ambiental, la temperatura y la velocidad del viento pueden influir en la propagación y percepción del sonido, generando un entorno dinámico en el que las aves deben ajustar continuamente sus estrategias de comunicación[5,6]. En este sentido, las señales acústicas en hábitats densamente vegetados tienden a ajustarse para optimizar su transmisión: frecuencias más bajas y amplitudes moderadas permiten evitar la atenuación excesiva, mientras que una mayor regularidad temporal facilita que el mensaje llegue al receptor sin distorsión[7]. Estas adaptaciones acústicas reducen la degradación del mensaje, aseguran su eficacia en la comunicación y pueden llevar a divergencias acústicas entre poblaciones

aisladas, lo que influye en el reconocimiento intraespecífico, el éxito reproductivo y la cohesión social[8,9].

Entre las aves, los pájaros carpinteros (Picidae) destacan por su riqueza en señales acústicas, que incluyen vocalizaciones y sonidos mecánicos como el característico tamborileo producido al golpear superficies resonantes[10]. Si bien el tamborileo ha sido ampliamente estudiado y reconocido como una herramienta de comunicación esencial para la defensa territorial y las interacciones intraespecíficas, las vocalizaciones propiamente dichas han recibido menos atención científica[10,11]. Este vacío es significativo, ya que las vocalizaciones pueden ser indicadores clave del estado de las poblaciones. A través de su análisis, es posible inferir aspectos como la densidad poblacional, las condiciones físicas de los individuos y su respuesta a cambios ambientales[12]. Cambios en frecuencias, amplitudes o patrones temporales pueden reflejar adaptaciones a entornos perturbados, pérdida de hábitat o estrés ecológico, ofreciendo información crítica para diseñar estrategias de manejo y protección [5,8,12]. En un contexto donde las actividades humanas y los cambios ambientales representan amenazas crecientes para la biodiversidad, estas vocalizaciones se convierten en herramientas valiosas para el monitoreo y la conservación[13].

El caso del carpintero habado (*Melanerpes rubricapillus*) resulta particularmente interesante, ya que es una especie ampliamente distribuida desde América Central hasta el norte de Sudamérica, que ha registrado una reciente expansión en Colombia[8,14]. Originalmente limitado a regiones costeras del Caribe, comenzó a colonizar áreas más al interior, siendo registrado en el Valle del Cauca en 2004 y nuevamente en 2006, tras un movimiento de aproximadamente 200 kilómetros desde su límite previo en el Quindío[8,14]. Esta expansión hacia nuevos hábitats plantea preguntas sobre cómo las condiciones ambientales y sociales afectan su comportamiento comunicativo y posibles adaptaciones de sus vocalizaciones. Estas vocalizaciones no solo tienen implicaciones teóricas en términos de adaptación acústica, sino que también son de gran relevancia para la conservación, ya que permiten inferir aspectos del estado de las poblaciones, como su distribución, densidad y posibles amenazas[8,14].

El canto y los llamados, aunque a menudo considerados términos intercambiables, cumplen funciones distintas en las aves. Los cantos suelen estar asociados a la atracción de pareja y la defensa territorial, mientras que los llamados son señales más generales utilizadas en contextos como la alarma, la coordinación grupal o la comunicación interespecífica[15]. En términos de flexibilidad evolutiva, los llamados tienden a ser más estables en el tiempo debido a su función crítica en la supervivencia inmediata, como la advertencia de depredadores o la coordinación grupal, lo que limita su variación. Por el contrario, los cantos suelen mostrar mayor flexibilidad, ya que están influenciados por la competencia sexual y las dinámicas territoriales, factores que pueden variar significativamente entre poblaciones y entornos[15]. Por ello, sería más esperable que los cantos cambien más fácilmente en respuesta a presiones ambientales o sociales, mientras que los llamados conservarían una estructura más fija para garantizar su eficacia en contextos esenciales[16].

En el caso de *M. rubricapillus*, sus vocalizaciones consisten en patrones repetitivos que carecen de la complejidad rítmica de otras especies de aves[13]. Sin embargo, aún se desconoce cómo estas vocalizaciones varían según los factores geográficos, ambientales y sociales en su distribución, y qué tan flexibles podrían ser tanto sus cantos como sus llamados frente a los desafíos de nuevos hábitats o interacciones con otras especies.

Este proyecto tiene como objetivo evaluar la variación de las vocalizaciones de *Melanerpes rubricapillus* en el continente americano, con un enfoque en los factores biológicos y sociales que influyen en su comunicación. Para ello, se plantea caracterizar las diferencias en las vocalizaciones de acuerdo con la distribución geográfica de la especie, analizar el impacto de los factores ambientales en estas variaciones y explorar cómo las interacciones con otras especies pueden influir en sus señales acústicas. Este enfoque integral permitirá comprender mejor los procesos ecológicos y evolutivos que afectan la comunicación vocal de esta especie, proporcionando una base sólida para desarrollar planes de conservación efectivos.

En resumen, este estudio busca llenar vacíos en el conocimiento sobre las vocalizaciones de *M. rubricapillus* y su relación con los cambios ambientales y sociales en su distribución. Al hacerlo, no solo contribuirá a la comprensión teórica de los procesos de adaptación acústica, sino que también ofrecerá herramientas prácticas para el monitoreo y la conservación de esta especie. Esto cobra especial importancia en un contexto donde la expansión de su

distribución plantea nuevos desafíos para su manejo y protección. La integración de perspectivas bioacústicas, ecológicas y evolutivas permitirá abordar preguntas fundamentales sobre cómo las aves responden a las presiones ambientales y cómo estas respuestas pueden ser utilizadas para garantizar su supervivencia en un mundo cambiante.

Metodología

Especie de Estudio

El carpintero habado (*Melanerpes rubricapillus*) (Imagen 1) es un ave cuya distribución abarca desde el sur de Costa Rica hasta Panamá, Colombia, Venezuela y Trinidad y Tobago. Esta especie habita áreas abiertas, bordes de bosque, matorrales áridos y semiáridos, jardines, cultivos y manglares. Las parejas son monógamas y permanecen juntas durante todo el año, anidando en cavidades de árboles muertos o postes a alturas de entre 3 y 23 metros. Las vocalizaciones de la especie se categorizaron en cuatro tipos: un churr prolongado (clasificado como un canto, asociado a la defensa territorial y la atracción de pareja), un traqueteo largo (otro canto, relacionado con interacciones territoriales), varios cascabeles cortos (en grupos de tres) y un parloteo (ambos considerados llamados, utilizados en contextos de alarma y coordinación intraespecífica) (Imágenes 2 y 3)[1,8]. Esta variabilidad en las vocalizaciones es crucial para su comunicación intraespecífica y para la defensa del territorio.

Recolección de Datos

Para este estudio se utilizaron grabaciones del llamado de *Melanerpes rubricapillus*, obtenidas de la plataforma colaborativa Xeno-canto (https://xeno-canto.org/)[17,18], que contiene registros auditivos de diferentes países en su rango de distribución, incluyendo Colombia, Venezuela, Panamá, Costa Rica y Trinidad y Tobago. Se descargaron un total de 104 registros, priorizando aquellos de mayor calidad y que correspondieran a diferentes individuos en cada localidad.

Posteriormente, se realizó un filtrado de las grabaciones, descartando aquellas provenientes de la misma localidad y fecha cercana, así como aquellas que pudieran corresponder a subespecies. Además, para evitar posibles variaciones en las características acústicas entre

sexos, se excluyeron específicamente las grabaciones de hembras. Este proceso redujo el conjunto de datos a 94 grabaciones de alta calidad.

Análisis Acústico

Los datos utilizados para el análisis acústico provinieron de las grabaciones de vocalizaciones de *Melanerpes rubricapillus* recolectadas en la plataforma colaborativa Xeno-canto. Estas grabaciones, previamente filtradas y clasificadas, incluyeron tanto cantos como llamados de individuos distribuidos en diferentes países de su rango geográfico. Este conjunto de datos permitió analizar las características acústicas representativas de cada vocalización.

El análisis se realizó utilizando el software Raven Pro 1.6[19]., donde se llevó a cabo una detección manual de cada canto y llamado. Durante este proceso, se recopilaron 84 variables acústicas que el software permite medir, tales como frecuencia pico, entropía agregada, ancho de banda, duración y otras características relacionadas. La información recolectada fue luego procesada en RStudio (v.4.4.2). Primero, se realizó una normalización de los datos para garantizar la comparabilidad entre las grabaciones, eliminando posibles sesgos relacionados con diferencias en las condiciones de grabación.

Posteriormente, se construyó un gráfico de correlación para identificar las variables que explicaban en mayor medida la variación observada en las vocalizaciones. A partir de este análisis, se seleccionaron las 10 variables más representativas:

1. **Frecuencia Pico (Hz):** Indica la frecuencia con mayor energía en la señal acústica.
2. **Frecuencia Central (Hz):** Representa el punto medio del espectro de frecuencias, dividiendo la energía en dos mitades iguales.
3. **Entropía Agregada (bits):** Mide la dispersión de energía a través de las frecuencias, indicando cuán compleja es la señal.
4. **Ancho de Banda al 50% (Hz):** Representa la amplitud del rango de frecuencias donde se encuentra el 50% de la energía total.

5. **Duración al 90% (s):** El tiempo que tarda en emitirse el 90% de la energía de la vocalización.
6. **Delta Time (s):** Diferencia temporal entre los picos de energía consecutivos, proporcionando información sobre el ritmo de la vocalización.
7. **Relación Señal/Ruido NIST Quick (dB):** Mide la claridad de la vocalización en relación al ruido ambiental.
8. **Frecuencia de Pico en el Componente Máximo (Hz):** Señala la frecuencia dominante del segmento más energético de la señal.
9. **Amplitud Máxima:** Muestra el nivel más alto de energía detectado en la vocalización.
10. **Ancho de Banda del Espectro Completo (Hz):** Cobertura de todas las frecuencias presentes en la señal acústica.

Con estas variables, se realizaron análisis de componentes principales (PCA) para explorar posibles agrupaciones en las características acústicas de los cantos y llamados en relación con la ubicación geográfica de cada individuo. Estos análisis fueron visualizados a través de gráficos que contrastaban los componentes principales (Comp 1 vs Comp 2, Comp 1 vs Comp 3 y Comp 2 vs Comp 3), utilizando colores para representar las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de cada grabación.

Variables Ambientales y Sociales

Para complementar el análisis de las vocalizaciones, se descargaron las ubicaciones de las grabaciones de los 94 audios seleccionados utilizando RStudio. Posteriormente, se elaboró un mapa en QGIS con rásters de cobertura arbórea obtenidos de la plataforma Global Forest Watch. Además, en QGIS se calculó el porcentaje de cobertura arbórea asociado a cada punto de grabación. Finalmente, se compararon los resultados del análisis de componentes principales (PCA) con los valores de cobertura arbórea, empleando la misma combinación de componentes previamente identificada.

En cuanto a las variables sociales, se escogieron cinco especies de pájaros carpinteros (*Colaptes punctigula*, *Dryocopus lineatus*, *Leuconotopicus fumigatus*, *Melanerpes formicivorus* y *Picumnus squamulatus*) con el objetivo de determinar si sus cantos coincidían en espacio sonoro con los de *Melanerpes rubricapillus*. Estas especies fueron seleccionadas considerando comportamientos sociales similares, el orden taxonómico al que pertenecen y su distribución geográfica, que es comparable a la de *M. rubricapillus*.

El proceso inició con la descarga de grabaciones de vocalizaciones de las especies seleccionadas desde la plataforma Xeno-canto. Una vez reunidas las grabaciones, se realizó un filtrado para garantizar la calidad del audio y su representatividad en cuanto a cantos y llamados. A continuación, en el software Raven Pro, se llevó a cabo un proceso de detección manual de los cantos, seleccionando cinco individuos por especie para garantizar representatividad en los análisis. Una vez realizada la detección de los cantos, el software realizaba de forma automática la medición de cada una de las variables seleccionadas anteriormente.

Posteriormente, se creó una base de datos independiente para los cantos y otra para los llamados, organizando la información de acuerdo con las diez variables acústicas previamente seleccionadas en el primer objetivo del estudio (por ejemplo, frecuencia pico, ancho de banda y entropía). Esto permitió estructurar los datos de manera que facilitaran las comparaciones entre las especies.

Finalmente, se realizaron análisis de componentes principales (PCA) para explorar patrones de similitud o diferencia en las características acústicas entre los cantos de las especies seleccionadas y *Melanerpes rubricapillus*. Los resultados de estas comparaciones brindaron información valiosa sobre el solapamiento acústico y las posibles adaptaciones vocales en contextos de interacción interespecífica. La base de datos generada durante este proceso se incluye como anexo en el presente estudio para consulta detallada.

Análisis Estadístico

Con el fin de determinar si existían diferencias significativas en alguna de las variables estudiadas, se realizaron análisis estadísticos utilizando un MANOVA tanto para los cantos

como para los llamados, con el objetivo de evaluar las diferencias multivariadas en las características acústicas. En este análisis, la variable independiente utilizada fue la región geográfica, categorizada por países, ya que se buscaba identificar si las características acústicas presentaban patrones distintivos según el país de origen. Tras identificar que en los cantos las variables SNR NIST Quick (dB), Dur 90% (s) y Delta Time (s) presentaban diferencias significativas, se procedió a realizar análisis posANOVA (análisis post-hoc) para identificar cuáles grupos específicos contribuían a estas diferencias significativas.

Adicionalmente, se elaboraron gráficos de cajas y bigotes para visualizar de manera más detallada las distribuciones y variaciones de estas variables en función de los países de origen de las grabaciones, lo que permitió resaltar patrones específicos que podrían estar relacionados con factores ecológicos o biogeográficos propios de cada región.

Resultados y Discusión

Objetivo 1: Análisis Acústico de acuerdo a la Distribución Geográfica

El propósito de este análisis fue determinar si las características acústicas de las vocalizaciones de las poblaciones estudiadas presentan patrones geográficos relacionados con la latitud o la longitud. Esto permitiría identificar si las diferencias acústicas están influenciadas por gradientes geográficos amplios o si, por el contrario, son moduladas principalmente por factores locales.

Cantos

El análisis de componentes principales (PCA) mostró que las tres primeras dimensiones explicaron el 31.39%, 21.43% y 14.77% de la varianza, respectivamente, acumulando un 67.60% total en las características acústicas de los cantos. La contribución de las variables seleccionadas en cada componente principal se presenta en la Tabla 1, donde se evidencia que la Entropía Agregada y Delta Time son las variables más influyentes en las primeras dimensiones. Por otro lado, el porcentaje de varianza explicada por cada componente principal se detalla en la Tabla 2, indicando que los primeros cinco componentes representan el 87.09% de la variación total, consolidando su relevancia en la caracterización acústica.

Los gráficos de PCA muestran de manera clara cómo se distribuyen las características acústicas entre las poblaciones analizadas, pero sin evidenciar patrones geográficos marcados. La Figura 1, que representa la relación entre CP1 (Entropía Agregada) y CP2 (Delta Time), revela una dispersión de datos sin agrupaciones definidas en función de la latitud. De manera similar, la Figura 2, que ilustra la relación entre CP1 y CP2 coloreada según la longitud, tampoco muestra agrupaciones evidentes, sugiriendo que los gradientes longitudinales amplios tampoco son determinantes en las características acústicas de los cantos.

La Figura 3, que contrasta CP1 (Entropía Agregada) y CP3 (Ancho de Banda al 50%), muestra que tampoco hay un patrón evidente de agrupación relacionado con la latitud. De igual forma, la Figura 4 evalúa la relación entre CP1 y CP3, esta vez en función de la longitud. Por otro lado, la Figura 5 explora la relación entre CP2 (Delta Time) y CP3 (Ancho de Banda al 50%), mostrando una distribución dispersa que tampoco está correlacionada con la latitud. Finalmente, la Figura 6 presenta la misma relación (CP2 vs. CP3) pero coloreada según la longitud y denota un mismo resultado.

En conjunto, estas figuras muestran que, aunque existen diferencias acústicas entre las poblaciones analizadas, estas no parecen responder a gradientes geográficos amplios, como la latitud (que abarca un rango entre aproximadamente 2°N y 10°N, pero donde predominan los individuos que se encuentran en 10°N) o la longitud (con un rango más amplio, de -80° a -65°). Este hallazgo es consistente con estudios previos que han señalado que las vocalizaciones de las aves suelen estar influenciadas más por factores locales que por gradientes amplios, como los geográficos[13,20]. Las características acústicas, como la Entropía Agregada (CP1) y el Ancho de Banda al 50% (CP3), parecen reflejar adaptaciones específicas al entorno inmediato, donde elementos como la densidad de vegetación y el ruido ambiental pueden modificar las propiedades del sonido[20,21]. Además, las dinámicas sociales dentro de cada población también pueden desempeñar un papel crucial, ya que los individuos podrían ajustar sus vocalizaciones en respuesta a interacciones sociales específicas o a la necesidad de mantener una comunicación efectiva en un entorno complejo[21].

Por otro lado, el análisis del SNR NIST Quick mostró diferencias significativas entre los países, como se evidencia en la Figura 13, un boxplot que resalta la influencia del ruido

ambiental en las vocalizaciones. Costa Rica presentó los valores más altos de SNR, lo que indica mejores condiciones acústicas con menor interferencia ambiental, mientras que Panamá mostró los valores más bajos, posiblemente debido a mayores niveles de ruido ambiental. Estas diferencias refuerzan la idea de que las características acústicas están altamente moduladas por el entorno inmediato[3,5]. Por ejemplo, ambientes con menor ruido ambiental, como los observados en Costa Rica, pueden permitir vocalizaciones más claras y con mayor alcance, lo que puede ser crucial para funciones como la atracción de pareja o la defensa territorial. En contraste, los entornos con mayor ruido ambiental, podrían imponer restricciones en la calidad del sonido, forzando a las aves a modificar sus vocalizaciones para garantizar la efectividad de la comunicación[5,22]. Estos resultados destacan la importancia de considerar no sólo las características intrínsecas de las vocalizaciones, sino también las condiciones del paisaje acústico en el que estas se desarrollan. Tal como sugieren estudios recientes, la presión selectiva ejercida por el ruido ambiental y otras variables locales puede desempeñar un papel clave en la evolución de rasgos vocales en aves[22].

Llamados

En el caso de los llamados, las tres primeras dimensiones explicaron el 27.15%, 23.88% y 14.87% de la varianza, acumulando un 65.90% de la varianza total (Tabla 4). La Frecuencia Central (30.62%) y la Frecuencia Pico (26.80%) fueron las variables con mayor contribución en la Dimensión 1 (Tabla 3). En la Dimensión 2, la contribución principal provino de la Entropía Agregada (23.08%), mientras que la PFC Frecuencia Máxima (41.58%) dominó la Dimensión 3.

El análisis de los llamados de *Melanerpes rubricapillus* mostró variaciones en las características acústicas a pesar de que no se identificaron patrones geográficos consistentes en función de la latitud o la longitud. La Figura 7, que representa la relación entre CP1 (Frecuencia Central) y CP2 (Entropía Agregada), muestra una dispersión de los datos sin agrupaciones claras en función de la latitud. De manera similar, la Figura 8, que ilustra la misma relación entre CP1 y CP2 pero coloreada según la longitud, confirma la ausencia de patrones de agrupación definidos.

En cuanto a las relaciones entre las principales variables acústicas, la Figura 9 muestra la interacción entre CP1 (Frecuencia Central) y CP3 (Frecuencia Máxima). Aunque no hay patrones evidentes relacionados con la latitud, se observa cierta dispersión que podría estar vinculada a características intrínsecas o locales. La Figura 10, refuerza la idea de que estas características acústicas están influenciadas por factores específicos de cada región.

En el eje latitudinal, aunque los datos se concentran en un rango homogéneo, se observaron variaciones notables en la Entropía Agregada (CP2), lo que sugiere diferencias en la complejidad estructural de los llamados entre las poblaciones analizadas. Además, la Frecuencia Central (CP1) y la Frecuencia Máxima (CP3) también mostraron cierta variación, indicando que estas características pueden estar moduladas por factores locales o intrínsecos, más que por un gradiente latitudinal amplio, como se observa en la Figura 11.

En el eje longitudinal, aunque los datos abarcan un rango más amplio (de -80 a -65), las características acústicas no mostraron patrones claros asociados a la longitud geográfica, como se muestra en la Figura 12. Sin embargo, las variaciones observadas en la Entropía Agregada (CP2) y la Frecuencia Central (CP1) podrían estar relacionadas con condiciones locales, como la densidad del hábitat, el nivel de ruido ambiental o las dinámicas sociales específicas de cada región.

Los resultados del MANOVA confirmaron que no hubo diferencias significativas en las características acústicas de los llamados entre las regiones analizadas (Tabla 7). Esto indica que, a pesar de las variaciones observadas en algunas variables, estas no son lo suficientemente marcadas para distinguir entre poblaciones geográficamente separadas. Este hallazgo sugiere que los llamados cumplen una función comunicativa que requiere consistencia en sus propiedades acústicas para ser efectivos en diferentes contextos.

Esto subraya la importancia de los llamados como un medio de comunicación robusto y adaptativo. Esta consistencia en las propiedades acústicas, a pesar de las variaciones locales, es fundamental para funciones críticas como el reconocimiento entre individuos y la defensa territorial[5,20]. La claridad y confiabilidad de estas señales aseguran que los llamados cumplan su rol comunicativo en distintos contextos ecológicos y sociales, favoreciendo la cohesión social y la efectividad en la interacción intraespecífica[3,22].

La capacidad de *M. rubricapillus* para mantener propiedades acústicas consistentes también podría reflejar una estrategia evolutiva que prioriza la estabilidad funcional en las vocalizaciones, minimizando las interferencias que podrían surgir en paisajes acústicos complejos. Este hallazgo enfatiza cómo la consistencia en los llamados no solo facilita la comunicación efectiva, sino que también permite a las aves adaptarse a entornos cambiantes sin comprometer la claridad del mensaje[5].

Objetivo 2: Cobertura Arbórea y Características del Canto

El propósito de este análisis fue evaluar si las características acústicas de los cantos y los llamados están moduladas por el gradiente de cobertura arbórea. Este enfoque permite explorar si la densidad del hábitat afecta de manera consistente la estructura acústica de las vocalizaciones o si estas variaciones responden principalmente a otros factores ambientales o sociales.

Cantos

En el plano entre la Entropía Agregada (CP1) y el Delta Time (CP2) (Figura 14), los datos mostraron una dispersión moderada sin patrones evidentes que vinculen directamente estas variables con el gradiente de cobertura arbórea. Esto sugiere que la Entropía Agregada y el Delta Time no están fuertemente modulados por la densidad del hábitat, aunque podrían estar influidos por otros factores ambientales o sociales.

La Figura 15, que representa la relación entre la Entropía Agregada (CP1) y el Ancho de Banda al 50% (CP3), muestra una dispersión más pronunciada en el Ancho de Banda a lo largo del gradiente de cobertura arbórea. Sin embargo, es importante señalar que tanto los valores altos como los bajos de esta característica acústica están distribuidos a lo largo de todo el gradiente de cobertura arbórea.

Por otro lado, la Figura 16, que muestra el plano entre el Delta Time (CP2) y el Ancho de Banda al 50% (CP3), refuerza la idea de que el Delta Time es una característica relativamente estable frente a las variaciones en el hábitat. La dispersión de los datos en el Ancho de Banda

indica cierta variabilidad, pero esta no está asociada de manera consistente con el gradiente de cobertura arbórea.

Los resultados muestran que las características acústicas de los cantos de *Melanerpes rubricapillus* no están significativamente influenciadas por el gradiente de cobertura arbórea, lo que sugiere que factores locales, como la estructura del microhábitat, las dinámicas sociales o el ruido ambiental, desempeñan un rol más relevante en su modulación[13,20]. La estabilidad del Delta Time (CP2) refuerza la idea de que ciertas características acústicas mantienen consistencia para garantizar una comunicación efectiva, mientras que la variabilidad observada en el Ancho de Banda (CP3) podría reflejar adaptaciones a condiciones específicas del entorno[5,22].

La flexibilidad en características como la Entropía Agregada (CP1) indica que los cantos podrían estar optimizados para diferentes contextos acústicos, permitiendo una comunicación eficaz en hábitats diversos. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar variables adicionales, como el ruido ambiental o la competencia acústica, para comprender mejor los factores que moldean las vocalizaciones[3,20].

Llamados

En el plano entre la Frecuencia Central (CP1) y la Entropía Agregada (CP2) (Figura 17), se observó una variación en los valores de Entropía Agregada a lo largo del gradiente de cobertura arbórea, aunque esta variación no pareció estar asociada a niveles específicos de vegetación. Esto quiere decir que la Entropía Agregada, como medida de complejidad estructural de los llamados, presenta alta variabilidad independientemente de la densidad del hábitat.

La Figura 18, que representa el plano entre la Frecuencia Central (CP1) y la Frecuencia Máxima (CP3), revela una dispersión notable en los valores de Frecuencia Máxima. Los individuos presentan tanto valores altos como bajos a lo largo de todo el gradiente de cobertura arbórea, lo que indica que la Frecuencia Máxima varía significativamente entre las poblaciones analizadas. Sin embargo, esta variabilidad no parece estar directamente vinculada con la densidad del hábitat. Por último, en el plano entre la Entropía Agregada

(CP2) y la Frecuencia Máxima (CP3) (Figura 19), se observa una distribución dispersa de los datos sin patrones claros en relación con la cobertura arbórea.

Los llamados de *Melanerpes rubricapillus* presentan alta variabilidad en características como la Entropía Agregada y la Frecuencia Máxima, sin una asociación clara con el gradiente de cobertura arbórea. Esto sugiere que estas vocalizaciones están moduladas principalmente por factores locales, como interacciones sociales, ruido ambiental y presiones selectivas específicas[3,22]. La flexibilidad observada en estas características resalta la capacidad adaptativa de los llamados para mantener una comunicación efectiva en entornos diversos, independientemente de la densidad del hábitat[5,20].

Objetivo 3: Comparación con Otras Especies de Pájaros Carpinteros

El propósito de este análisis fue comparar las características acústicas de los cantos y llamados de *Melanerpes rubricapillus* con las de otras especies de pájaros carpinteros que se solapan en distribución, para identificar patrones de variabilidad y flexibilidad vocal. Este enfoque permite evaluar si *M. rubricapillus* está ocupando el mismo espacio sonoro o uno diferente y analizar la posibilidad de un desplazamiento acústico de las especies locales con la llegada de esta especie. Además, esta evaluación busca comprender cómo estas especies comparten o compiten por el espacio acústico y cómo pueden responder a presiones selectivas o restricciones ecológicas derivadas de la competencia inter-específica, adaptándose o modificando su repertorio vocal para maximizar su éxito ecológico en estos entornos.

Cantos

Para los cantos, las tres primeras dimensiones explicaron el 56.56% de la varianza total (Tabla 9). La primera dimensión (22.31%) estuvo dominada por la Entropía Máxima (38.53%), la Duración al 90% (37.51%) y la PFC Frecuencia Máxima (21.84%), lo que sugiere que estas características acústicas desempeñan un papel central en las variaciones observadas. La segunda dimensión (20.13%) reflejó principalmente la influencia de la Frecuencia Central (18.50%) mientras que la tercera dimensión (14.77%) destacó la contribución del Ancho de Banda 50% (39.18%).

El análisis de componentes principales (PCA) aplicado a las características acústicas de los cantos mostró variaciones específicas entre las especies estudiadas, con patrones diferenciados en función de las dimensiones analizadas. En el primer gráfico (Figura 20), se evidenció una notable variación en la Frecuencia Pico (CP1) para *Melanerpes rubricapillus* y *Leuconotopicus fumigatus*, lo que sugiere que estas especies emplean un rango más amplio de frecuencias en sus cantos. Por el contrario, otras especies, como *Colaptes punctigula* y *Picumnus squamulatus*, mostraron una menor variación en esta característica. La dispersión observada en la Frecuencia Pico destaca la importancia de esta característica acústica para diferenciar las vocalizaciones entre especies en un paisaje sonoro compartido.

En el segundo gráfico (Figura 21), que analiza la relación entre el Ancho de Banda 50% (CP3) y la Frecuencia Central (CP1), se observó una variación generalizada en el Ancho de Banda para todas las especies, aunque con diferencias en el grado de dispersión. Especies como *Dryocopus lineatus* y *Melanerpes formicivorus* exhibieron una menor variación en comparación con otras, indicando un rango más restringido en esta característica acústica. En contraste, *Picumnus squamulatus* y *Melanerpes rubricapillus* mostraron una mayor amplitud en el uso del Ancho de Banda.

El tercer gráfico (Figura 22) muestra la interacción entre el Ancho de Banda 50% (CP3) y Delta Time (CP2), destacando patrones de variación entre las especies. Se observa que especies como *Melanerpes rubricapillus* y *Picumnus squamulatus* ocupan un espacio acústico más amplio, con valores dispersos que reflejan una mayor flexibilidad en estas características. Por otro lado, *Dryocopus lineatus* y *Leuconotopicus fumigatus* muestran una menor dispersión, lo que podría indicar limitaciones en su rango acústico o una mayor consistencia en sus vocalizaciones.

Los cantos de *Melanerpes rubricapillus* destacan por su alta variabilidad en características como la Frecuencia Pico y el Ancho de Banda, lo que refleja su flexibilidad vocal en comparación con otras especies de pájaros carpinteros. Esta adaptabilidad permite a la especie ocupar un espacio acústico más amplio y mantener una comunicación efectiva en paisajes sonoros compartidos, incluso en contextos de solapamiento acústico significativo[3,22].

La dispersión observada en el Ancho de Banda resalta cómo *M. rubricapillus* se adapta a presiones selectivas específicas, diferenciándose de especies con rangos acústicos más restringidos, como *Dryocopus lineatus*. Estas características son esenciales para minimizar interferencias y asegurar la transmisión de información en entornos acústicamente complejos[5,20].

Llamados

En los llamados, las tres primeras dimensiones explicaron el 58.52% de la varianza total (Tabla 11). La primera dimensión (25.97%) estuvo influenciada principalmente por la Frecuencia Central (28.09%), la PFC Frecuencia Máxima (22.51%) y la Frecuencia Pico (21.25%), destacando la relevancia de las frecuencias como características centrales en las vocalizaciones. La segunda dimensión (17.40%) mostró una fuerte contribución del Ancho de Banda al 50% (35.93%), mientras que la tercera dimensión (15.51%) estuvo dominada por la Duración al 90% (32.93%).

El análisis de componentes principales (PCA) reveló patrones claros en la variabilidad de las características acústicas de los llamados de las especies estudiadas (Figura 23). En este gráfico se observa la relación entre la Frecuencia Central (CP1) y el Ancho de Banda 50% (CP3), con una dispersión que varía entre las especies, reflejando diferencias en la flexibilidad vocal. Especies como *Leuconotopicus fumigatus* y *Melanerpes rubricapillus* destacan por su amplia variación en ambas dimensiones, lo que sugiere una mayor adaptabilidad en sus vocalizaciones, posiblemente en respuesta a contextos ambientales y sociales específicos.

En el primer gráfico adicional (Figura 24), se observa la relación entre la Frecuencia Central (CP1) y la Duración 90% (CP2). Aquí, *Melanerpes rubricapillus* muestra una amplia variación en ambas dimensiones, lo que refuerza su destacada flexibilidad acústica. Por el contrario, *Melanerpes formicivorus* exhibe una menor dispersión, indicando una mayor consistencia en estas características. Estas diferencias podrían estar vinculadas a estrategias específicas de comunicación o a restricciones ecológicas en sus respectivos hábitats.

El segundo gráfico (Figura 25) ilustra la interacción entre el Ancho de Banda (CP3) y la Duración 90% (CP2). En esta figura, todas las especies muestran cierta dispersión, pero *Melanerpes rubricapillus* y *Leuconotopicus fumigatus* presentan una mayor amplitud en sus variaciones, destacando su capacidad para modular estas características acústicas. En contraste, *Melanerpes formicivorus* exhibe una menor variación en la Duración 90%, lo que sugiere una estructura más fija en sus vocalizaciones.

En general, los resultados reflejan que las especies no solo exhiben variabilidad dentro de atributos específicos, sino que estas variaciones están diferenciadas entre las especies . Esto refuerza la idea de que el contexto ecológico y las presiones selectivas podrían moldear las características acústicas de los llamados.

Los llamados de *Melanerpes rubricapillus* y *Leuconotopicus fumigatus* destacan por su alta variabilidad en características como la Frecuencia Central y el Ancho de Banda, lo que refleja su flexibilidad vocal y capacidad adaptativa para comunicarse en paisajes acústicos compartidos[3,22]. Esta flexibilidad les permite responder a presiones selectivas locales y minimizar interferencias en contextos de solapamiento acústico.

En contraste, especies como *Melanerpes formicivorus* exhiben menor variabilidad, indicando estrategias de comunicación más consistentes que podrían estar asociadas a hábitats menos dinámicos[20]. Estas diferencias subrayan cómo el contexto ecológico y las presiones selectivas moldean las características vocales para favorecer la coexistencia entre especies[13].

Conclusiones

Este estudio analizó las vocalizaciones del Carpintero Habado (*Melanerpes rubricapillus*) para comprender cómo factores geográficos, ambientales y sociales influyen en sus características acústicas. Los análisis mostraron que variables como la Frecuencia Central, la Entropía Agregada y el Ancho de Banda al 50% son las principales contribuyentes a la diferenciación acústica. Sin embargo, no se encontraron patrones consistentes asociados a gradientes geográficos amplios, como la latitud o la longitud, lo que sugiere que las variaciones acústicas están más relacionadas con factores locales, como el ruido ambiental y las dinámicas sociales.

El impacto de la cobertura arbórea fue limitado, sin una relación directa con las características acústicas analizadas. Esto refuerza la idea de que las vocalizaciones son altamente plásticas y se adaptan más a condiciones locales específicas que a gradientes ambientales amplios. En el caso de los cantos, no se observó una relación significativa entre la cobertura arbórea y variables como la Entropía Agregada o el Delta Time, mientras que en los llamados, aunque hubo una dispersión notable en la Frecuencia Máxima y la Entropía Agregada, esta no estuvo asociada a niveles específicos de cobertura. Estos hallazgos sugieren que factores como las interacciones sociales o la estructura microhabitual tienen un mayor peso en la modulación de estas características.

Además, el análisis reveló un solapamiento acústico entre *M. rubricapillus* y otras especies de pájaros carpinteros que comparten hábitat, destacando la flexibilidad acústica de esta especie como una posible estrategia adaptativa en paisajes sonoros compartidos. *M. rubricapillus* mostró una mayor amplitud en el uso del Ancho de Banda y la Frecuencia Pico en comparación con especies como *Dryocopus lineatus* o *Melanerpes formicivorus*, lo que podría indicar una respuesta adaptativa para minimizar interferencias acústicas en entornos compartidos.

Los análisis estadísticos, incluyendo un MANOVA, confirmaron diferencias significativas en algunas variables entre países para los cantos, como el SNR NIST Quick, con valores más altos en Costa Rica. Estas diferencias reflejan cómo el ruido ambiental influye en la comunicación intraespecífica y subrayan la importancia de considerar factores externos en el estudio de las vocalizaciones.

Este trabajo cumplió sus objetivos principales, ampliando el conocimiento sobre la bioacústica de *M. rubricapillus* y destacando el valor de las vocalizaciones como herramienta para el monitoreo y la conservación. Sin embargo, persisten preguntas abiertas, como los mecanismos específicos detrás de la plasticidad acústica observada, su impacto en el éxito reproductivo y cómo el solapamiento acústico afecta la dinámica interespecífica. Explorar estas áreas permitirá profundizar en la comprensión de los procesos evolutivos y las presiones selectivas que moldean la comunicación vocal en aves. En conjunto, este estudio proporciona

una base sólida para futuras investigaciones y estrategias de manejo en un contexto de crecientes desafíos ambientales

.

Bibliografía

1. Zazueta-Algara, J. D. J., Sosa-López, J. R., Coro Arizmendi, M. Del & Navarro-Sigüenza, A. G. Structure and divergence of vocal traits in the Acorn Woodpecker (*Melanerpes formicivorus*). Wilson Journal of Ornithology 134, 1–18 (2022).

2. Węgrzyn, E., Węgrzyn, W. & Leniowski, K. Contact calls in woodpeckers are individually distinctive, show significant sex differences and enable mate recognition. Sci Rep 11, (2021).

3. Podos, J. & Webster, M. Ecology and evolution of bird sounds. Current Biology (2022).

4. Węgrzyn, E. & Leniowski, K. Middle Spotted Woodpecker territory owners distinguish between stranger and familiar floaters based on their vocal characteristics. European Zoological Journal 87, 58–72 (2020).

5. Lewis, R. N., Williams, L. J. & Gilman, R. T. The uses and implications of avian vocalizations for conservation planning. Conservation Biology vol. 35 50–63 Preprint at https://doi.org/10.1111/cobi.13465 (2021).

6. Vidaña-Vila, E., Navarro, J., Alsina-Pagès, R. M. & Ramírez, Á. A two-stage approach to automatically detect and classify woodpecker (Fam. Picidae) sounds. Applied Acoustics 166, (2020).

7. Jablonszky, M. et al. The effect of social environment on bird song: listener-specific expression of a sexual signal. Behavioral Ecology 32, 395–406 (2021).

8. Garcés-Restrepo, M. et al. Expansión de la distribución y datos ecológicos del Carpintero Habado (*Melanerpes rubricapillus*) en el valle del río Cauca, Colombia. Ornitología Colombiana (2013).

9. University of Toronto. What Is Sound? https://www.cs.toronto.edu/~gpenn/csc401/soundASR.pdf.

10. Mohan Basnet. How does sound travel? (2023).

11. Princeton University. How Sound Propagates. https://assets.press.princeton.edu/chapters/s9912.pdf.

12. Buckingham, M. J. Sound Propagation. in Applied Underwater Acoustics 85–184 (Elsevier, 2017). doi:10.1016/B978-0-12-811240-3.00002-3.

13. Sutherland, L. & Daigle, G. Atmospheric Sound Propagation. in Handbook of Acoustics 305–327 (Wiley-Interscience Publication, Nueva York, 1998).

14. Hannah, L. The Effect of Environment on Sound Propagation. Factors Affecting Outdoor Sound Propagation https://www.acoustics.org.nz/sites/www.acoustics.org.nz/files/journal/pdfs/Hannah_L_NZA2007_b.pdf (2006).

15. Iowa State University. Sound. https://www.nde-ed.org/Physics/Sound/dopplereffect.xhtml.

16. Mcloughlin, M. P., Stewart, R. & McElligott, A. G. Automated bioacoustics: methods in ecology and conservation and their potential for animal welfare monitoring. J R Soc Interface 16, 20190225 (2019).

17. Xeno-canto. ¿Qué es Xeno-canto? https://xeno-canto.org/.

18. Xeno-canto. Grabaciones. https://xeno-canto.org/explore?query=Melanerpes+rubricapillus&pg=1.

19. K. Lisa Yang Center for Conservation Bioacoustics at the Cornell Lab of Ornithology. (2024). Raven Pro: Interactive Sound Analysis Software (Version 1.6.5) [Computer software]. Ithaca, NY: The Cornell Lab of Ornithology. Available from https://www.ravensoundsoftware.com/.

20. Kumar, A. Acoustic communication in birds. Resonance 8, 44–55 (2003).

21. Koetz, A. H., Westcott, D. A. & Congdon, B. C. Geographical variation in song frequency and structure: the effects of vicariant isolation, habitat type and body size. Anim Behav 74, 1573–1583 (2007).

22. Brumm, H. & Naguib, M. Chapter 1 Environmental Acoustics and the Evolution of Bird Song. in 1–33 (2009). doi:10.1016/S0065-3454(09)40001-9.

Referencias

1. Penar, W., Magiera, A. & Klocek, C. Applications of bioacoustics in animal ecology. Ecological Complexity 43, 100847 (2020).

2. Martinez Medina, D. et al. Estado, desarrollo y tendencias de los estudios en acústica de la fauna en Colombia. Biota Colomb 22, (2021).

3. Barreira, A. S. & García, N. C. Visual and Acoustic Communication in Neotropical Birds: Diversity and Evolution of Signals. in Behavioral Ecology of Neotropical Birds 155–183 (Springer International Publishing, Cham, 2019). doi:10.1007/978-3-030-14280-3_8.

4. Max Planck Institute for Biological Intelligence. Effects of Noise and Light Pollution on Bird Communication. https://www.bi.mpg.de/1507106/Urban-Bird-Communication.

5. Mayntz, M. Woodpecker Sounds: An Intro to Drumming, Calls, and More. American Bird Conservancy (2020).

6. Goldman, J. Woodpecker Head Bangs Communicate Info. Scientific American (2016).

7. Schuppe, E. R., Rutter, A. R., Roberts, T. J. & Fuxjager, M. J. Evolutionary and Biomechanical Basis of Drumming Behavior in Woodpeckers. Front Ecol Evol 9, (2021).

8. Turner, K., Gorman, G. & Alder, D. The acoustic communication of the Eurasian Green Woodpecker (Picus viridis). Ornis Hungarica 30, 10–32 (2022).

9. Banco de la República. Melanerpes rubricapillus. Biblioteca virtual (2016).

10. Short, L. Woodpeckers of the World. vol. 4 (American Museum of Natural History, Nueva York, 1982).

11. Universidad EAFIT. Carpintero Habado.

12. Donoso, M., García, G., Gargallo, P. & Martínez, A. Audacity: Efectos básicos II. https://www.tuinstitutoonline.com/cursos/audacity_v1606/07efectos_basicos2.php (2021).

13. Moussaoui, B., Overcashier, S. L., Kohn, G. M., Araya-Salas, M. & Wright, T. F. Evidence for maintenance of key components of vocal learning in ageing budgerigars despite diminished affiliative social interaction. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 290, (2023).

14. r-project. ohun: Optimizing Acoustic Signal Detection. https://cran.r-project.org/web/packages/ohun/index.html.

15. r-project. warbleR: Streamline Bioacoustic Analysis. https://cran.r-project.org/web/packages/warbleR/index.html.

16. Asociación Colombiana de Ornitología. Lista de referencia de especies de aves de Colombia - 2022. https://ipt.biodiversidad.co/sib/resource?r=aco_listaavescolombia2017 (2022).

17. BirdLife International. Avibase - Listas de Aves del Mundo Panamá. https://avibase.bsc-eoc.org/checklist.jsp?region=pa&list=ebird&lang=ES (2024).

18. BirdLife International. Avibase - Listas de Aves del Mundo Venezuela. https://avibase.bsc-eoc.org/checklist.jsp?region=ve&list=sacc&lang=ES&synlang=ESVE (2024).

19. Animalia. AVES DE TRINIDAD Y TOBAGO. https://animalia.bio/es/lists/country/birds-of-trinidad-and-tobago.

20. Comité de Especies Raras y Registros Ornitológicos de Costa Rica. Lista Oficial de las Aves de Costa Rica. https://listaoficialavesdecostarica.wordpress.com/lista-oficial/lista-oficial-online/ (2024).

21. WorldClim. Global climate and weather data. https://www.worldclim.org/data/index.html.

22. Fernández, L. Ejercicio ANOVA de dos vías. RPubs https://rpubs.com/luis_fernandez_bernal/anova_2_vias#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20de%20varianza%20de,cada%20uno%20con%20varios%20niveles. (2018).

23. Datatab. Prueba de Kruskal-Wallis. https://datatab.es/tutorial/kruskal-wallis-test (2024).

24. Priyadarshani, N., Castro, I. & Marsland, S. The impact of environmental factors in birdsong acquisition using automated recorders. Ecol Evol 8, 5016–5033 (2018).

25. SENEN GROUP. The Environmental Impact of Data: Strategies for Sustainability. https://senengroup.com/sustainability/the-environmental-impact-of-data/#:~:text=Storing%201%20terabyte%20of%20data,power%20banks%2C%20and%20computer%20servers. (2024).

Gráficos Objetivo 1

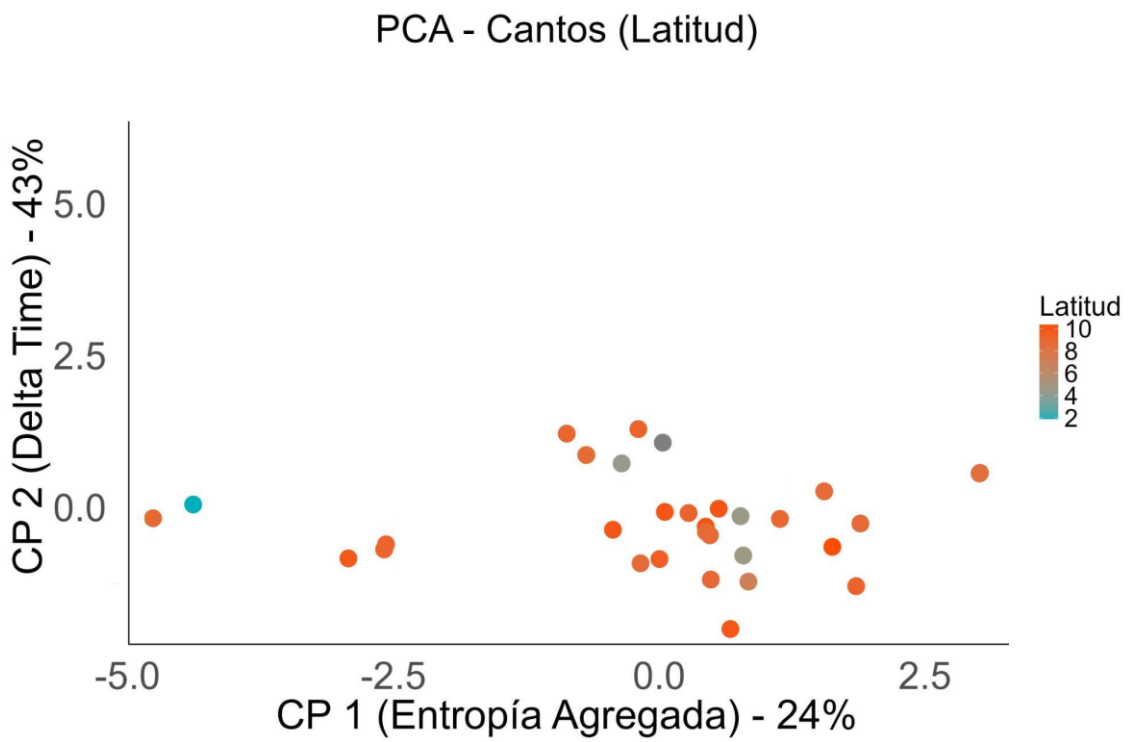


Figura 1. Análisis de Componentes Principales (PCA) de los cantos de *Melanerpes rubricapillus* en relación con la latitud. El gráfico muestra la relación entre los componentes principales CP1 (Entropía Agregada) y CP2 (Delta Time), que explican el 24% y 43% de la varianza, respectivamente. Los puntos están coloreados según la latitud, donde tonos más cálidos representan latitudes más altas. No se observan patrones claros de agrupación en función de la latitud, lo que sugiere que las variaciones en estas características acústicas están más influenciadas por factores locales que por gradientes geográficos amplios.

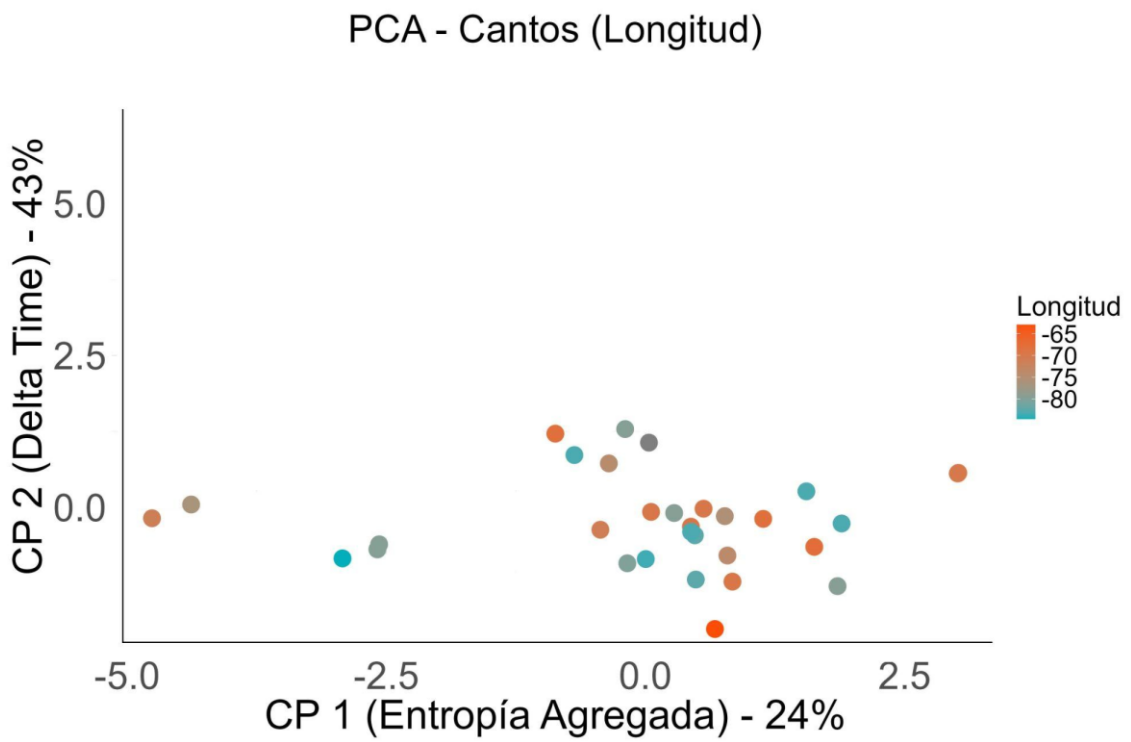


Figura 2: Análisis de Componentes Principales (PCA) de los cantos de *Melanerpes rubricapillus* en relación con la longitud. El gráfico ilustra la relación entre los componentes principales CP1 (Entropía Agregada) y CP2 (Delta Time), explicando el 24% y 43% de la varianza, respectivamente. Los puntos están coloreados según la longitud geográfica, donde tonos más cálidos indican longitudes más bajas. No se identifican patrones claros de agrupación basados en la longitud, lo que sugiere que las variaciones en las características acústicas de los cantos están determinadas principalmente por factores locales más que por gradientes longitudinales amplios.

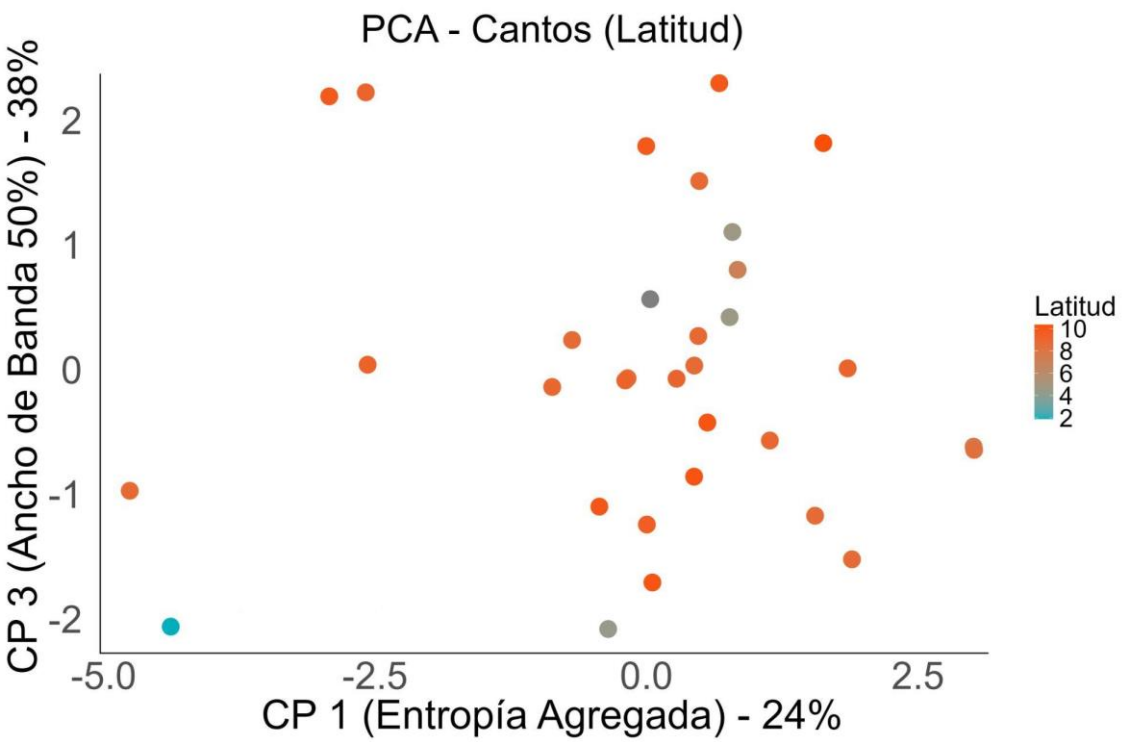


Figura 3. Análisis de Componentes Principales (PCA) de los cantos de *Melanerpes rubricapillus* en relación con la latitud. El gráfico muestra la relación entre CP1 (Entropía Agregada) y CP3 (Ancho de Banda al 50%), explicando el 24% y 38% de la varianza, respectivamente. Los puntos están coloreados según la latitud, donde tonos más cálidos representan latitudes mayores. No se observan patrones claros de agrupación relacionados con la latitud, lo que sugiere que las características acústicas del canto responden más a factores locales que a gradientes latitudinales amplios.

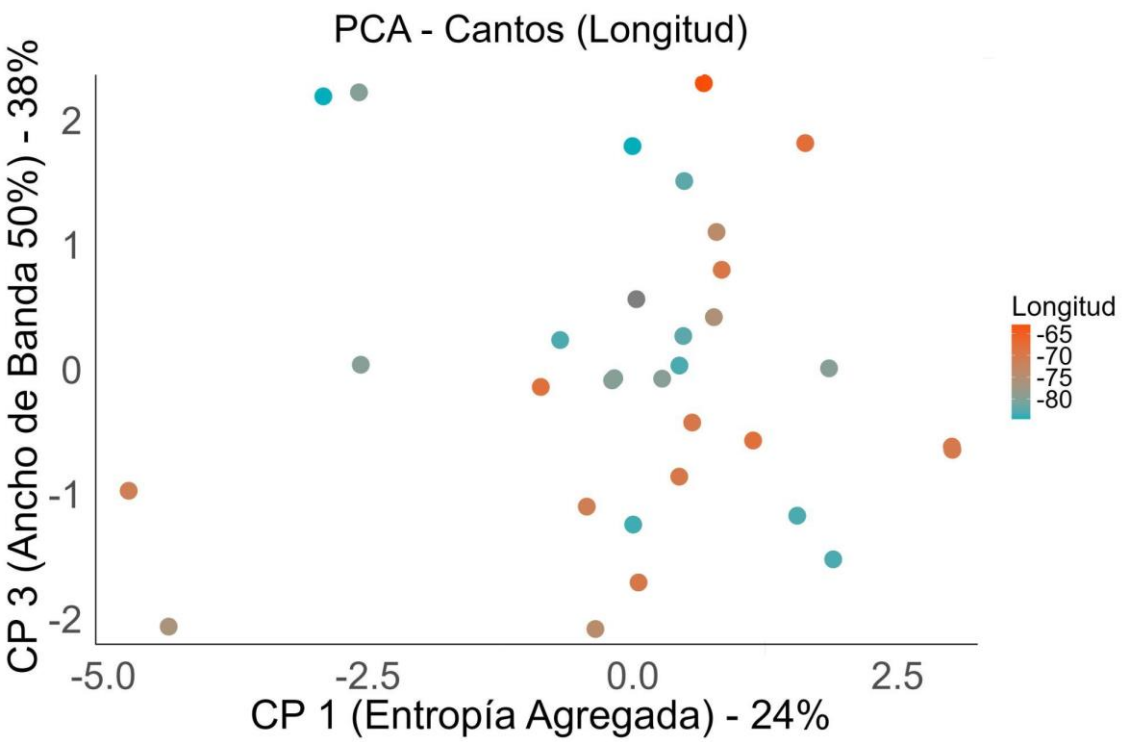


Figura 4. Análisis de Componentes Principales (PCA) de los cantos de *Melanerpes rubricapillus* en relación con la longitud. El gráfico ilustra la relación entre CP1 (Entropía Agregada) y CP3 (Ancho de Banda al 50%), explicando el 24% y 38% de la varianza, respectivamente. Los puntos están coloreados según la longitud, con tonos más cálidos representando longitudes mayores. No se identifican patrones evidentes de agrupación relacionados con la longitud, sugiriendo que las variaciones en las características acústicas están influenciadas más por factores locales que por gradientes longitudinales amplios.

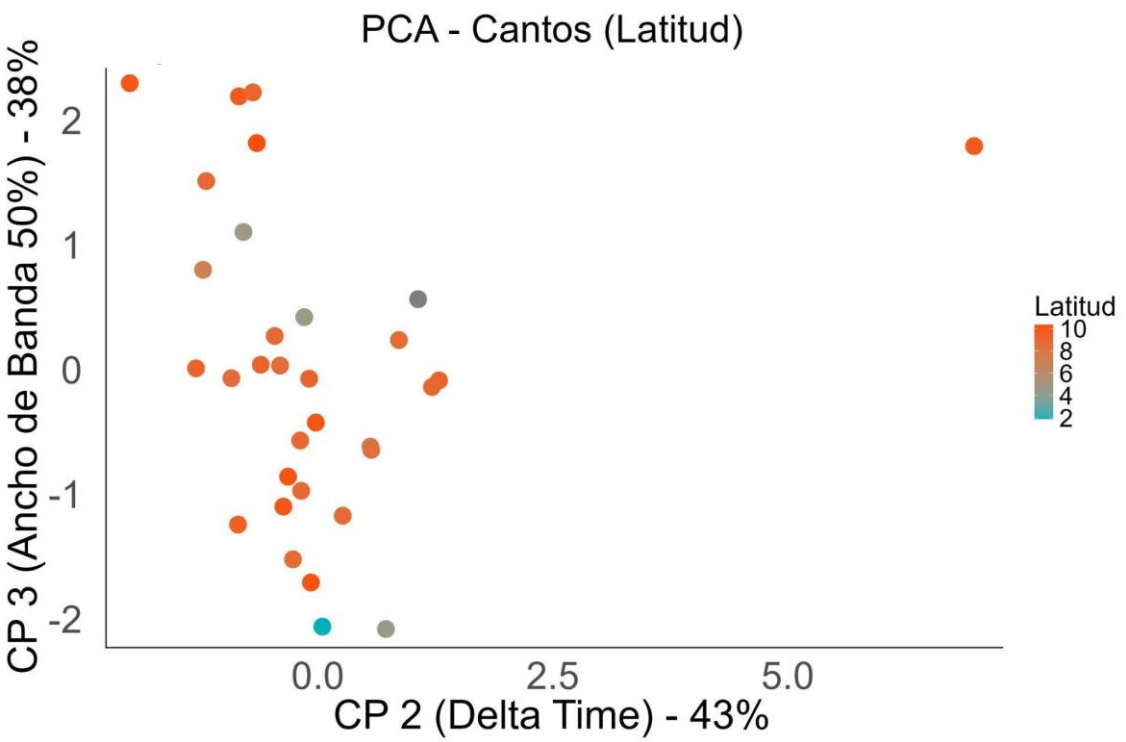


Figura 5. Análisis de Componentes Principales (PCA) de los cantos de *Melanerpes rubricapillus* en relación con la latitud. Este gráfico muestra la relación entre CP2 (Delta Time) y CP3 (Ancho de Banda al 50%), explicando el 43% y 38% de la varianza, respectivamente. Los puntos están coloreados según la latitud, con tonos más cálidos representando latitudes mayores. No se observan agrupaciones claras relacionadas con la latitud, lo que sugiere que las características acústicas de los cantos están más influenciadas por factores locales que por gradientes latitudinales amplios.

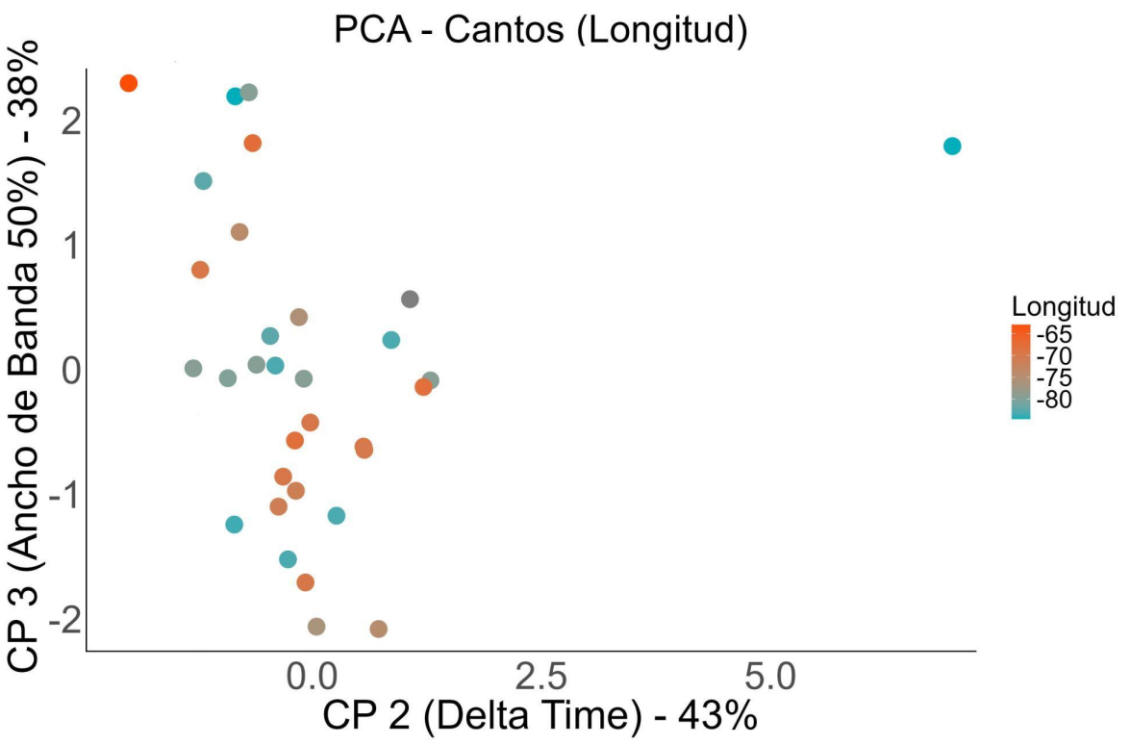


Figura 6. Análisis de Componentes Principales (PCA) de los cantos de *Melanerpes rubricapillus* en relación con la longitud. Este gráfico compara CP2 (Delta Time) y CP3 (Ancho de Banda al 50%), que explican el 43% y 38% de la varianza, respectivamente. Los puntos están coloreados según la longitud geográfica, con tonos más cálidos representando longitudes mayores. No se identifican patrones consistentes relacionados con la longitud, indicando que las variaciones acústicas de los cantos están más influenciadas por factores locales que por gradientes longitudinales.

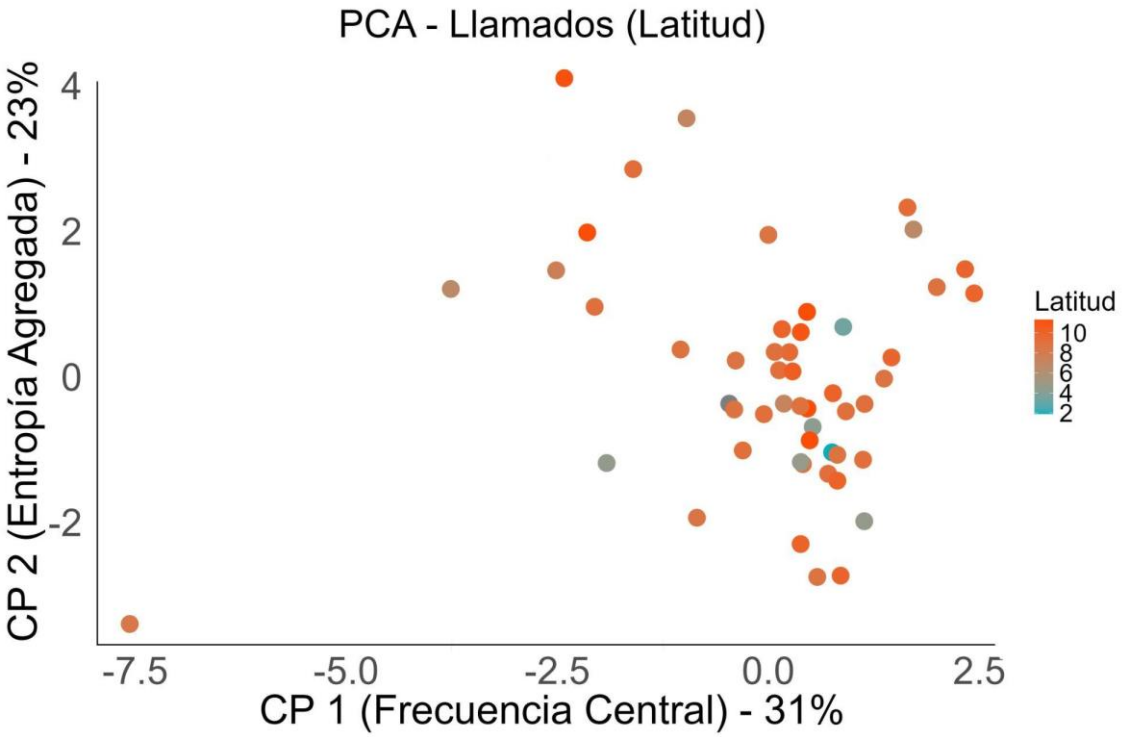


Figura 7. Análisis de Componentes Principales (PCA) de los llamados de *Melanerpes rubricapillus* en relación con la latitud. El gráfico muestra la relación entre CP1 (Frecuencia Central) y CP2 (Entropía Agregada), que explican el 31% y el 23% de la varianza, respectivamente. Los puntos están coloreados según la latitud, con tonos más cálidos representando latitudes más altas. No se identifican patrones claros de diferenciación acústica asociados a la latitud, lo que sugiere que las características de los llamados están influenciadas principalmente por factores locales o sociales en lugar de gradientes geográficos amplios.

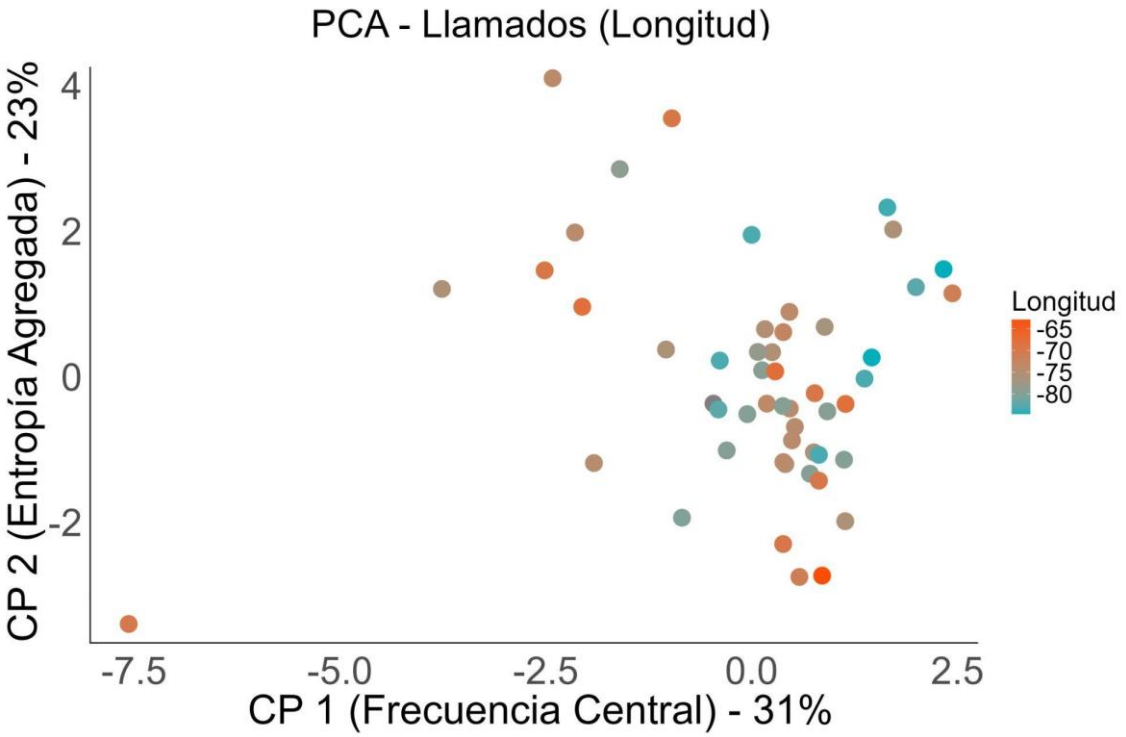


Figura 8. Análisis de Componentes Principales (PCA) de los llamados de *Melanerpes rubricapillus* en relación con la longitud. El gráfico presenta la distribución de CP1 (Frecuencia Central) y CP2 (Entropía Agregada), que explican el 31% y el 23% de la varianza, respectivamente. Los puntos están coloreados según la longitud, con tonos más cálidos indicando longitudes más occidentales. No se observan patrones claros de diferenciación acústica asociados a la longitud, lo que sugiere que las características de los llamados están influenciadas principalmente por factores locales o sociales, más que por gradientes longitudinales amplios.

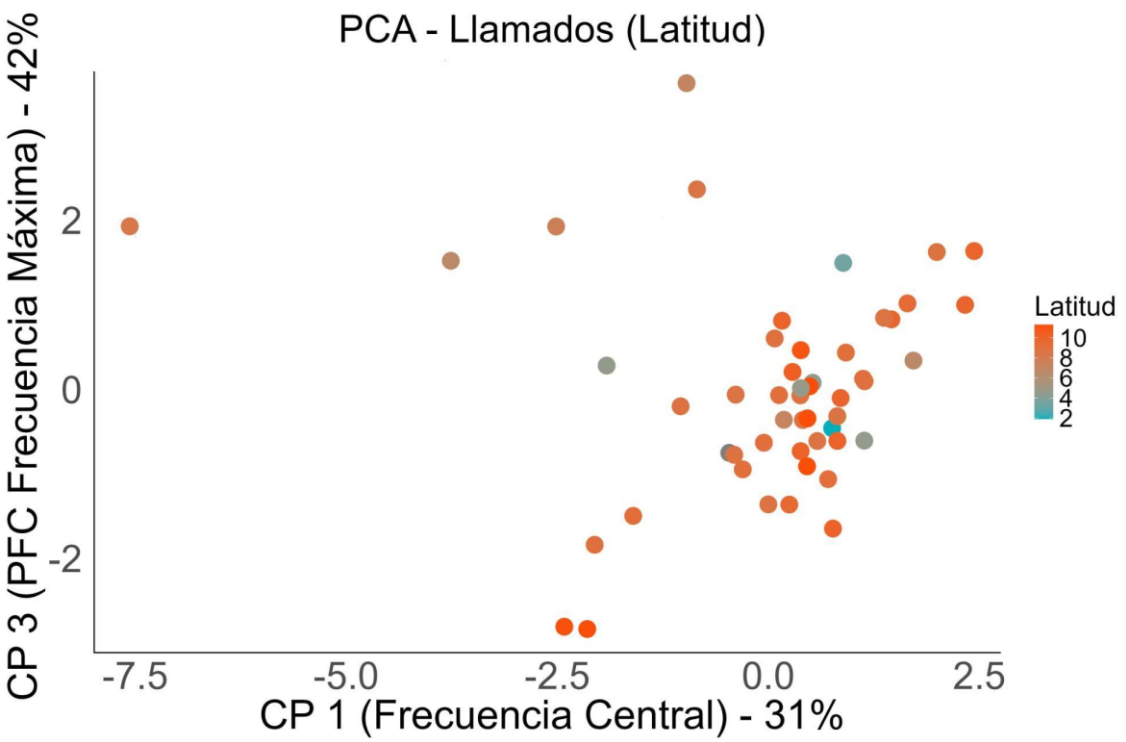


Figura 9. Análisis de Componentes Principales (PCA) de los llamados de *Melanerpes rubricapillus* en relación con la latitud. Este gráfico muestra la distribución de los componentes principales CP1 (Frecuencia Central) y CP3 (Frecuencia Máxima PFC), explicando el 31% y 42% de la varianza, respectivamente. Los puntos están coloreados según la latitud, con tonos más cálidos representando latitudes más altas. Aunque hay una dispersión evidente en las frecuencias máximas, no se observan patrones consistentes asociados con la latitud, lo que sugiere que las características de los llamados están influidas principalmente por factores locales o sociales, más que por gradientes latitudinales amplios.

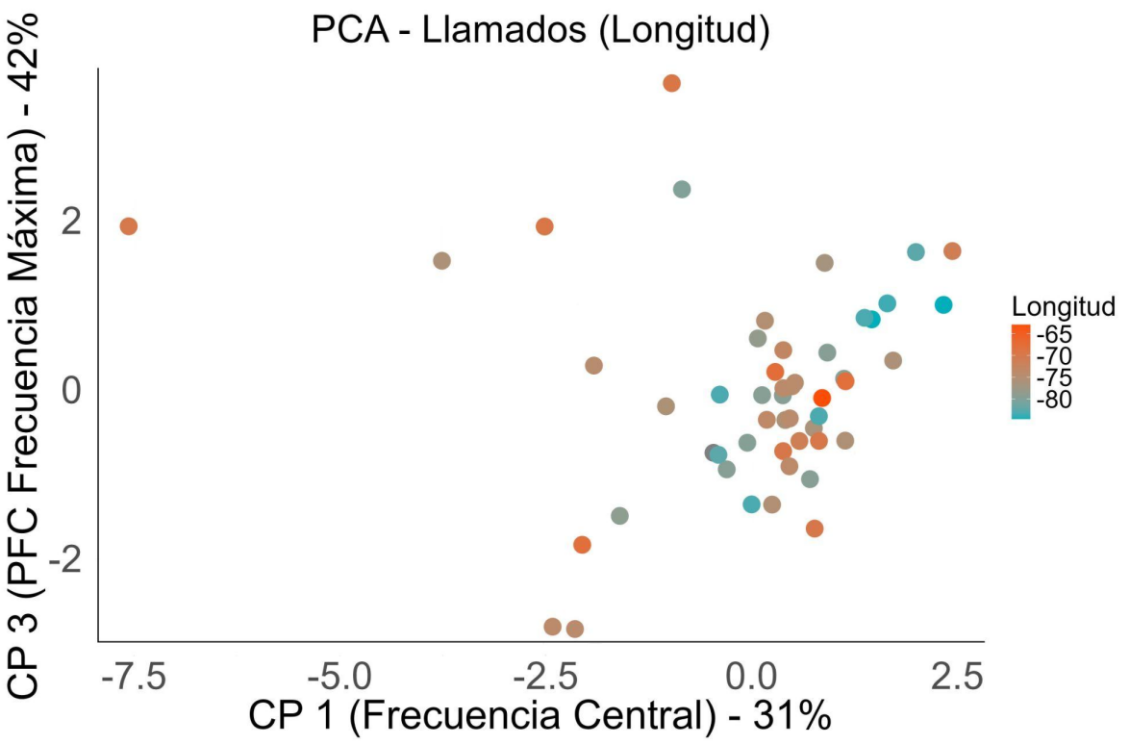


Figura 10. Análisis de Componentes Principales (PCA) de los llamados de *Melanerpes rubricapillus* en relación con la longitud. Este gráfico explora la distribución de los componentes principales CP1 (Frecuencia Central) y CP3 (Frecuencia Máxima PFC), que explican el 31% y el 42% de la varianza, respectivamente. Los puntos están coloreados según los valores de longitud, con tonos más cálidos indicando longitudes mayores. A pesar de la dispersión en las frecuencias, no se identificaron patrones evidentes vinculados a gradientes longitudinales, lo que refuerza la hipótesis de que las características de los llamados son moldeadas predominantemente por factores locales o sociales.

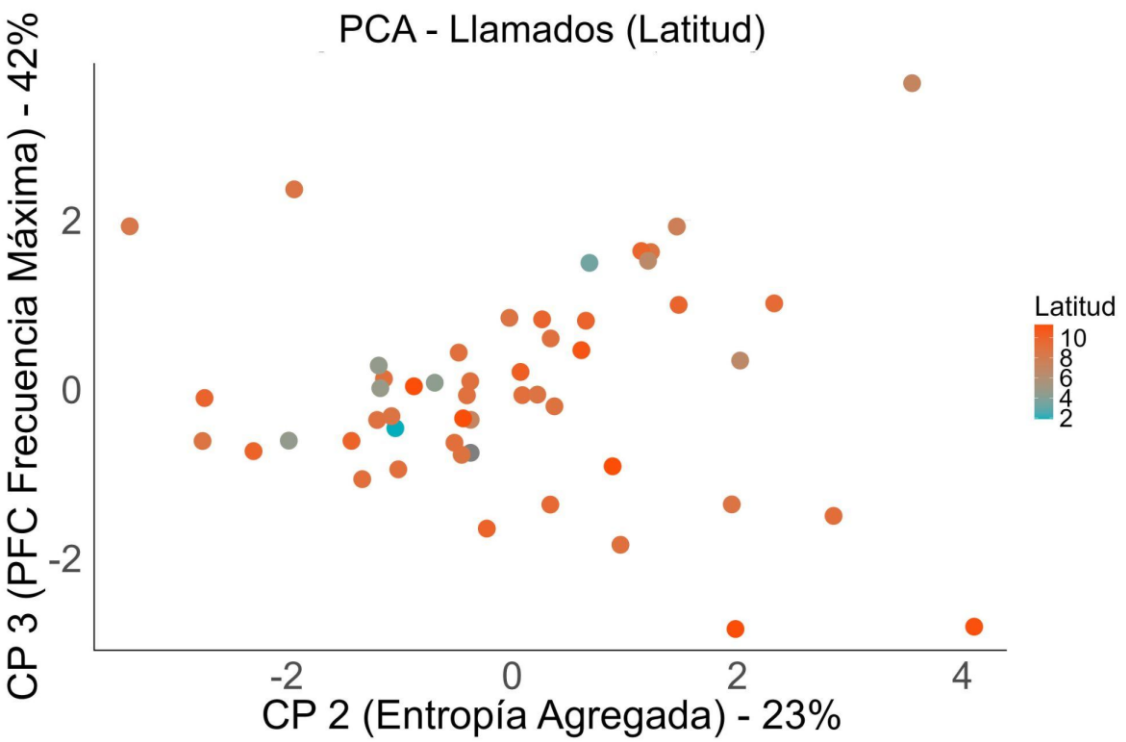


Figura 11. Análisis de Componentes Principales (PCA) de los llamados de *Melanerpes rubricapillus* en función de la latitud. Este gráfico muestra la distribución de los componentes principales CP2 (Entropía Agregada) y CP3 (Frecuencia Máxima PFC), que explican el 23% y el 42% de la varianza, respectivamente. Los puntos están coloreados según la latitud, con tonos cálidos indicando valores más altos. Aunque se observa cierta variabilidad en las frecuencias y la entropía, no se detectaron patrones claros asociados a gradientes latitudinales, sugiriendo que las características acústicas de los llamados están influenciadas principalmente por factores locales o interacciones sociales específicas.

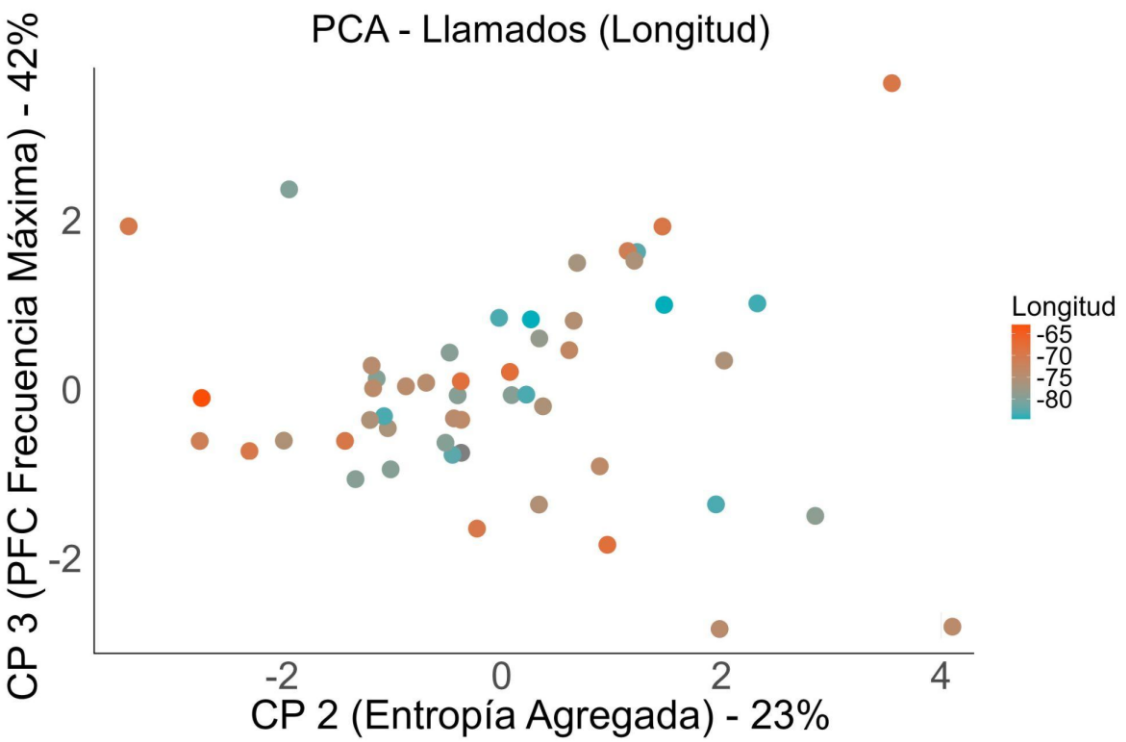


Figura 12. Análisis de Componentes Principales (PCA) de los llamados de *Melanerpes rubricapillus* en función de la longitud. Este gráfico ilustra la relación entre CP2 (Entropía Agregada) y CP3 (Frecuencia Máxima PFC), explicando el 23% y el 42% de la varianza, respectivamente. Los puntos están coloreados según la longitud, donde tonos cálidos representan valores mayores. Aunque hay una dispersión en las características acústicas, no se evidencian patrones claros relacionados con gradientes longitudinales amplios. Estos resultados sugieren que las variaciones acústicas en los llamados pueden depender más de condiciones locales o sociales que de factores geográficos extensos.

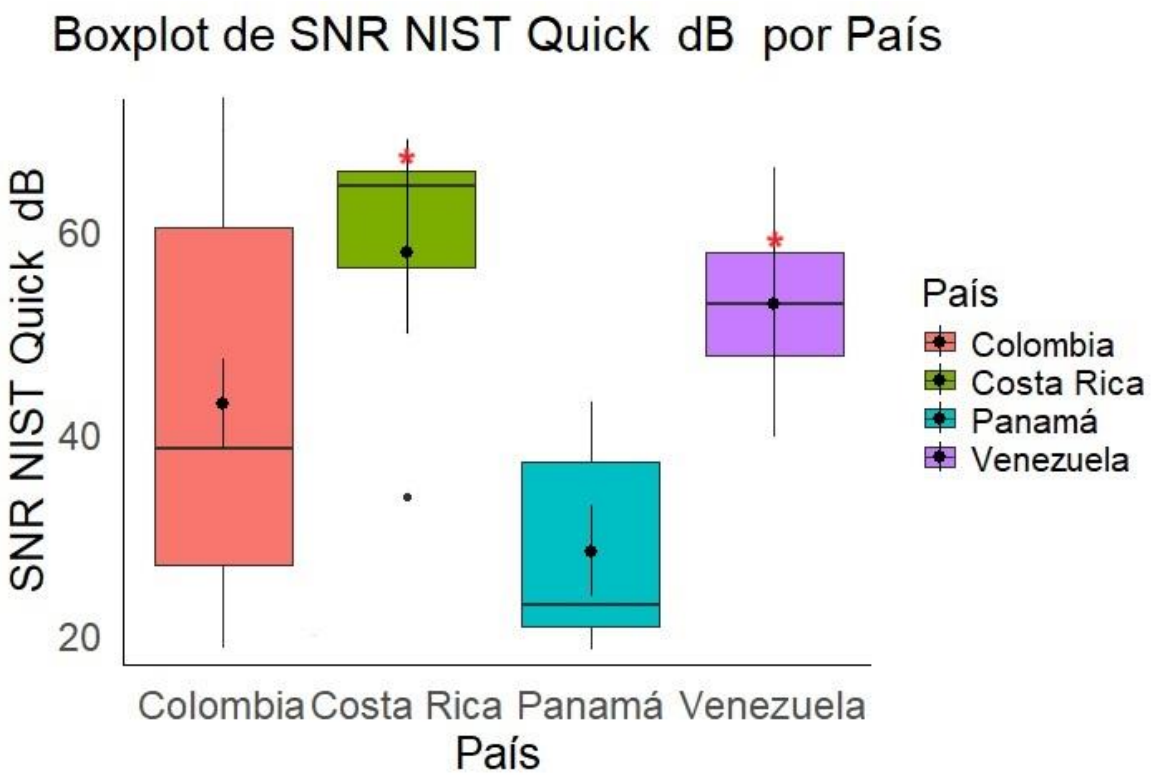


Figura 13. Boxplot del SNR NIST Quick (dB) en los cantos de *Melanerpes rubricapillus* por país. Este gráfico compara los niveles de señal a ruido (SNR) medidos en decibelios entre Colombia, Costa Rica, Panamá y Venezuela. Costa Rica presenta los valores más altos, indicando una mejor calidad acústica relativa en comparación con los otros países, mientras que Panamá tiene los valores más bajos. El asterisco rojo en el gráfico señala que existen diferencias significativas con respecto a la media en los países marcados, según el análisis estadístico realizado. Las diferencias observadas resaltan el impacto del ruido ambiental en la calidad de las vocalizaciones, influyendo potencialmente en la comunicación en diferentes regiones.

Gráficos Objetivo 2

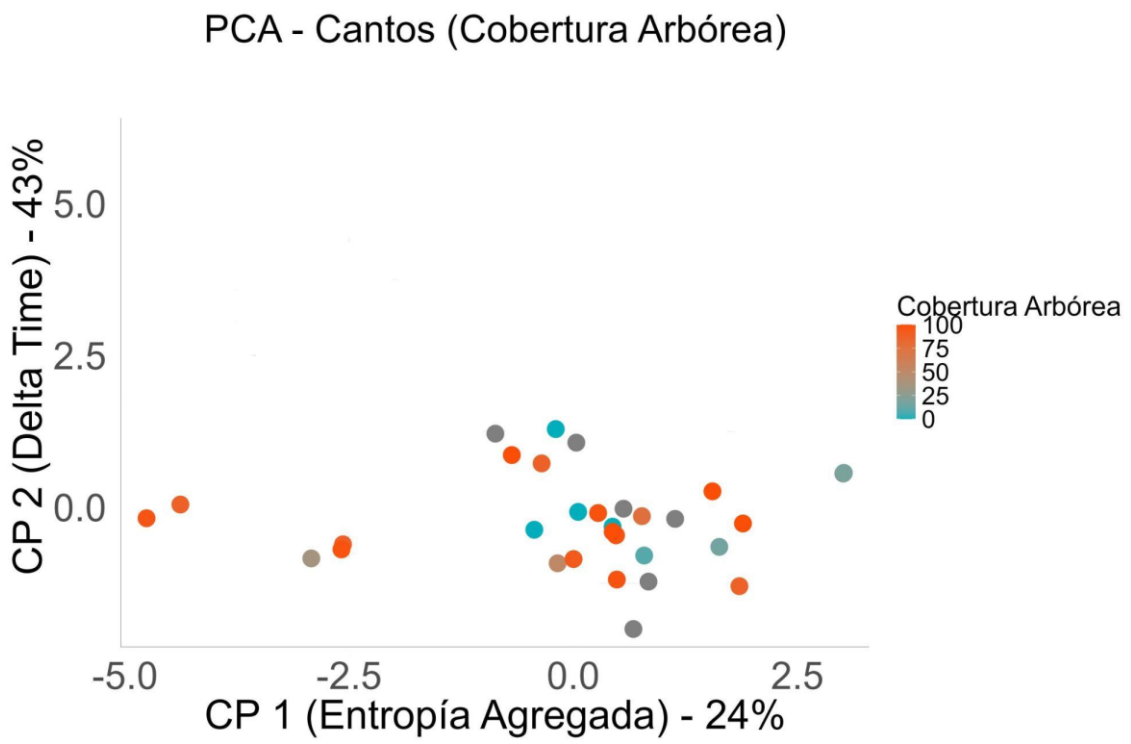


Figura 14. PCA de Cantos según Cobertura Arbórea. El análisis de componentes principales (PCA) muestra la relación entre las características acústicas de los cantos de *Melanerpes rubricapillus* y la cobertura arbórea (representada por la escala de color). Los ejes CP1 y CP2 representan el 24% y el 43% de la varianza total, respectivamente. Aunque hay dispersión en las variables acústicas, no se observan patrones claros relacionados con la cobertura arbórea, lo que sugiere que otros factores locales, como el ruido ambiental y las interacciones sociales, podrían tener mayor influencia en las características de los cantos.

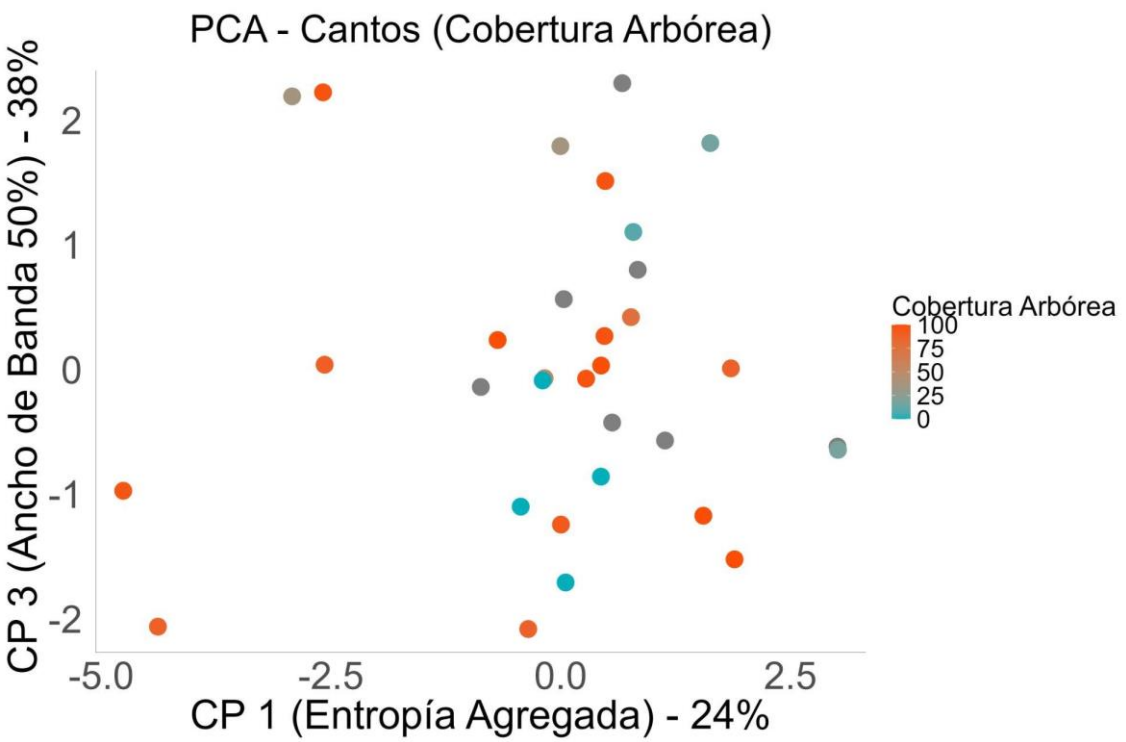


Figura 15. PCA de Cantos según Cobertura Arbórea. El gráfico muestra un análisis de componentes principales (PCA) para los cantos de *Melanerpes rubricapillus*, evaluando su relación con la cobertura arbórea (indicada por la escala de color). Los ejes CP1 y CP3 explican el 24% y el 38% de la varianza total, respectivamente. La distribución de los puntos indica que no hay una correlación evidente entre la cobertura arbórea y las características acústicas representadas, lo que refuerza la hipótesis de que otros factores, como interacciones sociales o condiciones locales, podrían ser más determinantes en la variación de los cantos.

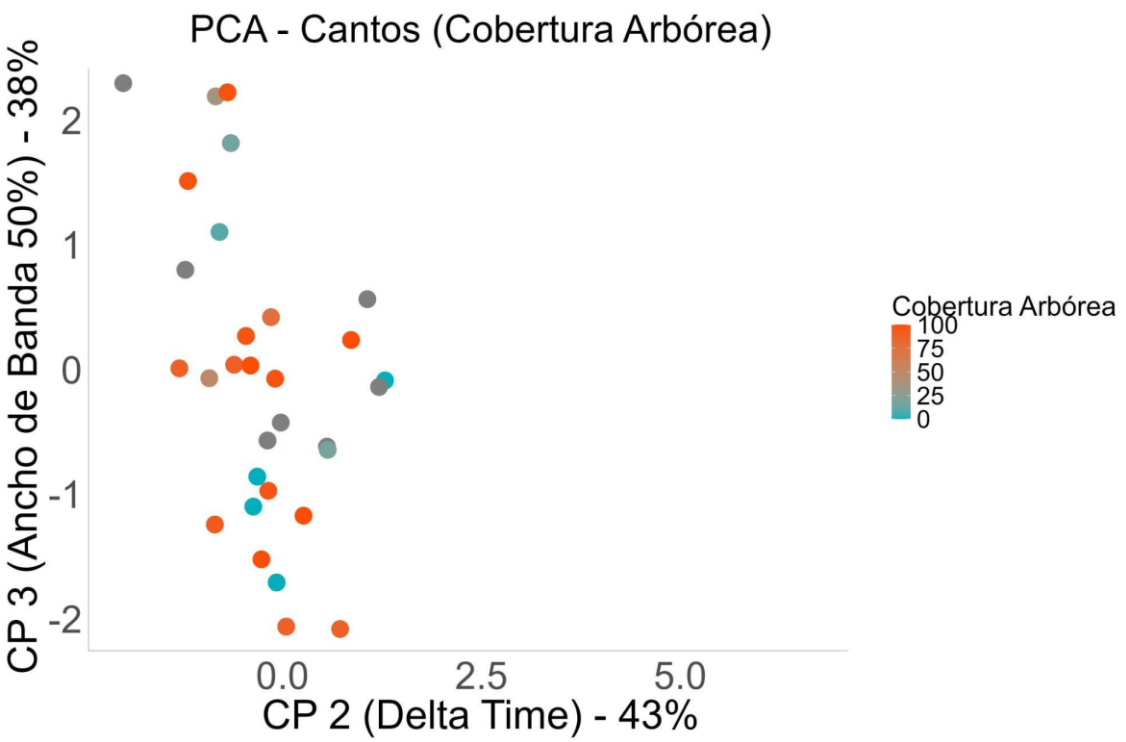


Figura 16. PCA de Cantos según Cobertura Arbórea. Este análisis de componentes principales (PCA) ilustra la relación entre las características acústicas de los cantos de *Melanerpes rubricapillus* y la cobertura arbórea, representada por la escala de colores. Los ejes CP2 y CP3 explican el 43% y 38% de la varianza total, respectivamente. La disposición de los puntos sugiere que no hay un patrón claro que relacione directamente las variables acústicas representadas (Delta Time y Ancho de Banda al 50%) con los niveles de cobertura arbórea, reafirmando la hipótesis de que otros factores locales, como interacciones sociales o condiciones específicas del hábitat, tienen un mayor impacto en la variabilidad acústica de los cantos.

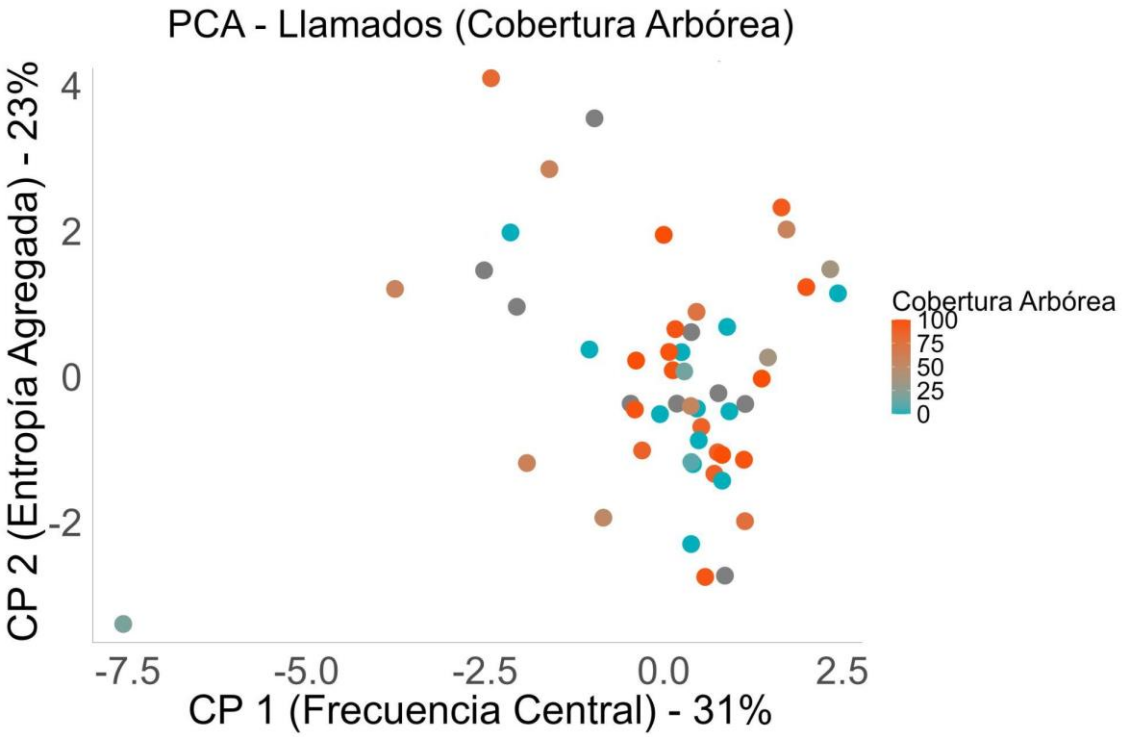


Figura 17. PCA de Llamados según Cobertura Arbórea. El análisis de componentes principales (PCA) explora la relación entre las características acústicas de los llamados de *Melanerpes rubricapillus* y la cobertura arbórea. Los ejes CP1 y CP2 explican el 31% y 23% de la varianza total, respectivamente. Cada punto representa un llamado, codificado por su nivel de cobertura arbórea (escala de colores). Los resultados no muestran un patrón claro de asociación entre las variables acústicas (Frecuencia Central y Entropía Agregada) y la cobertura arbórea, lo que sugiere que factores locales o interacciones sociales pueden tener un mayor impacto en las variaciones acústicas observadas.

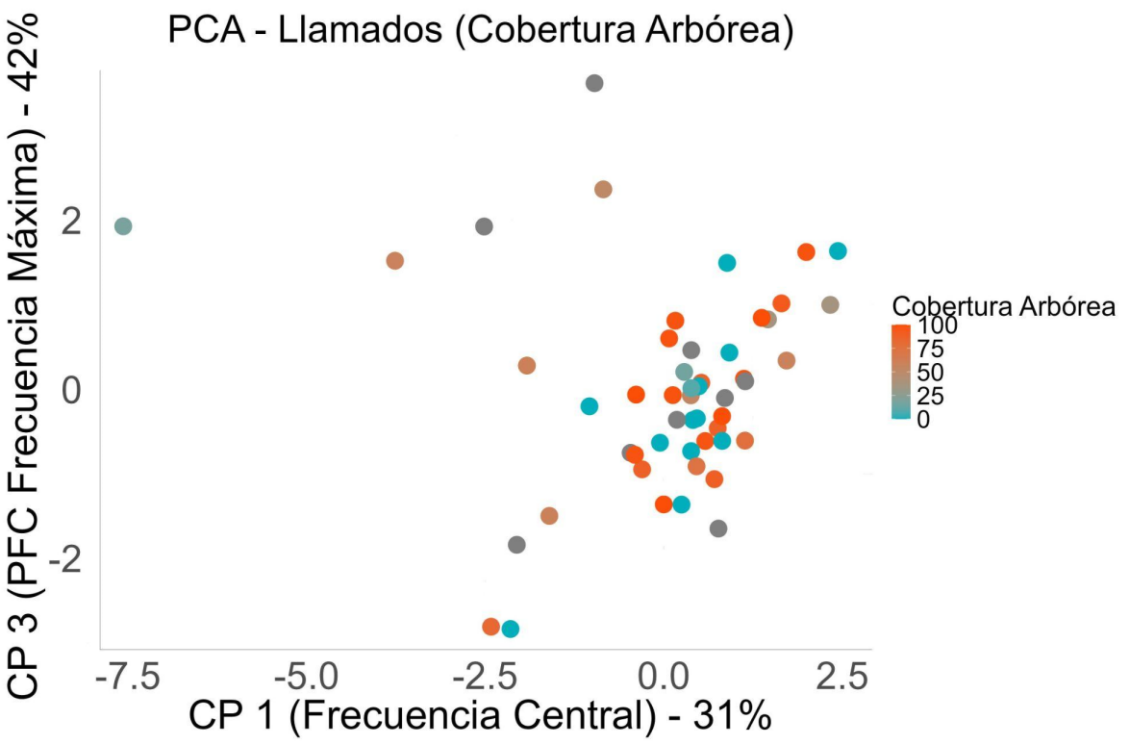


Figura 18. PCA de Llamados según Cobertura Arbórea. Este gráfico de análisis de componentes principales (PCA) explora cómo las características acústicas de los llamados de *Melanerpes rubricapillus* varían con respecto a la cobertura arbórea. Los ejes CP1 y CP3 explican el 31% y 42% de la varianza total, respectivamente. Los puntos representan llamados individuales, codificados por niveles de cobertura arbórea (escala de colores). Los resultados no evidencian una relación directa entre las variables acústicas (Frecuencia Central y Frecuencia Máxima) y la cobertura arbórea, sugiriendo que factores como las dinámicas sociales o la estructura microhábitats podrían tener un mayor impacto en las diferencias acústicas observadas.

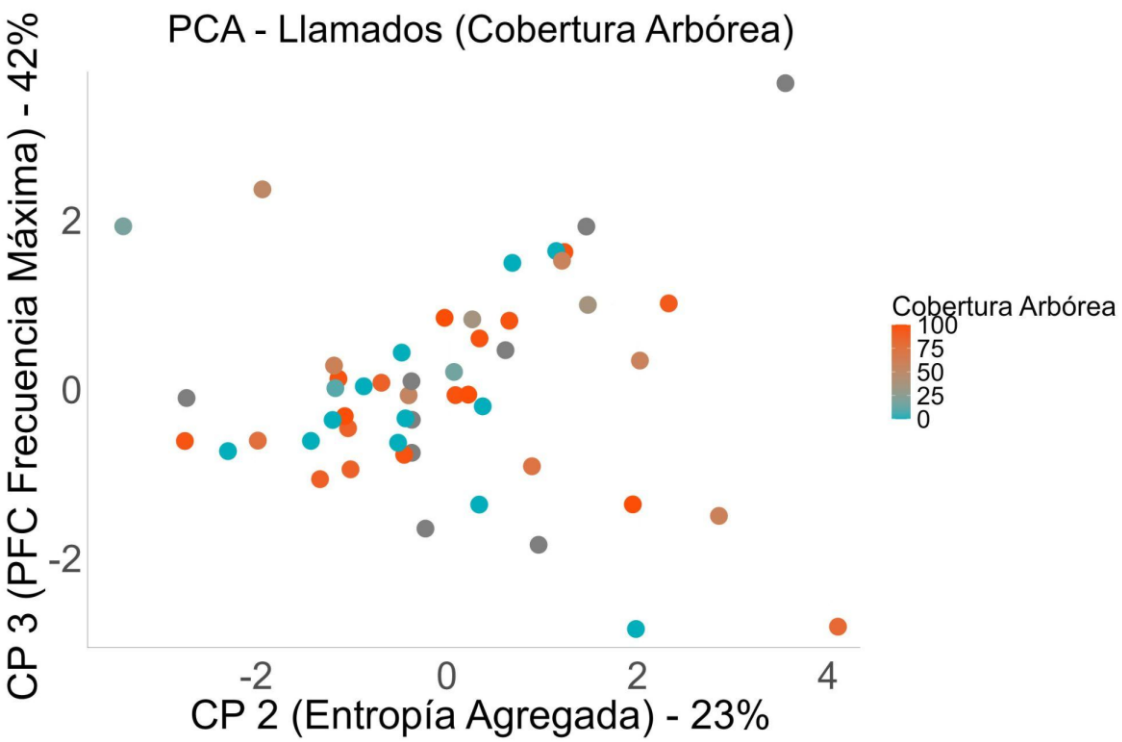


Figura 19. PCA de Llamados según Cobertura Arbórea. Este gráfico muestra un análisis de componentes principales (PCA) para los llamados de *Melanerpes rubricapillus*, considerando la cobertura arbórea. Los ejes CP2 y CP3 explican el 23% y el 42% de la variabilidad total, respectivamente. Los puntos representan las grabaciones de llamados individuales y están coloreados según el porcentaje de cobertura arbórea en el sitio de registro. Los resultados no evidencian una tendencia clara entre las variables acústicas (Entropía Agregada y Frecuencia Máxima) y los niveles de cobertura arbórea, destacando que factores locales y sociales podrían influir más en las características acústicas de los llamados.

Gráficos objetivo 3

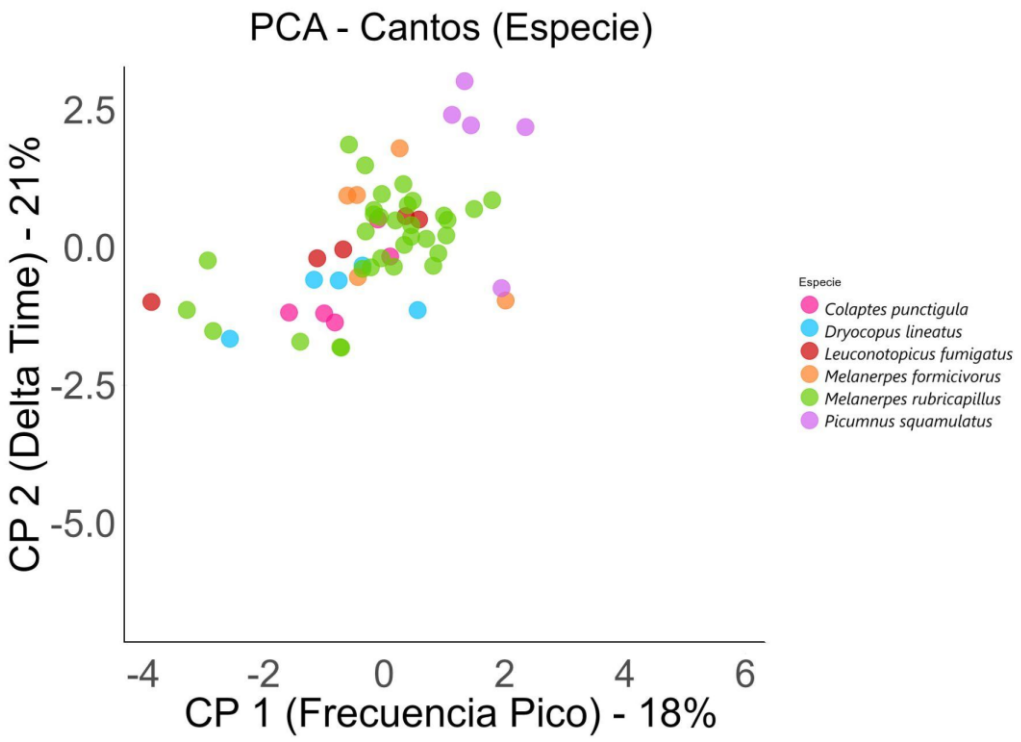


Figura 20. PCA de Cantos según Especie. El gráfico muestra un análisis de componentes principales (PCA) para los cantos de seis especies de pájaros carpinteros. Los ejes CP1 y CP2 explican el 18% y el 21% de la variabilidad total, respectivamente. Los puntos representan grabaciones individuales, coloreados según la especie correspondiente: *Colaptes punctigula* (rosa), *Dryocopus lineatus* (azul), *Leuconotopicus fumigatus* (rojo), *Melanerpes formicivorus* (naranja), *Melanerpes rubricapillus* (verde), y *Picumnus squamulatus* (morado). Este análisis destaca un solapamiento acústico entre las especies, lo que sugiere una flexibilidad acústica en paisajes sonoros compartidos, particularmente en Melanerpes rubricapillus, que presenta una mayor dispersión en la Frecuencia Pico.

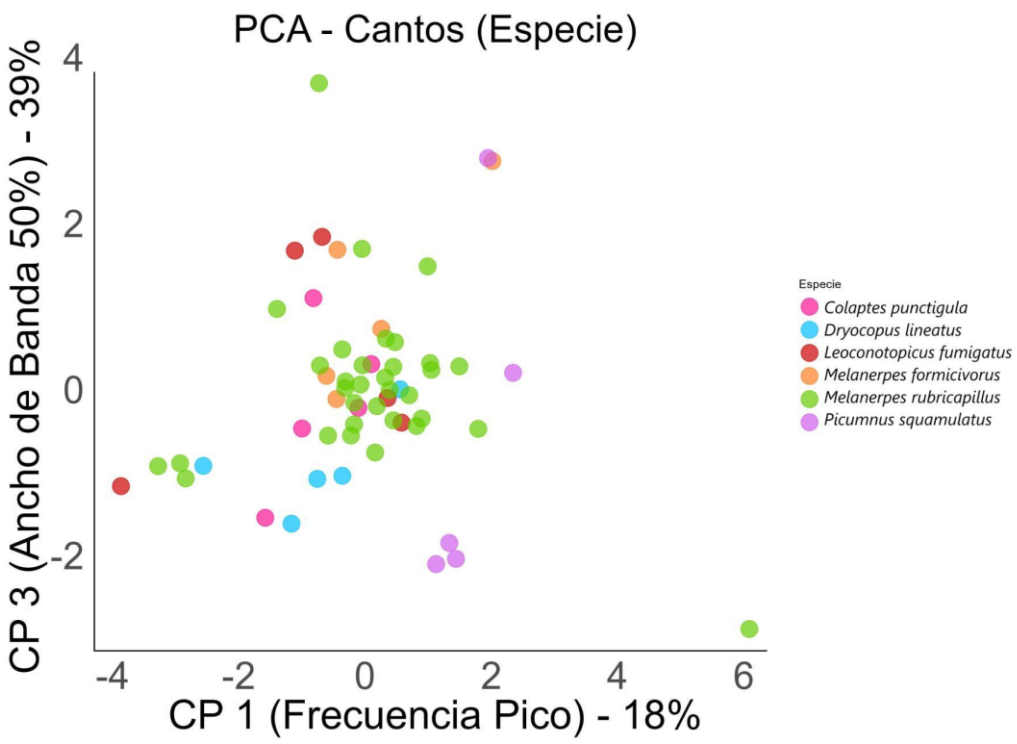


Figura 21. PCA de Cantos según Especie. Este gráfico representa el análisis de componentes principales (PCA) para los cantos de seis especies de pájaros carpinteros, evaluando la variación acústica. El CP1 (Frecuencia Pico) explica el 18% de la variación total, mientras que el CP3 (Ancho de Banda 50%) explica el 39%. Cada punto corresponde a un canto, con colores que identifican las especies: *Colaptes punctigula* (rosa), *Dryocopus lineatus* (azul), *Leuconotopicus fumigatus* (rojo), *Melanerpes formicivorus* (naranja), *Melanerpes rubricapillus* (verde) y *Picumnus squamulatus* (morado). La dispersión sugiere diferencias interespecíficas en las propiedades acústicas, particularmente en el Melanerpes rubricapillus, que muestra una alta variación en el ancho de banda.

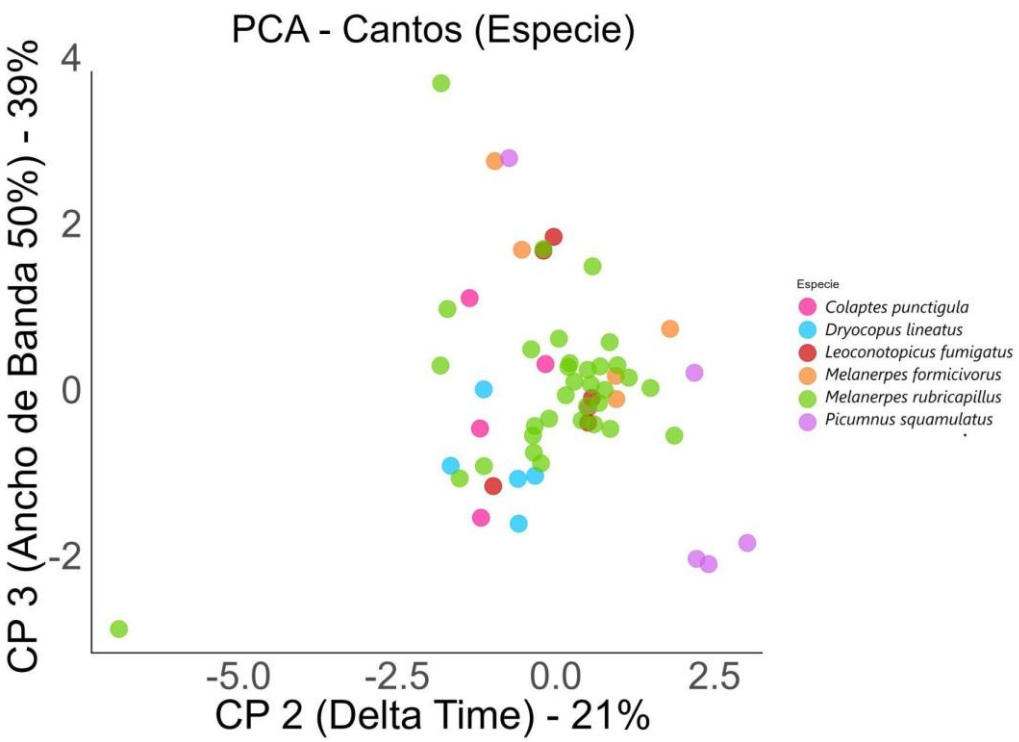


Figura 22. PCA de Cantos según Especie. Este gráfico presenta el análisis de componentes principales (PCA) para los cantos de seis especies de pájaros carpinteros, evaluando la variación acústica. El CP2 (Delta Time) explica el 21% de la variación total, mientras que el CP3 (Ancho de Banda 50%) explica el 39%. Cada punto representa un canto, con colores que identifican las especies: *Colaptes punctigula* (rosa), *Dryocopus lineatus* (azul), *Leuconotopicus fumigatus* (rojo), *Melanerpes formicivorus* (naranja), *Melanerpes rubricapillus* (verde) y *Picumnus squamulatus* (morado). La distribución sugiere diferencias acústicas entre especies, con una variabilidad destacada en Melanerpes rubricapillus y Picumnus squamulatus, especialmente en el ancho de banda.

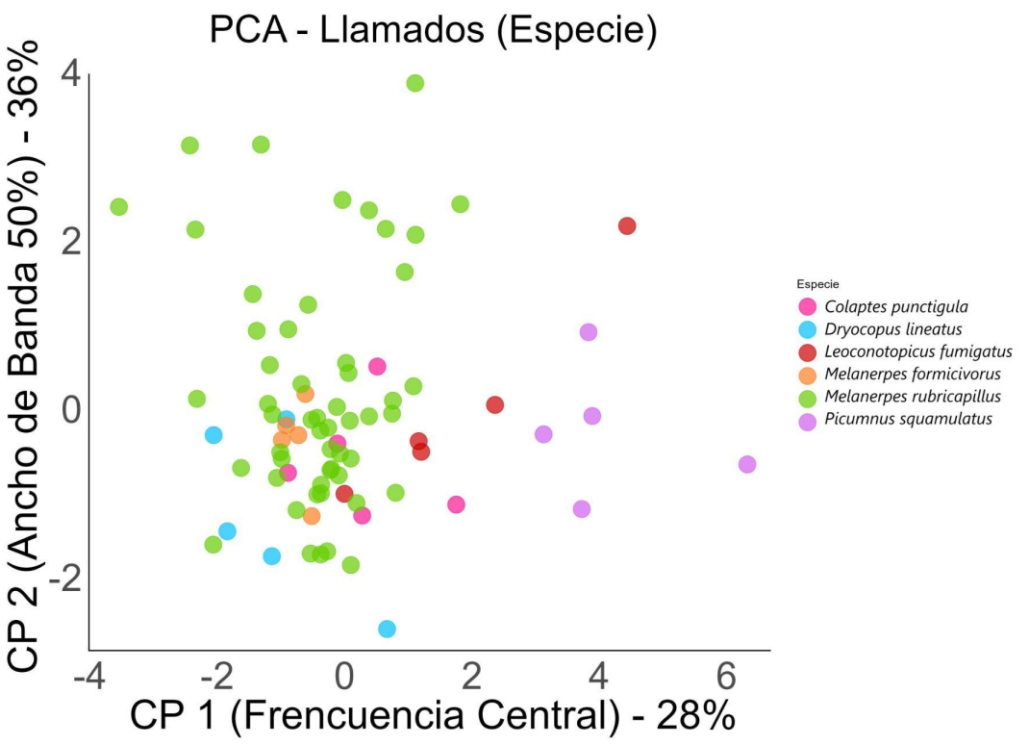


Figura 23. PCA de Llamados según Especie. Este gráfico muestra el análisis de componentes principales (PCA) para los llamados de seis especies de pájaros carpinteros, evaluando la variación acústica. El CP1 (Frecuencia Central) explica el 28% de la variación total, mientras que el CP2 (Ancho de Banda 50%) explica el 36%. Cada punto representa un llamado, con colores que identifican las especies: *Colaptes punctigula* (rosa), *Dryocopus lineatus* (azul), *Leuconotopicus fumigatus* (rojo), *Melanerpes formicivorus* (naranja), *Melanerpes rubricapillus* (verde) y *Picumnus squamulatus* (morado). La dispersión sugiere diferencias interespecíficas en las propiedades acústicas, con *Melanerpes rubricapillus* mostrando mayor variabilidad en las frecuencias analizadas.

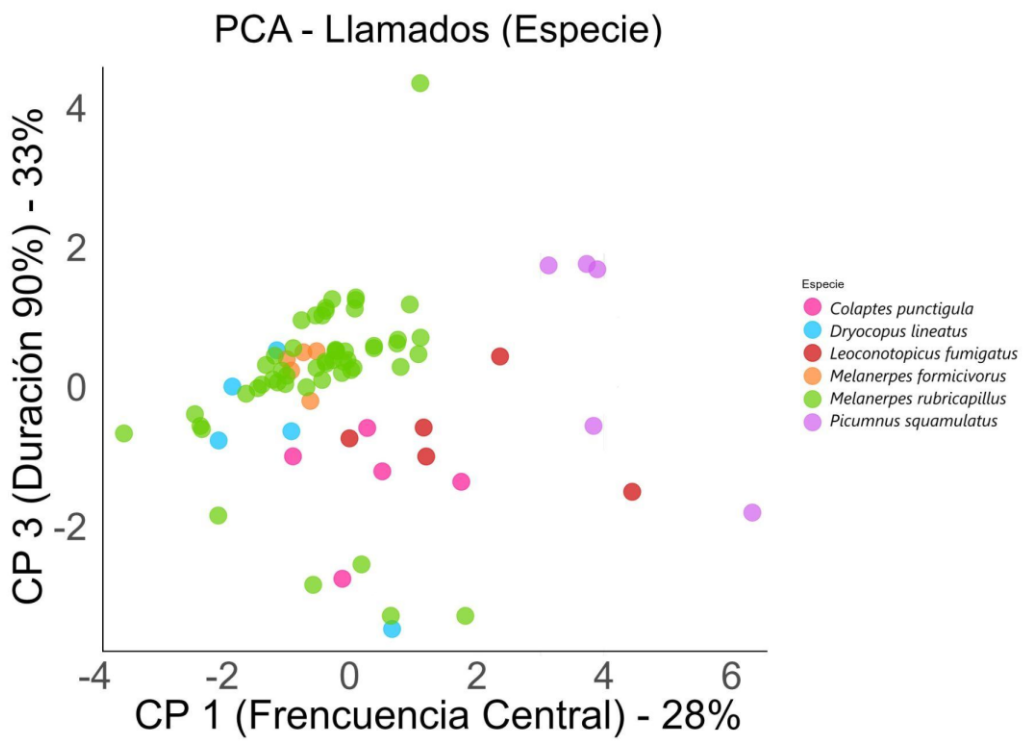


Figura 24. PCA de Llamados según Especie. Este gráfico representa el análisis de componentes principales (PCA) aplicado a los llamados de seis especies de pájaros carpinteros, evaluando la variación acústica. El CP1 (Frecuencia Central) explica el 28% de la variación total, mientras que el CP3 (Duración 90%) explica el 33%. Cada punto representa un llamado, y los colores identifican las especies: *Colaptes punctigula* (rosa), *Dryocopus lineatus* (azul), *Leuconotopicus fumigatus* (rojo), *Melanerpes formicivorus* (naranja), *Melanerpes rubricapillus* (verde) y *Picumnus squamulatus* (morado). La distribución de los puntos sugiere diferencias notables en las características acústicas entre especies, con Picumnus squamulatus destacando por su variación en la duración de los llamados.

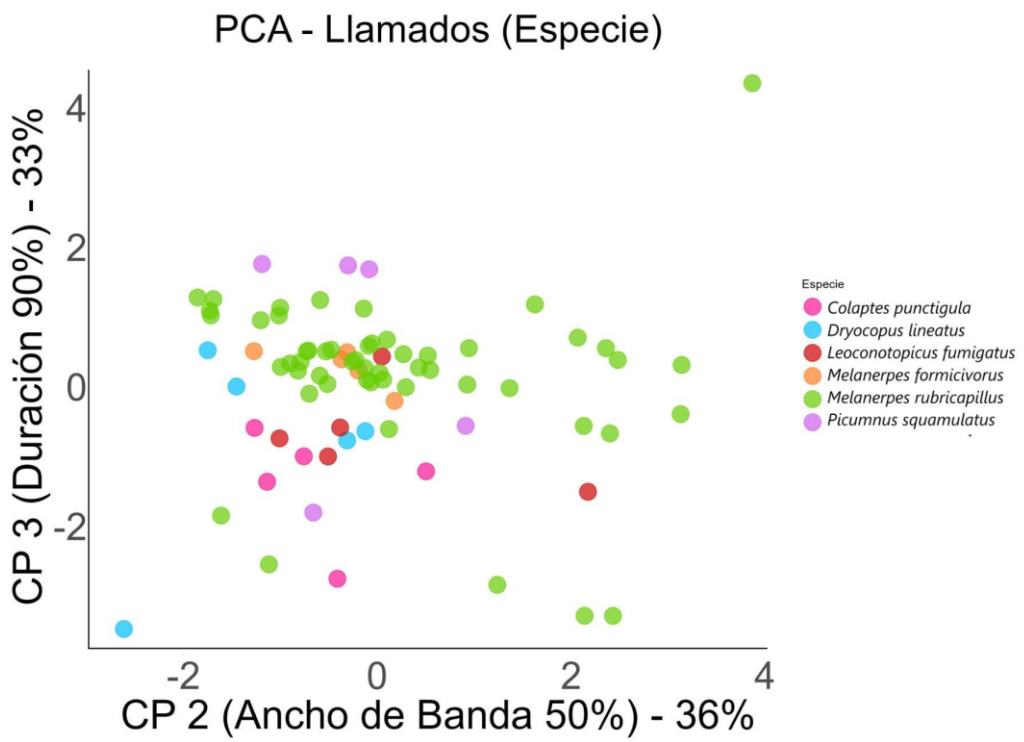


Figura 25. PCA de Llamados según Especie. Este gráfico muestra el análisis de componentes principales (PCA) para los llamados de seis especies de pájaros carpinteros, evaluando la variación acústica. El CP2 (Ancho de Banda 50%) explica el 36% de la variación total, mientras que el CP3 (Duración 90%) explica el 33%. Cada punto representa un llamado, y los colores identifican las especies: *Colaptes punctigula* (rosa), *Dryocopus lineatus* (azul), *Leuconotopicus fumigatus* (rojo), *Melanerpes formicivorus* (naranja), *Melanerpes rubricapillus* (verde) y *Picumnus squamulatus* (morado). La distribución sugiere diferencias acústicas entre especies, destacándose Melanerpes rubricapillus por su dispersión en las características del ancho de banda y la duración.

Tablas

Tabla 1. Contribución de las variables seleccionadas en los componentes principales del PCA para los cantos. Esta tabla muestra las contribuciones de las 10 variables seleccionadas en los cinco componentes principales calculados en el análisis de componentes principales (PCA), que respaldan los objetivos 1 y 2 del estudio. Los valores representan el porcentaje de varianza explicada por cada variable en cada componente, donde las variables con mayor contribución indican su relevancia en la formación de cada dimensión. Las variables analizadas incluyen características acústicas como frecuencia pico, frecuencia central, entropía agregada, relación señal-ruido (SNR), duración, delta del tiempo, densidad de poder pico, ancho de banda, entropía máxima y frecuencia máxima de PFC.

Contribución	Dimensión 1	Dimensión 2	Dimensión 3	Dimensión 4	Dimensión 5
Frecuencia pico (Hz)	18,010%	0,003%	1,286%	11,712%	1,214%
Frecuencia central (Hz)	22,149%	0,128%	3,137%	14,434%	2,241%
Entropía agregada (bits)	23,688%	0,819%	3,423%	3,104%	5,160%
SNR Nist Quick (dB)	1,973%	4,647%	19,454%	32,209%	7,200%
Duración 90% (s)	0,011%	42,240%	4,297%	1,162%	1,430%
Delta del tiempo (s)	0,001%	42,658%	3,461%	1,179%	1,143%
Densidad de poder pico (dB FS/Hz)	3,092%	0,141%	25,906%	5,082%	36,163 %
Ancho de banda 50% (Hz)	0,586%	5,796%	37,753%	5,613%	6,593%
Entropía máxima (bits)	17,547%	2,983%	1,145%	18,484%	0,778%
PFC Frecuencia	12,942%	0,583%	0,136%	6,462%	38,083

Tabla 2. Porcentaje de varianza explicada por los componentes principales para los cantos. Esta tabla muestra la proporción de varianza explicada por cada uno de los diez componentes principales calculados en el análisis de componentes principales (PCA), así como el porcentaje de varianza acumulado. Los primeros cinco componentes explican el 87,089% de la variación total de los datos, proporcionando una representación compacta y eficiente de las variables originales. Esta información es fundamental para los objetivos 1 y 2, al identificar los componentes más representativos y relevantes en el análisis de las características acústicas estudiadas.

Componentes Principales	Porcentaje de varianza	Porcentaje de varianza acumulado
1	31,393%	31,393%
2	21,431%	52,824%
3	14,777%	67,602%
4	10,384%	77,986%
5	9,104%	87,089%
6	6,144%	93,233%
7	3,888%	97,121%
8	2,214%	99,335%
9	0,612%	99,947%
10	0,053%	100%

Tabla 3. Contribución de las variables en los componentes principales para los llamados. Esta tabla presenta las contribuciones de las 10 variables analizadas en las cinco

dimensiones principales resultantes del análisis de componentes principales (PCA) aplicado a los llamados de las aves. Cada celda indica el porcentaje de varianza explicado por una variable en la respectiva dimensión. Las variables "Frecuencia central (Hz)" y "Frecuencia pico (Hz)" tienen las mayores contribuciones en las primeras dimensiones, mientras que "Delta del tiempo (s)" y "Entropía máxima (bits)" destacan en dimensiones superiores. Esta información es clave para los objetivos 1 y 2, al identificar qué variables influyen más en la caracterización acústica de los llamados.

Contribución	**Dimensión 1**	**Dimensión 2**	**Dimensión 3**	**Dimensión 4**	**Dimensión 5**
Frecuencia pico (Hz)	26,794%	1,283%	2,043%	0,116%	2,379%
Frecuencia central (Hz)	30,623%	0,634%	3,608%	2,323%	0,260%
Entropía agregada (bits)	5,403%	23,081%	1,313%	0,412%	12,378%
SNR Nist Quick (dB)	7,224%	12,121%	0,141%	17,211%	13,426%
Duración 90% (s)	15,917%	2,954%	14,910%	0,175%	2,265%
Delta del tiempo (s)	10,471%	0,200%	14,726%	2,005%	49,582%
Densidad de poder pico (dB FS/Hz)	0,220%	16,724%	12,337%	20,097%	2,428%
Ancho de banda 50% (Hz)	0,197%	19,679%	5,726%	22,002%	10,149%
Entropía máxima (bits)	0,591%	18,730%	3,613%	33,463%	4,392%
PFC Frecuencia máxima (Hz)	2,650%	4,595%	41,581%	2,195%	2,743%

Tabla 4. Porcentaje de varianza explicada por los componentes principales para los llamados. Esta tabla muestra el porcentaje de varianza explicada por cada uno de los diez

componentes principales obtenidos en el análisis de componentes principales (PCA) aplicado a los llamados de las aves, así como el porcentaje de varianza acumulado. Los primeros dos componentes explican más del 50% de la varianza total (27,151% y 23,874%, respectivamente), mientras que los cinco primeros componentes acumulan el 83,225% de la varianza. Esta información es clave para los objetivos 1 y 2, ya que permite identificar las dimensiones más relevantes para la caracterización acústica de los llamados.

Componentes Principales	**Porcentaje de varianza**	**Porcentaje de varianza acumulado**
1	27,151%	27,151%
2	23,874%	51,025%
3	14,873%	65,898%
4	9,547%	75,445%
5	7,780%	83,225%
6	5,308%	88,533%
7	4,256%	92,789%
8	3,992%	96,781%
9	2,417%	99,197%
10	0,803%	100%

Tabla 5. Resultados del análisis MANOVA para los cantos según el factor "País". El análisis de varianza multivariado (MANOVA) indica diferencias significativas entre los países en las características acústicas de los cantos (Pillai's Trace = 1,3766, Approx F = 1,7807, p = 0,02755). Este análisis utilizó 30 grados de libertad en el numerador y 63 en el denominador, con un total de 28 grados de libertad residuales. El asterisco en el valor de p indica significancia estadística (*), respaldando la influencia del país en las variaciones acústicas de los cantos.

	Df	Pillai	Approx F	num Df	den Df	Pr(>F)
País	3	1,3766	1,7807	30	63	0,02755*
Residuales	28					

Tabla 6. Resultados del ANOVA Univariado para Cantos según País. Esta tabla presenta los resultados del análisis de varianza univariado (ANOVA) realizado para evaluar las diferencias en las características acústicas de los cantos entre cuatro países. Cada fila muestra las variables analizadas, incluyendo Frecuencia Pico, Frecuencia Central, Entropía Agregada, entre otras, junto con sus valores de suma de cuadrados (Sum Sq), cuadrados medios (Mean Sq), valor F (F Value) y significancia estadística (Pr(>F)). La variable SNR NIST Quick (dB) mostró diferencias significativas entre países ($p < 0.05$). Este análisis ayuda a identificar cómo las propiedades acústicas de los cantos varían geográficamente.

Frecuencia pico (Hz)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)
País	3	8413333	2804444	0,6532	0,5877
Residuales	28	120216089	4293432		
Frecuencia central (Hz)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)
País	3	3611721	1203907	0,9548	0,4277
Residuales	28	35303916	1260854		
Entropía agregada (bits)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)
País	3	1,6519	0,55063	0,5319	0,6641
Residuales	28	28,9846	1,03516		
SNR NIST Quick (dB)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)
País	3	2564,9	854,98	3,0115	0,04675
Residuales	28	7949,3	283,90		
Duración 90% (s)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)
País	3	8,17	2,7234	0,6879	0,567
Residuales	28	110,86	3,9592		
Delta del Tiempo (s)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)
País	3	15,692	5,2306	0,9263	0,441
Residuales	28	158,115	5,6470		
Densidad del Poder Pico (dB FS/Hz)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)
País	3	510,17	170,058	2,572	0,07408

Ancho de Banda 50% (Hz)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)
País	3	4103200	1367735	2,0709	0,1267
Residuales	28	18492436	660444		
Entropía Máxima (bits)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)
País	3	1,1884	0,39615	1,3591	0,2756
Residuales	28	8,1616	0,29149		
PFC Frecuencia Máxima (Hz)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)
País	3	12706485	4235495	0,8095	0,4993
Residuales	28	146495518	5231983		

Tabla 7. Resultados del MANOVA para Llamados según País. La tabla muestra los resultados del análisis multivariado de varianza (MANOVA) aplicado a las características acústicas de los llamados, agrupados por país. El estadístico de prueba utilizado es el Pillai's Trace, con un valor de 0.82467. El valor F aproximado (Approx F) es 1.0389, con grados de libertad numéricos (num Df) de 40 y denominadores (den Df) de 160. El nivel de significancia (Pr(>F)) es 0.4197, lo cual indica que no se encontraron diferencias significativas entre los países en las características analizadas. Este resultado sugiere que las variaciones en los llamados no están determinadas significativamente por el país de origen.

	Df	Pillai	Approx F	num Df	den Df	Pr(>F)
País	4	0,82467	1,0389	40	160	0,4197
Residu	46					

Tabla 8. Contribución porcentual de las variables acústicas a las primeras cinco dimensiones del análisis de componentes principales (PCA) aplicado a los cantos de las

seis especies de pájaros carpinteros analizadas. Las variables consideradas incluyen Frecuencia Pico, Frecuencia Central, Entropía Agregada, SNR NIST Quick, Duración al 90%, Delta del Tiempo, Densidad de Poder Pico, Ancho de Banda al 50%, Entropía Máxima y PFC Frecuencia Máxima. Los valores reflejan el porcentaje de varianza explicado por cada variable en las diferentes dimensiones, destacando aquellas que tuvieron mayor influencia en cada componente. Estos resultados resaltan las características acústicas que diferencian a las especies en su paisaje sonoro compartido.

Contribución	Dimensión 1	Dimensión 2	Dimensión 3	Dimensión 4	Dimensión 5
Frecuencia pico (Hz)	18,408%	14,108%	11,716%	5,334%	1,078%
Frecuencia central (Hz)	16,572%	18,501%	1,015%	1,847%	2,354%
Entropía agregada (bits)	13,942%	9,599%	18,253%	3,158%	0,432%
SNR Nist Quick (dB)	0,0005%	11,439%	0,071%	15,662%	0,747%
Duración 90% (s)	37,511%	0,008%	0,072%	36,895%	34,979%
Delta del tiempo (s)	7,911%	20,831%	4,578%	5,204%	9,209%
Densidad de poder pico (dB FS/Hz)	18,564%	9,033%	2,856%	2,488%	4,445%
Ancho de banda 50% (Hz)	1,995%	0,156%	39,175%	1,213%	23,504%
Entropía máxima (bits)	38,532%	1,612%	17,923%	26,320%	23,206%
PFC Frecuencia máxima (Hz)	21,846%	14,711%	4,342%	1,879%	0,045%

Tabla 9. Porcentaje de varianza explicada y acumulada por los primeros diez componentes principales en el análisis de componentes principales (PCA) aplicado a los cantos de las seis especies de pájaros carpinteros. Los componentes principales representan combinaciones lineales de las variables acústicas analizadas. El porcentaje de varianza explica la proporción de la variabilidad total capturada por cada componente, mientras que el porcentaje acumulado muestra el total acumulado de varianza explicada a medida que se incluyen más componentes. Estos resultados permiten identificar los componentes que aportan mayor información en la caracterización acústica de los cantos.

Componentes Principales	Porcentaje de varianza	Porcentaje de varianza acumulado
1	22,310%	22,310%
2	20,132%	42,442%
3	14,215%	56,557%
4	10,914%	67,571%
5	10,440%	78,011%
6	9,330%	87,340%
7	5,860%	93,196%
8	3,278%	96,474%
9	2,161%	98,635%
10	1,365%	100%

Tabla 10. Contribución porcentual de las variables acústicas a las primeras cinco dimensiones del análisis de componentes principales (PCA) aplicado a los llamados de las seis especies de pájaros carpinteros analizadas. Las variables incluyen Frecuencia Pico, Frecuencia Central, Entropía Agregada, SNR NIST Quick, Duración al 90%, Delta del Tiempo, Densidad de Poder Pico, Ancho de Banda al 50%, Entropía Máxima y PFC Frecuencia Máxima. Los porcentajes reflejan la influencia de cada variable en la construcción de los componentes principales. Las variables con mayores valores en cada dimensión destacan como las más relevantes para la diferenciación de los llamados entre especies.

Contribución	Dimensión 1	Dimensión 2	Dimensión 3	Dimensión 4	Dimensión 5
Frecuencia pico (Hz)	21,251%	1,494%	4,897%	9,016%	14,630%
Frecuencia central (Hz)	28,087%	0,166%	6,910%	2,658%	5,500%
Entropía agregada (bits)	0,237%	6,726%	10,252%	42,510%	2,541%
SNR Nist Quick (dB)	2,035%	11,116%	17,336%	14,606%	0,677%
Duración 90% (s)	7,853%	21,233%	32,936%	5,134%	0,162%
Delta del tiempo (s)	10,324%	1,745%	27,178%	5,455%	0,697%
Densidad de poder pico (dB FS/Hz)	7,049%	19,234%	0,257%	0,322%	26,549%
Ancho de banda 50% (Hz)	0,147%	35,928%	0,137%	4,940%	1,515%
Entropía máxima (bits)	0,510%	19,797%	0,095%	14,225%	42,488%
PFC Frecuencia máxima (Hz)	22,508%	2,561%	0,002%	1,134%	5,240%

Tabla 11. Porcentaje de varianza explicada y acumulada por los primeros diez componentes principales en el análisis de componentes principales (PCA) aplicado a los llamados de las seis especies de pájaros carpinteros. El porcentaje de varianza indica la proporción de la variabilidad total explicada por cada componente, mientras que el porcentaje acumulado muestra el total acumulado de la variabilidad explicada conforme se suman más componentes. Estos resultados destacan las dimensiones principales que capturan la mayor parte de la variabilidad en las características acústicas de los llamados.

Componentes Principales	Porcentaje de varianza	Porcentaje de varianza acumulado
1	25,974%	25,974%
2	17,040%	43,014%
3	15,511%	58,524%
4	11,625%	70,149%
5	8,841%	78,990%
6	5,918%	84,909%
7	5,570%	90,479%
8	4,963%	95,442%
9	3,413%	98,855%
10	1,145%	100%

Imagen 1. Carpintero habado (*Melanerpes rubricapillus*). Ave de la familia Picidae, reconocida por su patrón dorsal blanco y negro, vientre amarillo crema y cabeza con un distintivo tono rojizo. Su pico largo y puntiagudo está adaptado para perforar madera, y es conocido tanto por sus vocalizaciones como por su característico tamborileo[27].

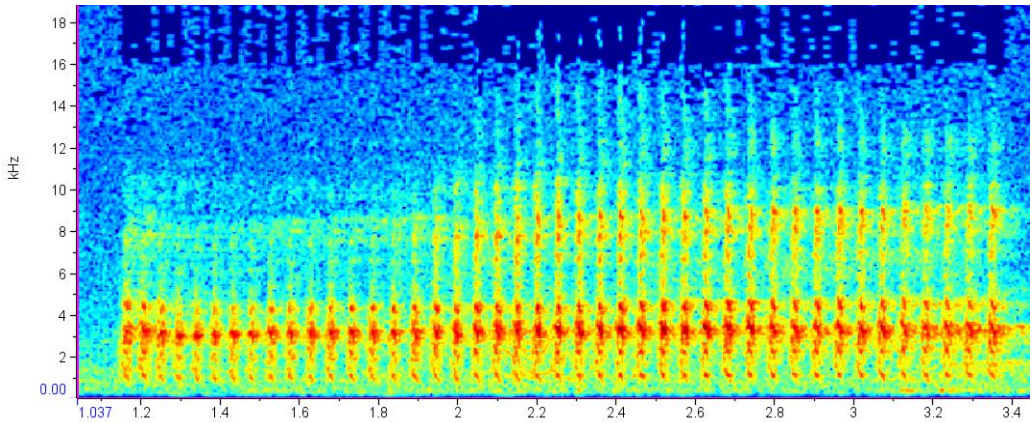


Imagen 2. Espectrograma del canto de *Melanerpes rubricapillus*, mostrando la estructura temporal y espectral de la vocalización. El eje horizontal indica el tiempo (segundos), mientras que el eje vertical representa la frecuencia (kHz). Las áreas en tonos rojizos denotan las frecuencias de mayor intensidad, principalmente entre los 2 y los 6 kHz, mientras que los tonos azulados corresponden a regiones de menor energía acústica. Este patrón refleja la periodicidad del canto y las características dominantes en el rango frecuencial utilizado por la especie.

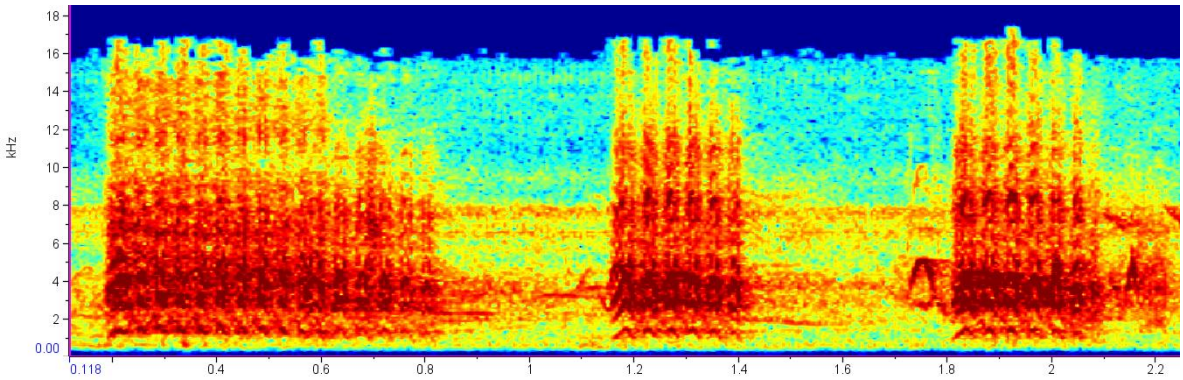


Imagen 3. Espectrograma de un llamado de *Melanerpes rubricapillus*, destacando la estructura temporal y espectral de las vocalizaciones. El eje horizontal indica el tiempo (segundos), mientras que el eje vertical representa la frecuencia (kHz). Las áreas rojizas corresponden a frecuencias de alta intensidad, concentradas principalmente entre 2 y 10 kHz, con pulsos acústicos repetitivos que indican una estructura. Los intervalos entre pulsos reflejan patrones de duración y pausa que podrían estar relacionados con funciones comunicativas específicas en esta especie.

Código en R

Objetivo 1

Componentes Principales vs Latitud y Longitud

Código en R para realizar un gráfico de componentes principales (PCA) usando las 10 variables seleccionadas

```
# Instalar y cargar las librerías necesarias
if (!require("ggplot2")) install.packages("ggplot2")
if (!require("FactoMineR")) install.packages("FactoMineR")
if (!require("factoextra")) install.packages("factoextra")
if (!require("dplyr")) install.packages("dplyr")

library(ggplot2)
library(FactoMineR)
library(factoextra)
library(dplyr)

# Cargar los datos desde un archivo CSV (ajustar el nombre del archivo y la ruta según corresponda)
datos <- Tabla_promedios_completos_totales

# Cargar los datos de latitud y longitud desde otro archivo CSV (ajustar el nombre del archivo y la ruta según corresponda)
ubicaciones <- Base_de_datos_audios_PDG_2

# Verificar si ambas bases de datos contienen la columna 'Individuo'
if (!"Individuo" %in% colnames(datos) | !"Individuo" %in% colnames(ubicaciones)) {
```

```
  stop("La columna 'Individuo' no se encuentra en una o ambas bases de datos. Por favor, verifica los nombres de las columnas.")
}

# Combinar ambas bases de datos usando la columna 'Individuo'
datos_combinados <- merge(datos, ubicaciones, by = "Individuo")

# Seleccionar las 10 variables de interés (asegurarse de que los nombres coincidan exactamente con los del archivo CSV)
variables_seleccionadas <- c("Peak Freq (Hz)", "Center Freq (Hz)", "Agg Entropy (bits)", "SNR NIST Quick (dB)",
                             "Dur 90% (s)", "Delta Time (s)", "Peak Power Density (dB FS/Hz)", "BW 50% (Hz)",
                             "Max Entropy (bits)", "PFC Max Freq (Hz)")

# Filtrar los datos para incluir solo las 10 variables seleccionadas
datos_filtrados <- datos_combinados[ , variables_seleccionadas, drop = FALSE]

# Normalizar los datos usando la escala estándar (media = 0, desviación estándar = 1)
datos_normalizados <- datos_filtrados %>%
  mutate(across(everything(), scale))

# Realizar el análisis de componentes principales (PCA)
res.pca <- PCA(datos_normalizados, graph = FALSE)

# Combinar las coordenadas del PCA con las ubicaciones
coordenadas_pca <- as.data.frame(res.pca$ind$coord)
coordenadas_pca$Individuo <- rownames(coordenadas_pca)
datos_pca_ubicaciones <- merge(coordenadas_pca, ubicaciones, by = "Individuo")

# Graficar los componentes principales usando factoextra
```

```
fviz_pca_ind(res.pca,
             geom.ind = "point", # Representar los individuos como puntos
             palette = c("#00AFBB", "#E7B800", "#FC4E07", "#9370DB"),
             repel = TRUE, # Evitar la superposición de etiquetas
             pointsize = 3) + # Aumentar el tamaño de los puntos para una mejor visualización
  labs(title = "Análisis de Componentes Principales (PCA)",
             x = "Componente Principal 1",
             y = "Componente Principal 2")

# Graficar PCA con latitud como color
p_latitud <- ggplot(datos_pca_ubicaciones, aes(x = Dim.2, y = Dim.3, color = as.numeric(Latitud))) +
  geom_point(size = 7) + # Aumentar el tamaño de los puntos
  scale_color_gradient(low = "#00AFBB", high = "#FC4E07") +
  theme_minimal() +
  labs(
             title = "PCA - Cantos (Latitud)",
             x = "CP 2 (Delta Time) - 43%",
             y = "CP 3 (Ancho de Banda 50%) - 38%",
             color = "Latitud"
  ) +
  theme(
             plot.title = element_text(size = 35, hjust = 0.5),  # Tamaño y centrado del título
             axis.title = element_text(size = 37),              # Tamaño de las etiquetas de los ejes
             axis.text = element_text(size = 35),               # Tamaño de los números en los ejes
             legend.title = element_text(size = 25),            # Tamaño del título de la leyenda
             legend.text = element_text(size = 23),             # Tamaño del texto de la leyenda
             plot.margin = margin(30, 30, 30, 30)               # Márgenes amplios
  )

# Guardar el gráfico para Latitud
```

```
ggsave("C:/Users/USUARIO/Music/Ahora sí/PCA3_Cantos_Latitud_Poster.jpg", plot = p_latitud, width = 15, height = 10, dpi = 300)

# Graficar PCA con longitud como color
p_longitud <- ggplot(datos_pca_ubicaciones, aes(x = Dim.2, y = Dim.3, color = as.numeric(Longitud))) +
  geom_point(size = 7) + # Aumentar el tamaño de los puntos
  scale_color_gradient(low = "#00AFBB", high = "#FC4E07") +
  theme_minimal() +
  labs(
        title = "PCA - Cantos (Longitud)",
        x = "CP 2 (Delta Time) - 43%",
        y = "CP 3 (Ancho de Banda 50%) - 38%",
        color = "Longitud"
  ) +
  theme(
        plot.title = element_text(size = 35, hjust = 0.5),  # Tamaño y centrado del título
        axis.title = element_text(size = 37),            # Tamaño de las etiquetas de los ejes
        axis.text = element_text(size = 35),             # Tamaño de los números en los ejes
        legend.title = element_text(size = 25),          # Tamaño del título de la leyenda
        legend.text = element_text(size = 23),           # Tamaño del texto de la leyenda
        plot.margin = margin(30, 30, 30, 30)             # Márgenes amplios
  )

# Guardar el gráfico para Longitud
ggsave("C:/Users/USUARIO/Music/Ahora sí/PCA3_Cantos_Longitud_Poster.jpg", plot = p_longitud, width = 15, height = 10, dpi = 300)
```

MANOVA

```
# Verifica si ambas bases de datos contienen las columnas necesarias
if (!all(variables_seleccionadas %in% colnames(Tabla_promedios_completos_totales))) {
  stop("Algunas variables seleccionadas no están presentes en 'Tabla_promedios_completos_totales'. Verifica los nombres.")
}

if (!"País" %in% colnames(Base_de_datos_audios_PDG_2)) {
  stop("La columna 'País' no está presente en 'Base_de_datos_audios_PDG_2'. Verifica el nombre de la columna.")
}

# Combinar las bases de datos en una única tabla
datos_combinados <- merge(Tabla_promedios_completos_totales, Base_de_datos_audios_PDG_2, by = "Individuo")

# Seleccionar las 10 variables de interés y la columna 'País'
datos_manova <- datos_combinados[, c(variables_seleccionadas, "País")]

# Convertir 'País' a factor si no lo es
datos_manova$País <- as.factor(datos_manova$País)

# Crear el modelo de MANOVA
manova_model <- manova(as.matrix(datos_manova[, variables_seleccionadas]) ~ País, data = datos_manova)

# Resumen del modelo MANOVA
summary(manova_model)
```

```
# Realizar ANOVAs univariados para cada variable
anova_results <- summary.aov(manova_model)

# Imprimir los resultados de los ANOVAs univariados
print(anova_results)

# Realizar un análisis usando la prueba de Pillai
summary(manova_model, test = "Pillai")



# Verificar si las variables significativas están en los datos combinados
variables_significativas <- c("Peak Freq (Hz)", "Center Freq (Hz)", "Agg Entropy (bits)",
                              "SNR NIST Quick (dB)", "Dur 90% (s)", "Delta Time (s)",
                              "Peak Power Density (dB FS/Hz)", "BW 50% (Hz)",
                              "Max Entropy (bits)", "PFC Max Freq (Hz)")

# Renombrar columnas para asegurar nombres válidos en R
datos_combinados_temp <- datos_combinados
colnames(datos_combinados_temp) <- make.names(colnames(datos_combinados_temp))

# Convertir 'País' en factor si no lo es
datos_combinados_temp$País <- as.factor(datos_combinados_temp$País)

# Asegurarse de que las variables están correctamente nombradas
variables_significativas_renombradas <- make.names(variables_significativas)

# Generar boxplots para cada variable significativa
for (variable_safe in variables_significativas_renombradas) {

  # Verificar si la variable existe en el dataframe renombrado
  if (!(variable_safe %in% colnames(datos_combinados_temp))) {
```

```
        warning(paste("La columna", variable_safe, "no se encontró en los datos renombrados. Omitiendo..."))
        next
  }

  # Calcular las medias y errores estándar por país
  summary_data <- datos_combinados_temp %>%
        group_by(País) %>%
        summarise(
        mean_value = mean(.data[[variable_safe]], na.rm = TRUE),
        se = sd(.data[[variable_safe]], na.rm = TRUE) / sqrt(n())
        )

  # Añadir etiquetas de significancia simuladas (puedes ajustarlo con tus propios datos)
  summary_data <- summary_data %>%
        mutate(significance = ifelse(mean_value > median(mean_value), "*", ""))

  # Crear el boxplot
  p <- ggplot(datos_combinados_temp, aes(x = País, y = .data[[variable_safe]], fill = País)) +
        geom_boxplot() +
        geom_pointrange(data = summary_data, aes(x = País, y = mean_value, ymin = mean_value - se, ymax = mean_value + se), color = "black") +
        geom_text(data = summary_data, aes(x = País, y = mean_value + se + 0.1, label = significance), size = 5, color = "red") +
        labs(
        title = paste("Boxplot de", gsub("\\.", " ", variable_safe), "por País"),
        y = gsub("\\.", " ", variable_safe),
        x = "País"
        ) +
        theme_minimal() +
        theme(
```

```
        axis.title = element_text(size = 20),
        axis.text = element_text(size = 15),
        legend.title = element_text(size = 18),
        legend.text = element_text(size = 16),
        plot.title = element_text(size = 22, hjust = 0.5)
        )

 # Mostrar el gráfico
 print(p)
}
```

Objetivo 2

Componentes Principales vs Cobertura Arbórea

Código en R para realizar un gráfico de componentes principales (PCA) usando las 10 variables seleccionadas

```
# Instalar y cargar las librerías necesarias
if (!require("ggplot2")) install.packages("ggplot2")
if (!require("FactoMineR")) install.packages("FactoMineR")
if (!require("factoextra")) install.packages("factoextra")
if (!require("dplyr")) install.packages("dplyr")

library(ggplot2)
library(FactoMineR)
library(factoextra)
library(dplyr)

# Cargar los datos desde un archivo CSV (ajustar el nombre del archivo y la ruta según corresponda)
datos <- Tabla_promedios_completos_totales
```

```
# Cargar los datos de latitud y longitud desde otro archivo CSV (ajustar el nombre del archivo y la ruta según corresponda)
ubicaciones <- Base_de_datos_audios_PDG_2

# Verificar si ambas bases de datos contienen la columna 'Individuo'
if (!"Individuo" %in% colnames(datos) | !"Individuo" %in% colnames(ubicaciones)) {
  stop("La columna 'Individuo' no se encuentra en una o ambas bases de datos. Por favor, verifica los nombres de las columnas.")
}

# Combinar ambas bases de datos usando la columna 'Individuo'
datos_combinados <- merge(datos, ubicaciones, by = "Individuo")

# Seleccionar las 10 variables de interés (asegurarse de que los nombres coincidan exactamente con los del archivo CSV)
variables_seleccionadas <- c("Peak Freq (Hz)", "Center Freq (Hz)", "Agg Entropy (bits)", "SNR NIST Quick (dB)",
                             "Dur 90% (s)", "Delta Time (s)", "Peak Power Density (dB FS/Hz)", "BW 50% (Hz)",
                             "Max Entropy (bits)", "PFC Max Freq (Hz)")

# Filtrar los datos para incluir solo las 10 variables seleccionadas
datos_filtrados <- datos_combinados[ , variables_seleccionadas, drop = FALSE]

# Normalizar los datos usando la escala estándar (media = 0, desviación estándar = 1)
datos_normalizados <- datos_filtrados %>%
  mutate(across(everything(), scale))

# Realizar el análisis de componentes principales (PCA)
res.pca <- PCA(datos_normalizados, graph = FALSE)
```

```
# Combinar las coordenadas del PCA con las ubicaciones
coordenadas_pca <- as.data.frame(res.pca$ind$coord)
coordenadas_pca$Individuo <- rownames(coordenadas_pca)
datos_pca_ubicaciones <- merge(coordenadas_pca, ubicaciones, by = "Individuo")

# Graficar los componentes principales usando factoextra
fviz_pca_ind(res.pca,
             geom.ind = "point", # Representar los individuos como puntos
             palette = c("#00AFBB", "#E7B800", "#FC4E07", "#9370DB"),
             repel = TRUE, # Evitar la superposición de etiquetas
             pointsize = 3) + # Aumentar el tamaño de los puntos para una mejor visualización
  labs(title = "Análisis de Componentes Principales (PCA)",
             x = "Componente Principal 1",
             y = "Componente Principal 2")

# Graficar PCA con cobertura arbórea como color
# Crear el gráfico y asignarlo a una variable
p <- ggplot(datos_pca_ubicaciones, aes(x = Dim.2, y = Dim.3, color = as.numeric(`Cobertura
arbórea`))) +
  geom_point(size = 7) + # Aumentar el tamaño de los puntos
  scale_color_gradient(low = "#00AFBB", high = "#FC4E07") + # Gradiente de color
  theme_minimal() +
  labs(title = "PCA - Cantos (Cobertura Arbórea)",
             x = "CP 2 (Entropía Agregada) - 23%",
             y = "CP 3 (PFC Frecuencia Máxima) - 42%",
             color = "Cobertura Arbórea") + # Etiqueta para la leyenda
  theme(axis.title = element_text(size = 37),  # Aumentar el tamaño de los títulos de los ejes
             axis.text = element_text(size = 35),   # Aumentar el tamaño del texto de los ejes
             legend.text = element_text(size = 23), # Aumentar el tamaño del texto de la leyenda
             legend.title = element_text(size = 25), # Aumentar el tamaño del título de la leyenda
```

plot.title = element_text(size = 35, hjust = 0.5), # Centrar y aumentar el tamaño del título del gráfico

plot.margin = margin(30, 30, 30, 30)) # Márgenes amplios para evitar cortes

# Guardar el gráfico especificando un tamaño mayor para el póster
ggsave("C:/Users/USUARIO/Music/Ahora sí/PCA3_Llamados_Cobertura_Arborea_Poster.jpg", plot = p, width = 15, height = 10, dpi = 300)

Objetivo 3

Componentes Principales para Diferentes Especies

Código en R para realizar un gráfico de componentes principales (PCA) usando las 10 variables seleccionadas

# Instalar y cargar las librerías necesarias
if (!require("ggplot2")) install.packages("ggplot2")
if (!require("FactoMineR")) install.packages("FactoMineR")
if (!require("factoextra")) install.packages("factoextra")
if (!require("dplyr")) install.packages("dplyr")

library(ggplot2)
library(FactoMineR)
library(factoextra)
library(dplyr)

# Cargar los datos desde un archivo CSV (ajustar el nombre del archivo y la ruta según corresponda)
datos <- Objetivo_3_Cantos_

Mostrar los nombres de las columnas para verificar

```
cat("Nombres de las columnas en los datos cargados:\n")
print(colnames(datos))

# Verificar si hay valores faltantes en los datos
if (any(is.na(datos))) {
  warning("Existen valores faltantes en los datos. Por favor, revisa y limpia los datos antes de continuar.")
}

# Verificar la cantidad de individuos por especie
tabla_especies <- table(datos$Especie)
print(tabla_especies)
cat("Cantidad total de individuos antes del filtrado: ", nrow(datos), "\n")

# Seleccionar las 10 variables de interés (asegurarse de que los nombres coincidan exactamente con los del archivo CSV)
variables_seleccionadas <- c("Peak Freq (Hz)", "Center Freq (Hz)", "Agg Entropy (bits)", "SNR NIST Quick (dB)",
                             "Dur 90% (s)", "Delta Time (s)", "Peak Power Density (dB FS/Hz)", "BW 50% (Hz)",
                             "Max Entropy (bits)", "PFC Max Freq (Hz)")

# Filtrar los datos para incluir solo las 10 variables seleccionadas
datos_filtrados <- datos[ , c("Especie", variables_seleccionadas), drop = FALSE]
cat("Cantidad total de individuos después del filtrado: ", nrow(datos_filtrados), "\n")

# Eliminar filas con valores faltantes
datos_filtrados <- na.omit(datos_filtrados)
cat("Cantidad total de individuos después de eliminar valores faltantes: ", nrow(datos_filtrados), "\n")
```

```
# Normalizar los datos usando la escala estándar (media = 0, desviación estándar = 1)
datos_normalizados <- datos_filtrados %>%
  mutate(across(all_of(variables_seleccionadas), scale))
cat("Cantidad total de individuos después de la normalización: ", nrow(datos_normalizados), "\n")

# Verificar si hay valores faltantes después de la normalización
if (any(is.na(datos_normalizados))) {
  warning("Existen valores faltantes después de la normalización. Por favor, revisa y limpia los datos antes de continuar.")
}

# Realizar el análisis de componentes principales (PCA)
datos_pca <- datos_normalizados %>% select(all_of(variables_seleccionadas))
res.pca <- PCA(datos_pca, graph = FALSE)
cat("Cantidad total de individuos después del PCA: ", nrow(datos_pca), "\n")

# Combinar las coordenadas del PCA con la columna de especie
coordenadas_pca <- as.data.frame(res.pca$ind$coord)
datos_pca_especie <- cbind(coordenadas_pca, Especie = datos_normalizados$Especie)
cat("Cantidad total de individuos después de combinar con las especies: ", nrow(datos_pca_especie), "\n")

# Verificar la cantidad de individuos por especie después del PCA
tabla_especies_pca <- table(datos_pca_especie$Especie)
print(tabla_especies_pca)

# Verificar si hay duplicación de coordenadas del PCA
duplicated_coords <- datos_pca_especie %>% select(Dim.1, Dim.2) %>% duplicated()
if (any(duplicated_coords)) {
```

```
  cat("Hay individuos con coordenadas duplicadas en el PCA: ", sum(duplicated_coords), "\n")
}

# Graficar los componentes principales usando factoextra
fviz_pca_ind(res.pca,
             geom.ind = "point",
             palette = c("#00AFBB", "#E7B800", "#FC4E07", "#9370DB"),
             repel = TRUE,
             pointsize = 3) +
  labs(title = "Análisis de Componentes Principales (PCA)",
             x = "Componente Principal 1",
             y = "Componente Principal 2") +
  theme(axis.title = element_text(size = 14), # Tamaño de las etiquetas de los ejes
             axis.text = element_text(size = 12)) # Tamaño de los valores de los ejes

# Graficar PCA con especie como color
# Crear el gráfico y asignarlo a una variable
p <- ggplot(datos_pca_especie, aes(x = Dim.2, y = Dim.3, color = as.factor(Especie))) +
  geom_point(size = 7, alpha = 0.7) +
  theme_minimal() +
  labs(title = "PCA - Llamados (Especie)",
             x = "CP 2 (Ancho de Banda 50%) - 36%",
             y = "CP 3 (Duración 90%) - 33%",
             color = "Especie") +
  scale_color_manual(values = c("#FF1493", "#00BFFF", "#CD0000", "#FF7F24", "#66CD00", "#D15FEE")) +
  theme(axis.title = element_text(size = 37),  # Aumentar el tamaño de los títulos de los ejes
             axis.text = element_text(size = 35),   # Aumentar el tamaño del texto de los ejes
             legend.text = element_text(size = 23), # Aumentar el tamaño del texto de la leyenda
```

```
        plot.title = element_text(size = 35, hjust = 0.5), # Aumentar el tamaño del título del gráfico
        plot.margin = margin(30, 30, 30, 30)) # Márgenes amplios para evitar cortes

# Guardar el gráfico especificando un tamaño mayor para el póster
ggsave("C:/Users/USUARIO/Music/Ahora sí/PCA3_Llamados_Especie_Poster.jpg", plot = p, width = 15, height = 10, dpi = 300)
```