



## VARIACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL CANTO DEL GORRIÓN DE COLLAR RUFO (*ZONOTRICHIA CAPENSIS*) A LO LARGO DE UN GRADIENTE URBANO EN EL SUROESTE DEL PERÚ

Rafael Montes-Rivas<sup>1\*</sup> · Víctor Gamarra-Toledo<sup>2</sup> · Evaristo López<sup>1</sup> · Marcelo Araya-Salas<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

<sup>2</sup> Área de Ornitología, Colección Científica, Museo de Historia Natural (MUSA), Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Av. Alcides Carrión s/n, Arequipa, Perú.

<sup>3</sup> Recinto de Golfito, Universidad de Costa Rica, 14, Puntarenas, Golfito, Costa Rica.

E-mail: Rafael Montes-Rivas · [rmontes@unsa.edu.pe](mailto:rmontes@unsa.edu.pe)

**Resumen** · El canto cumple un importante rol en la ecología y comportamiento de las aves, y entender los procesos que alteran la producción y transmisión del canto es fundamental para dilucidar su respuesta a cambios en el ambiente. En este contexto, los ambientes urbanos representan sistemas de estudio útiles para entender esta adaptación. Con este fin, examinamos la estructura del canto del gorrión de collar rufo (*Zonotrichia capensis*) a lo largo de un gradiente urbano en la ciudad de Arequipa, en el suroeste del Perú. Obtuvimos 240 cantos en total de 80 individuos, distribuidos en áreas urbanas, suburbanas, rurales y silvestres, y analizamos la frecuencia máxima, frecuencia mínima y duración de la introducción y del trino. Encontramos diferencias significativas en la estructura espectral (frecuencia mínima) a lo largo del gradiente urbano. Igualmente las frecuencias mínimas de la introducción y el trino fueron más altas en áreas más urbanizadas, mientras que las frecuencias máximas y duraciones de ambas partes del canto no variaron. Los efectos del ruido antropogénico o de las estructuras verticales de concreto de áreas muy urbanizadas podrían explicar la variación en el canto de esta especie común de la ciudad de Arequipa, y este estudio también muestra que la frecuencia mínima en esta especie es el parámetro más susceptible de presentar variación en ambientes con distintos grados de urbanización.

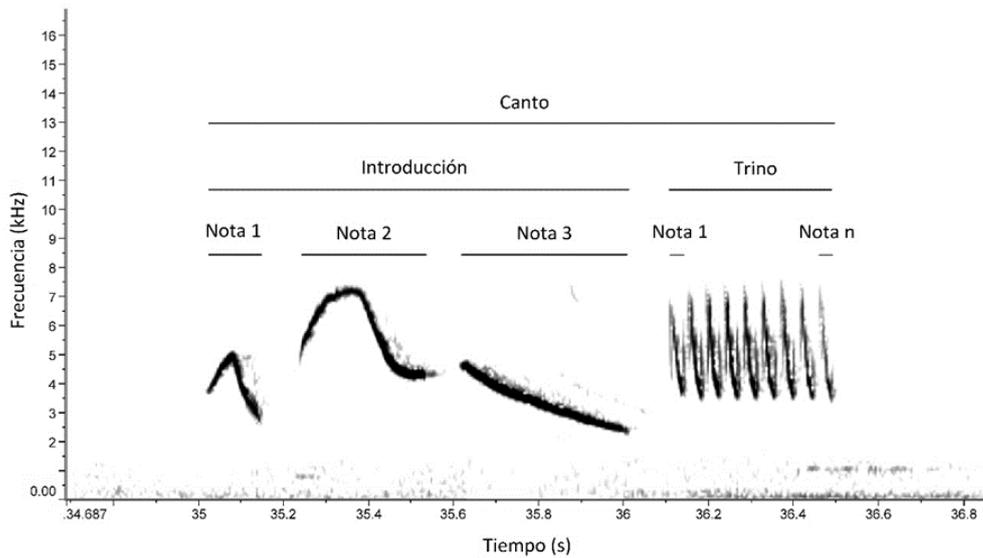
**Abstract** · **Variation in song structure of the Rufous-collared Sparrow (*Zonotrichia capensis*) along an urban gradient in southwestern Peru** Song plays a crucial role in bird ecology and behavior, and understanding the processes that alter the production and transmission of song is fundamental to elucidate its response to changes in the environment. In this context, urban environments represent useful study systems for understanding this adaptation. To this end, we examined the song structure of the Rufous-collared Sparrow (*Zonotrichia capensis*) along an urban gradient in the city of Arequipa, southwestern Peru. We obtained 240 songs in total from 80 individuals, distributed in urban, suburban, rural, and wild areas, and we analyzed the maximum frequency, minimum frequency and duration of the introduction and trill. We found significant differences in the spectral (minimum frequency) along the urban gradient. We also found that the minimum frequencies of introduction and trill were higher in urbanized areas, while the maximum frequencies and durations of both parts of the song did not vary. The anthropogenic noise effects or vertical concrete structures in highly urbanized areas could explain variation in song traits of this common species in the city of Arequipa, and this study shows that the minimum frequency of this species is the most susceptible parameter presenting variations in environments with different degrees of urbanization.

**Key words:** Arequipa · Song · Urbanization gradient · *Zonotrichia capensis*

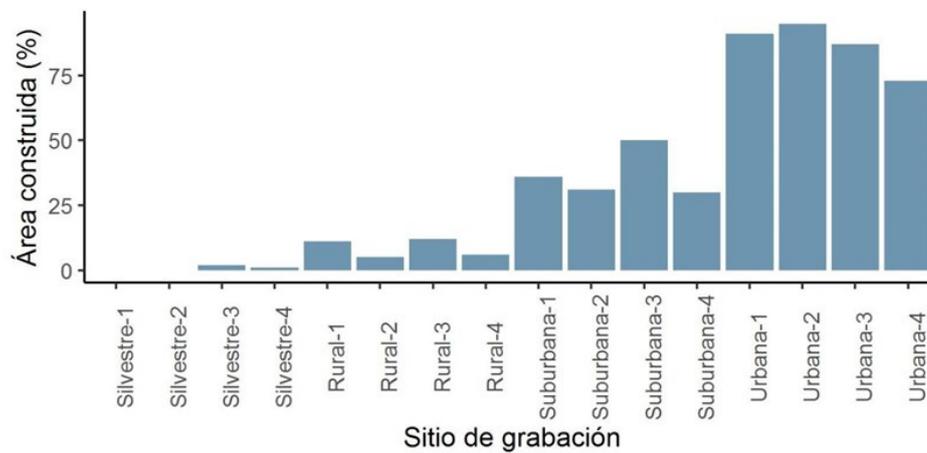
### INTRODUCCIÓN

En las aves, el canto cumple un rol importante en varios aspectos de su ecología y comportamiento (Kroodsma & Miller 1996, Slabbekoorn & Smith 2002, Collins 2004, Marler & Slabbekoorn 2004). Su principal función es la comunicación para atraer una pareja (Eriksson & Wallin 1986), aunque también puede albergar gran cantidad de información respecto a la calidad del macho (Gorissen et al. 2005, Leitner 2007, Halfwerk et al. 2011, Luther et al. 2016), traducida en la fertilidad del emisor y el éxito reproductivo de su descendencia (Searcy & Andersson 1986). No obstante, el canto también cumple un rol crucial en el aislamiento reproductivo y en los procesos de especiación (Seddon & Tobias 2007, Mason et al. 2017) al actuar como una barrera importante contra la hibridación (Kroodsma & Miller 1996, Marler & Slabbekoorn 2004); por lo tanto, es necesario comprender cómo determinados cambios en el ambiente pueden afectar la estructura de estas señales si se quiere entender en detalle los procesos de adaptación que han generado los cantos actuales.

La contaminación acústica en ambientes urbanos ha sido identificada como uno de los principales factores que producen divergencia o ajustes vocales en el canto de las aves urbanas (Slabbekoorn & den Boer-Visser 2006). Esta contaminación es



**Figura 1.** Espectrograma del canto del gorrión de collar rufo en un área urbana. Se observan las dos partes que componen el canto: la introducción y el trino.

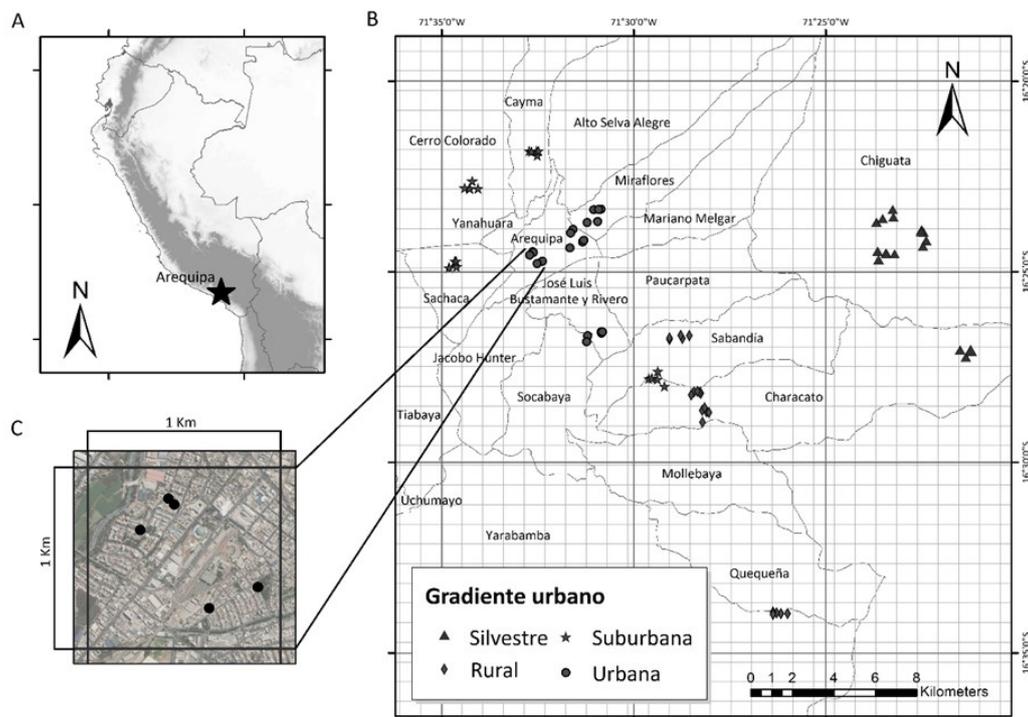


**Figura 2.** Gráfico de barras de los sitios de grabación y el porcentaje de área construida. Se muestran los 4 sitios de grabación por cada área del gradiente de urbanización clasificados según el porcentaje de área construida en 1 km<sup>2</sup>. Los sitios de grabación de áreas urbanas tienen construido más del 51%; los de áreas suburbanas, del 25% al 50%; los de áreas rurales, del 3% al 24%, y las áreas silvestres, de 0% al 2%.

provocada por el ruido proveniente de las actividades humanas, que genera paisajes sonoros irregulares (Proulx et al. 2019) y constituye así una nueva presión para las aves (Slabbekoorn & Peet 2003, Patricelli & Blickley 2006). El principal efecto que tiene el ruido antropogénico es el enmascaramiento de las señales acústicas (Derryberry et al. 2016), que afecta la comunicación (Brumm 2004). Este ocurre cuando un ruido de una amplitud similar o mayor, y en el mismo rango de frecuencias que el canto, prevalece sobre la señal de interés (Kight et al. 2012). De esta manera, se han observado cambios en las características del canto en condiciones ruidosas que permitirían mitigar el enmascaramiento (Brumm 2004, Slabbekoorn & den Boer-Visser 2006, Nemeth & Brumm 2010, Dominoni et al. 2016), y algunos de estos incluyen: el aumento de la amplitud, es decir, de la energía o intensidad del canto (Brumm 2004, Nemeth & Brumm 2010); el incremento de las frecuencias mínimas y/o máximas (Slabbekoorn & Peet 2003, Nemeth & Brumm 2010, Derryberry et al. 2016, Sayers et al. 2019); los cambios en la frecuencia que concentra la mayor parte de la energía (Mendes et al. 2011a); el aumento en la duración de las notas (Mendes et

al. 2011a), o la disminución de la duración del canto (Proppe et al. 2011). Si bien estas modificaciones permiten que las señales acústicas sean percibidas, también tienen costos energéticos adicionales al momento de producir el canto (Brumm 2004, Da Silva et al. 2015, Zwart et al. 2016, Mendes et al. 2017). Por otro lado, las señales acústicas también son afectadas por la reverberación, provocada, por ejemplo, por la gran cantidad de superficies verticales que encontramos en las ciudades (Kight et al. 2012), la cual aumenta cuando las frecuencias son más altas y cuando las señales tienen una mayor duración (Job et al. 2016).

En las grandes ciudades, el acelerado crecimiento urbano tiene efectos importantes en la adaptación de las especies (Slabbekoorn & den Boer-Visser 2006), por lo cual estos entornos representan sistemas de estudio útiles para entender cómo las aves adaptan sus cantos a las diversas presiones del ambiente (Patricelli & Blickley 2006). Moseley et al. (2018), por ejemplo, sugieren que la adaptación a estos ambientes se debe a la selección cultural de los cantos, es decir, a través del aprendizaje se filtran o seleccionan los cantos más eficientes según las características del lugar. De es-



**Figura 3:** Área de estudio en Arequipa. **(A)** Ubicación de la ciudad de Arequipa. **(B)** Estaciones de grabación en la ciudad de Arequipa en las cuatro áreas del gradiente urbano. Los triángulos indican individuos de áreas silvestres; los rombos, individuos de áreas rurales; las estrellas, individuos de áreas suburbanas; los círculos, individuos de áreas urbanas. **(C)** Ejemplo de una cuadrícula de 1 km<sup>2</sup> que, en este caso, corresponde a un sitio de grabación en un área urbana. Los puntos indican los lugares donde fueron grabados individuos de gorrión de collar rufo.

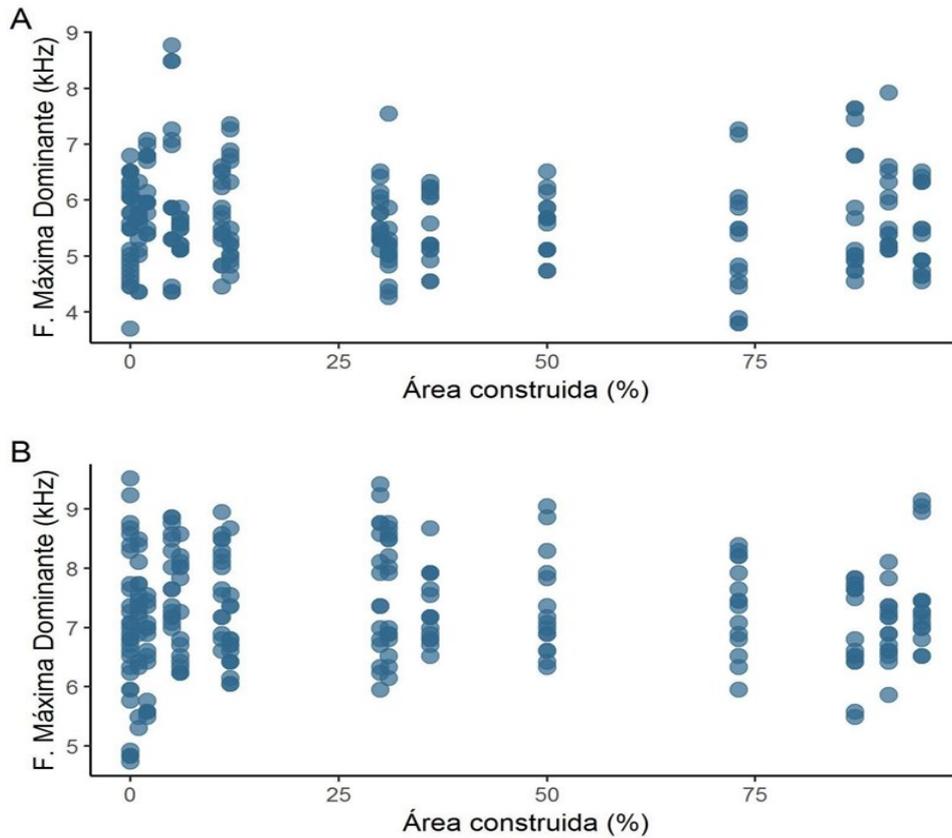
ta forma, en ambientes urbanos, las aves irían copiando y transmitiendo de generación en generación los cantos que sean menos enmascarados por el ruido de las ciudades (Luther & Baptista 2010, Moseley et al. 2018) y, en consecuencia, las diferencias encontradas en la estructura del canto a lo largo de gradientes urbanos también podrían reflejar los distintos dialectos que han evolucionado culturalmente como en respuesta al ambiente (Mendes et al. 2011a, 2011b, 2017; Job et al. 2016).

Por otra parte, en la región neotropical, los estudios sobre cómo las aves ajustan sus conductas vocales para evitar el enmascaramiento acústico (Mendoza & Arce-Plata 2012, Mendes et al. 2011a, 2017, León et al. 2014, Dorado-Correa et al. 2016, Sayers et al. 2019) demuestran que los patrones son diferentes y que las especies usan estrategias particulares (Mendes et al. 2017, Sayers et al. 2019), que resultan ser más o menos costosas dependiendo de la especie (Mendes et al. 2011a). Dada la variación marcada entre especies en las respuestas al enmascaramiento, resulta fundamental entender estos patrones para un mayor número de especies, así como identificar los factores subyacentes a esta variación. En este contexto, el gorrión de collar rufo (*Zonotrichia capensis*) representa un buen sistema de estudio para entender los patrones y estrategias que utilizan algunas especies para adaptarse a los ambientes urbanos.

El gorrión de collar rufo es un ave paseriforme oscine de la familia Emberezidae, distribuida ampliamente en América Central y del Sur a lo largo de un gradiente altitudinal desde el nivel del mar hasta aproximadamente los 4.500 m de altitud (Chapman 1940, Handford & Nottebohm 1976, Schulenberg et al. 2010), y es muy común en ambientes urbanos en ciudades de la vertiente occidental de los Andes peruanos.

El canto de esta especie está conformado por dos partes: la “introducción”, compuesta de una o varias notas silbadas, y el “trino”, notas similares que se repiten rápidamente (Nottebohm 1969, Laiolo 2011, García et al. 2015, Danner et al. 2017) (Figura 1). En ambientes urbanos y rurales, se han reportado variaciones en las frecuencias y número de notas entre individuos (Laiolo 2011, Calderón-Quiroga et al. 2020). Además, se ha sugerido la presencia de dialectos en función de las características de los ambientes en los que está distribuida la especie (Nottebohm 1969, Tubaro & Segura 1994, García et al. 2015).

Aquí examinamos la estructura del canto del gorrión de collar rufo a lo largo de un gradiente urbano en la ciudad Arequipa, la segunda ciudad más poblada del Perú (Instituto Nacional de Estadística e Informática 2017). Realizamos este estudio en función de dos enfoques al analizar por separado cada parte del canto y cada parámetro acústico. De esta manera, planteamos las siguientes hipótesis: a) cada parte del canto responderá de manera diferente por efecto del gradiente urbano, y predijimos que el trino, elemento o porción del canto que contiene más información (León et al. 2014), presentará mayor variación como respuesta al grado de urbanización, y b) en relación con los parámetros acústicos, planteamos la hipótesis de que los parámetros espectrales (frecuencias máximas y mínimas) y el parámetro temporal (duración) serán distintos a lo largo del gradiente urbano en función de adaptaciones al enmascaramiento y la reverberación del canto. Por lo tanto, predijimos que, en los ambientes más urbanizados, las frecuencias serán más altas como mecanismo para evitar el enmascaramiento por el ruido de la ciudad. Además, esperamos encontrar introducciones y trinos más cortos en ambientes más urbanizados como una



**Figura 4.** Gráficos de dispersión de las frecuencias máximas de la introducción (A) y trino (B) del gorrión de collar rufo en sitios de grabación con distinto porcentaje de área construida. Las frecuencias máximas no difieren en áreas con distinto grado de urbanización.

posible respuesta para aminorar la degradación del canto por reverberación causada por las edificaciones verticales.

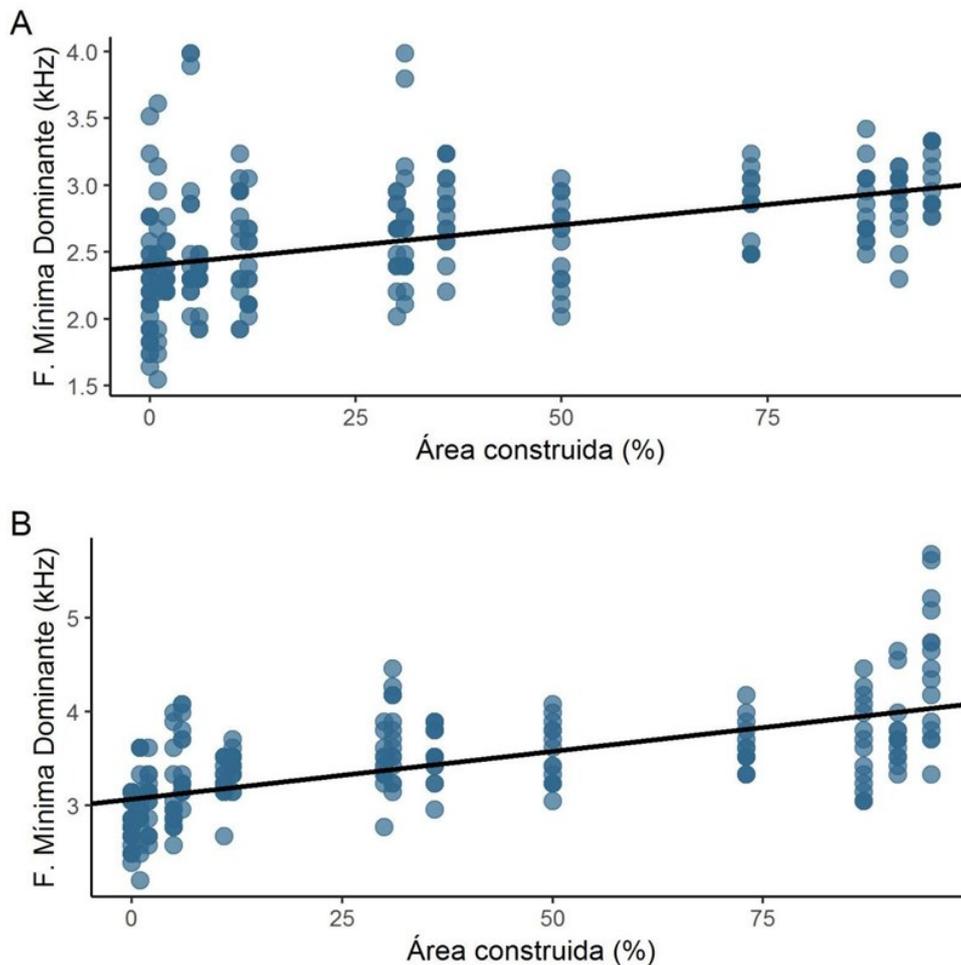
## MÉTODOS

**Área de estudio.** Grabamos en la ciudad Arequipa ( $16^{\circ} 23'56''S$ ,  $71^{\circ}32'13''O$ ), ubicada en la provincia y región de Arequipa al suroeste del Perú, a una altitud promedio de 2.335 m, con clima templado y seco, temperatura media anual de  $15,8^{\circ}C$  (Montesinos-Tubée et al. 2019) y perteneciente al sector fitogeográfico Misti-Chachani (Galán de Mera et al. 2010). La ciudad está conformada por distritos urbanos y rurales, que conforman una matriz caracterizada por edificios modernos y coloniales, y la denominada campiña, en la cual se desarrollan actividades como la agricultura y la ganadería (Instituto Municipal de Planeamiento de Arequipa [IMPLA] 2016, Benavente et al. 2018). Arequipa es la segunda ciudad más poblada del Perú, con un total de 1.008.290 habitantes (Instituto Nacional de Estadística e Informática 2017). La actividad antrópica en esta ciudad genera altos niveles de contaminación sonora, principalmente en áreas urbanas, con el parque automotor como la principal fuente de ruido (Cahuata 2019, Herrera 2019).

El área de estudio fue seleccionada a partir de una grilla dividida en cuadrículas de  $1.000 \times 1.000$  m (Marzluff et al. 2001, Abilhoa & Amorin 2017) en los 21 distritos considerados en el Plan de Desarrollo Metropolitano de Arequipa 2016-2025 (IMPLA 2016). Esta grilla se elaboró con la aplicación Fishnet del software ArcGis 10.5 (ESRI 2017) sobre imágenes satelitales de la herramienta ArcBruTile 0.7. El gradiente urbano fue establecido siguiendo a Marzluff et al. (2001), que-

nes lo clasifican en función del porcentaje de área construida (e incluye viviendas, edificios comerciales e industriales, carreteras o cualquier otra superficie de concreto). Asimismo, modificamos los intervalos en la clasificación para evitar brechas en los porcentajes e identificamos las siguientes áreas: (1) urbana, con un porcentaje de área construida de 51% o más, construcciones de varios pisos en su mayoría, altamente poblada; (2) suburbana, 25% a 50% construido, en su mayoría edificios que no exceden los dos pisos, con áreas verdes comunes; (3) rural, 3% a 24% construido, rodeado por una matriz agrícola, escasamente poblada, y (4) silvestre, con un área construida de 0% a 2%, con posible presencia de viviendas. En la grilla se eligieron al azar cuatro cuadrículas (sitios de grabación) para cada área del gradiente urbano (Figura 2); de esta forma, los 16 sitios de grabación se ubicaron en 13 distritos: Arequipa, Cayma, Cerro Colorado, Characato, Chiguata, José Luis Bustamante y Rivero, Miraflores, Mollebaya, Quequeña, Sabandía, Sachaca, Socabaya y Yarbamba. Algunos sitios de grabación aparecieron contiguos y otros estuvieron distanciados hasta por 24,20 km (Figura 3).

**Grabación del canto.** En cada uno de los sitios de grabación establecidos a lo largo del gradiente urbano, grabamos a cinco individuos cantando durante un máximo de 5 min. Tratamos de acercarnos lo máximo posible al ave cantando, de tal manera que no grabamos a individuos que estuvieran a más de 10 m. Al finalizar la grabación de un individuo y cuando este hubiera dejado de cantar, nos alejamos entre 70 m y 100 m como mínimo, teniendo en cuenta que el territorio del gorrión de collar rufo es pequeño (con un área promedio de  $650,6 \text{ m}^2$ ) (Miller & Miller 1968). El mismo criterio fue uti-



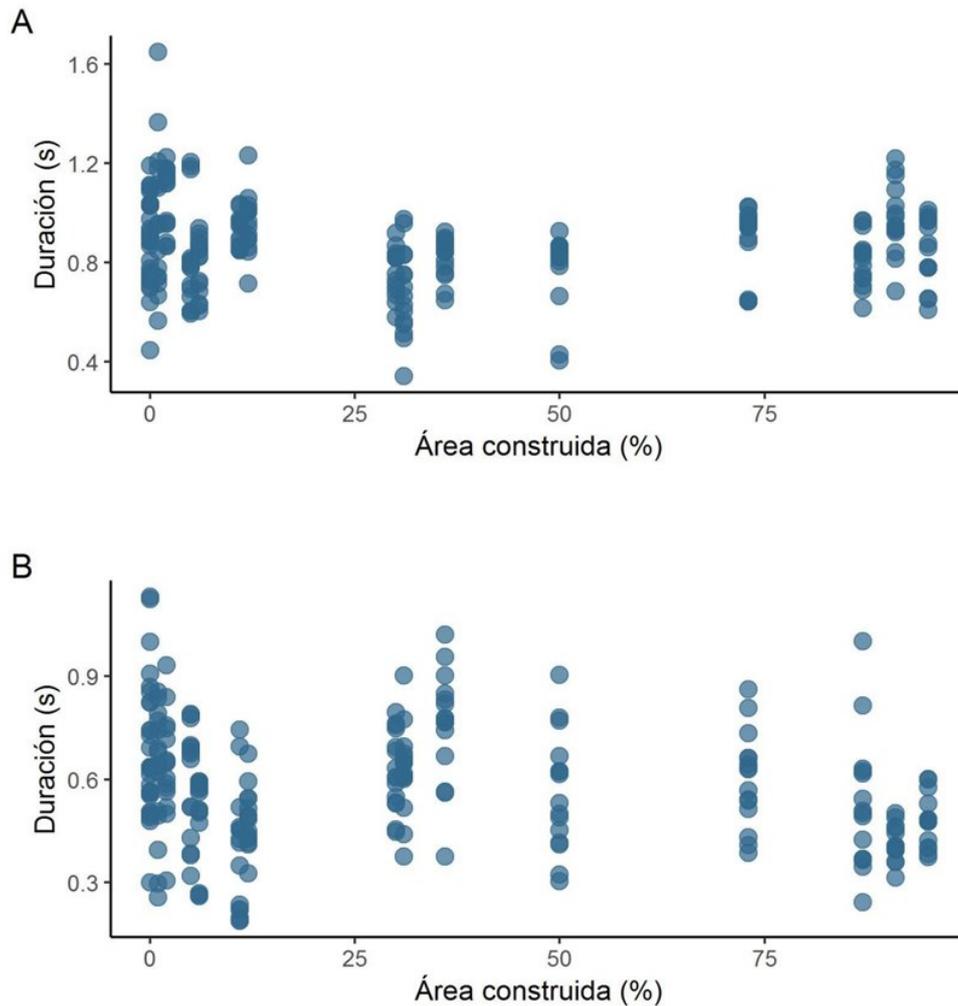
**Figura 5.** Gráficos de dispersión de las frecuencias mínimas de la introducción (A) y trino (B) del gorrión de collar rufo en sitios de grabación con distinto porcentaje de área construida. Las frecuencias mínimas aumentaron progresivamente conforme el grado de urbanización. La línea de mejor ajuste tiene una clara pendiente positiva. En los modelos bayesianos se ve un aumento altamente significativo de 6,105 Hz en la introducción y de 10,149 Hz en el trino por cada aumento en el porcentaje construido del sitio de grabación.

lizado cuando fue necesario visitar un sitio de grabación varios días. Realizamos las grabaciones desde las 07:30 hasta las 09:00 h, horario en el que el gorrión de collar rufo muestra su pico de actividad, durante los meses de agosto, septiembre y octubre de 2019, al inicio de la época reproductiva. Durante este periodo, visitamos los sitios de grabación indistintamente al área del gradiente de urbanización al cual pertenecían, para evitar que algún cambio del canto a lo largo de la temporada de apareamiento fuese asociado con los tiempos de grabación. Para las grabaciones, utilizamos un micrófono unidireccional Sennheiser ME66 sujetado a un manubrio con suspensión ("Pistol Grip"), con un protector de viento Rycote Softie y conectado a una grabadora digital Marantz PMD 661 MK II. Las grabaciones se hicieron en formato PCM, con una tasa de muestreo de 48 kHz y un intervalo dinámico de 24 bits, empleando alimentación Phatom.

**Análisis acústico.** Para recortar los archivos de audio, usamos el software Audacity 2.3.1. (Audacity Team 2019). Para cada individuo, se eligió el primer canto, el de la mitad y el último de la grabación. Elaboramos espectrogramas (Figura 1), en los cuales anotamos cada una de las notas de los tres cantos por individuo con el programa Raven Pro 1.5 (Center for Conservation Bioacoustics 2014) usando la función visualización de Hann y un largo de ventana de 570 valores de amplitud. Obtuvimos parámetros de frecuencia máxima do-

minante, frecuencia mínima dominante y duración para la introducción y el trino usando el lenguaje estadístico R 3.5.3 (R Core Team 2019), con las funciones *spectro\_analysis* y *song\_param* del paquete warbler (Araya-Salas & Smith-Vidaurre 2017). Se recomiendan las mediciones de frecuencia pico en este tipo de estudio para evitar sesgos atribuidos al observador (Ríos-Chelén et al. 2017); sin embargo, su medición resulta problemática cuando la relación señal-ruido es baja (Job et al. 2016), ya que las mediciones automáticas podrían confundir algunas notas con el ruido de fondo cuando este es considerable (Cardoso & Atwell 2011). Por tanto, estas mediciones no fueron aplicadas en nuestro estudio. Las medidas de frecuencia dominante utilizadas se basan en mediciones automatizadas de los contornos de frecuencia a lo largo de las señales, y estos contornos están constituidos por los valores de frecuencia con el valor más alto de amplitud en cada segmento de tiempo ("time bin") en el espectrograma. De esta manera, estas medidas no se derivan de los límites de frecuencia y tiempo definidos manualmente.

**Análisis estadísticos.** Ejecutamos un modelo lineal mixto bayesiano con el paquete MCMCglmm (Hadfield 2010) para cada parámetro de la introducción y el trino. En los modelos consideramos al sitio de grabación y al individuo como términos aleatorios y al porcentaje de área construida como variable predictora. Los modelos fueron repetidos tres veces para



**Figura 6.** Gráficos de dispersión de las duraciones de la introducción (A) y trino (B) del gorrión de collar rufo en sitios de grabación con distinto porcentaje de área construida. Las duraciones no difieren en las áreas menos urbanizadas.

evaluar la convergencia de las cadenas de Markov.

## RESULTADOS

Obtuvimos y analizamos grabaciones de 80 individuos de gorrión de collar rufo: 20 por cada gradiente de urbanización y 5 por cada estación de grabación, para un total de 240 cantos analizados. No se encontraron diferencias detectables en las frecuencias máximas dominantes de la introducción (tamaño de efecto =  $-0,0024$ , 95% CI:  $-0,0061$  a  $0,0012$ ,  $p = 0,2$ ; Figura 4A) ni del trino (tamaño de efecto =  $0,0010$ , 95% CI:  $-0,0060$  a  $0,0065$ ,  $p = 0,62$ ; Figura 4B). Las frecuencias mínimas dominantes de la introducción (tamaño de efecto =  $0,0061$ , 95% CI:  $0,0038$  a  $0,0084$ ,  $p < 0,005$ ; Figura 5A) y trino (tamaño de efecto =  $0,0101$ , 95% CI:  $0,0066$  a  $0,0135$ ,  $p < 0,005$ ; Figura 5B) variaron significativamente: fueron más bajas en las áreas silvestres y aumentaron paulatinamente en las áreas rurales, suburbanas y urbanas, donde fueron más altas. Finalmente, no hubo variación significativa en la duración de la introducción (tamaño de efecto =  $-0,0005$ , 95% CI:  $-0,0020$  a  $0,0010$ ,  $p = 0,57$ ; Figura 6A) ni del trino (tamaño de efecto =  $-0,0011$ , 95% CI:  $-0,0023$  a  $0,0009$ ,  $p = 0,15$ ; Figura 6B).

## DISCUSIÓN

Encontramos variaciones en la estructura de la introducción y trino del gorrión de collar rufo a lo largo del gradiente urbano en la ciudad de Arequipa, donde la frecuencia mínima fue más alta en las áreas con mayor grado de urbanización. Esta respuesta parece ser una característica más extendida en algunas aves de ambientes urbanos, lo que demuestra que las frecuencias mínimas son más altas en estos espacios en comparación con áreas rurales (e.g., Nemeth & Brumm [2010], *Turdus merula* y *Parus major*; Derryberry et al. [2016] y Luther et al. [2016], *Zonotrichia leucophrys nutalli*; Cyr et al. [2020], *Troglodytes aedon*; Phillips & Katti [2020], *Z. leucophrys gambelii*). Igualmente, la falta de asociación de la frecuencia máxima de la introducción o trino y el porcentaje construido sugiere que no todas las especies son capaces de ajustar sus frecuencias máximas (Nemeth & Brumm 2010, Mendes et al. 2011b), y que las que sí son capaces de hacerlo podrían tener estructuras acústicas que les facilitan la producción de notas más agudas (Patricelli & Blickley 2006, Nemeth & Brumm 2010). En el caso del gorrión de collar rufo, nuestro estudio encontró que las frecuencias máximas en los elementos de su canto no se vieron influenciadas por el grado de urbanización.

Por otra parte, durante las grabaciones de nuestro estudio se pudo constatar el intenso flujo vehicular en áreas ur-

banas y suburbanas, a diferencia de las áreas rurales y silvestres. El ruido producido podría influenciar la respuesta de las señales acústicas a través de un proceso de enmascaramiento (Derryberry et al. 2016); en este escenario, habría una tendencia de las aves a aumentar sus frecuencias para evitar la superposición de sus señales con el ruido que se concentra en frecuencias bajas (Kight et al. 2012). Este mecanismo podría explicar la asociación entre el grado de urbanización y la variación en la estructura del canto observada en este estudio; no obstante, futuros estudios con medidas precisas del ruido ambiental son necesarios para evaluar esta hipótesis.

Igualmente, Mendoza & Arce-Plata (2012) sugieren que los cantos enmascarados podrían estar afectando la efectividad social al impedir el cumplimiento de sus funciones adecuadamente. El incremento en las frecuencias en función del ruido y el enmascaramiento pueden mostrar un comportamiento diferente dependiendo del elemento del canto o tipo de vocalización examinado, y los mecanismos que podrían explicar por qué sucede esto solo en ciertas partes del canto aún no son claros. Por ejemplo, para *Z. leucophrys nuttalli*, Derryberry et al. (2016) registraron un incremento de frecuencias mínimas en el canto completo, mientras que Luther et al. (2016) solo en el trino. Asimismo, Phillips & Katti (2020) observaron este patrón en el zumbido y en el trino de *Z. leucophrys gambelii*, mas no en las demás partes del canto. Por ende, cabe la posibilidad de que el gorrión de collar rufo modifique las frecuencias de ambas partes del canto, porque el ruido antropogénico las estaría enmascarando similarmente.

Contrario a nuestras predicciones, no se evidenció una menor duración de la introducción ni del trino en las áreas más urbanizadas: se esperaba una menor duración en las partes del canto por el hecho de que las señales acústicas son menos persistentes en ambientes urbanos para disminuir la reverberación provocada por las superficies de las edificaciones humanas, que constituyen barreras reflectantes del sonido (Kight et al. 2012). Otros estudios sugieren también que los cantos cortos pueden ser más fáciles de distribuir en brechas cortas de silencio que hay en las ciudades (Proppe et al. 2011), o que la duración del silbido (sonido de duración considerable) y todo el canto es menor en hábitats urbanos, mientras que la duración del zumbido (sonido áspero de amplio ancho de banda) es menor conforme aumenta el ruido, dependiendo del hábitat (Phillips & Katti 2020).

Sin embargo, las modificaciones observadas en la estructura del canto pueden ser contraproducentes para la especie y sus señales acústicas: por ejemplo, si el canto adquiere frecuencias más altas, se puede favorecer que la señal sea escuchada en medio del ruido, pero es más fácilmente reverberada (Job et al. 2016) y degradada (Patricelli & Blickley 2006, Proppe 2010, Kight et al. 2012, Schäfer et al. 2017). Por otro lado, es posible que la percepción de la información cambie (Curry et al. 2018), lo que puede brindar información equívoca sobre la condición del macho (Gentry et al. 2017) y, en consecuencia, hacerlo menos atractivo para la hembra (Patricelli & Blickley 2006, Halfwerk et al. 2011, Proppe et al. 2011) o poco amenazante para los intrusos (Patricelli & Blickley 2006, Zwart et al. 2016).

Adicionalmente, las diferencias halladas en la estructura del canto del gorrión de collar rufo en la ciudad de Arequipa también podrían sugerir la presencia de una variación geográfica, lo cual no es excluyente de un proceso de adaptación

a los niveles de ruido. En este contexto, la adaptación se daría principalmente por medio de evolución cultural, en la que las variantes más enmascaradas son copiadas por otros individuos con menor frecuencia. La evolución cultural sería una forma de adaptación relativamente rápida a estos entornos novedosos (Moseley et al. 2018). Luther & Baptista (2010), al estudiar dialectos de *Z. leucophrys nuttalli* durante 30 años, sugieren que los cantos con frecuencias más altas tienen una mayor probabilidad de ser transmitidos de generación en generación en entornos urbanos; por lo tanto, el aprendizaje social en aves oscines podría favorecer la prevalencia de cantos menos enmascarados por el ruido (Moseley et al. 2018).

Localmente, son pocos los estudios que han abordado la adaptación del canto del gorrión de collar rufo a los ambientes urbanos. Uno de estos es el realizado por Laiolo (2011), que encontró en entornos urbanos frecuencias mínimas más altas del trino y su primera nota, así como de la segunda nota de la introducción. Por otra parte, Calderón-Quiroga et al. (2020) observaron variaciones en el número de notas, en la frecuencia máxima y la frecuencia mínima de la introducción (segunda y primera nota respectivamente), pero resaltan que no esto no respondería al ruido, sino a la estructura del hábitat. En general, nuestros resultados concuerdan con las variaciones en cuanto a frecuencias mínimas, aunque los estudios mencionados no contemplan la duración de cada parte del canto, que podría brindar información importante sobre la respuesta de este parámetro en distintos ambientes.

En conclusión, el gorrión de collar rufo es una especie que resalta por su interesante capacidad de adaptarse a ambientes urbanos al modificar la estructura del canto. Los individuos de ambientes más urbanizados tendrían frecuencias mínimas más altas, posiblemente para así evitar el enmascaramiento por el ruido de baja tonalidad característico de las ciudades. La modificación de este parámetro en ambas partes del canto, a pesar de su posible costo energético, indicaría una capacidad de adaptación similar en las distintas secciones del canto. Por último, nuestros resultados difieren a los estudios similares en esta especie. Esta discrepancia evidencia que la variación en la respuesta al gradiente de urbanización observada entre especies también puede encontrarse entre poblaciones de una especie, y sugiere que factores adicionales, más allá de las características intrínsecas de las especies, podrían estar afectando los procesos de adaptación del canto.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA) por la subvención del proyecto de investigación bajo el contrato N° TP-20-2018-UNSA. A la Administración Técnica Forestal y Fauna Silvestre (SERFOR) del Ministerio de Agricultura del Perú por la autorización del permiso de investigación (Resolución Administrativa N°049-2020-MINAGRI-SERFOR-ATFFS-AREQUIPA, código de Autorización N° 04-ARE/AUT-IFS-2020-002). Agradecemos especialmente a Fernando Montes, Juan Montes, César Rivas, Ioseph Montes y María Rivas, quienes asistieron y colaboraron durante las evaluaciones de campo. A Alberto Morales y a los miembros del Área de Ornitología del Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional de San Agustín (MUSA) por el apoyo logístico, colaboración y sugerencias durante la realización de esta investigación.

## REFERENCIAS

- Abilhoa V & R Amorin (2017) Effects of urbanization on the avian community in a southern Brazilian city. *Revista Brasileira de Ornitologia* 25: 31-39.
- Araya-Salas M & G Smith-Vidaurre (2017) warbleR: An R package to streamline analysis of animal acoustic signals. *Methods in Ecology and Evolution* 8: 184-191. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12624>.
- Audacity Team (2019) Audacity(R): free audio editor and recorder [Computer application]. Version 2.3.1. <https://audacityteam.org/>.
- Benavente C, P Camargo, G Sarmiento & L Mena (2018) Evaluación del desarrollo de la agricultura periurbana y propuesta de gestión integral en el distrito de Cayma, Arequipa, Perú. *Idesia (Arica)* 36: 53-61.
- Brumm H (2004) The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird. *Journal of Animal Ecology* 73: 434-440.
- Cahuata JH (2019) Evaluación de la calidad de ruido ambiental en la zona del centro histórico de Arequipa. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.
- Calderón-Quiroga S, M Riquero, M Marchant & HV Norambuena (2020) Variación del canto del Chincol (*Zonotrichia capensis*) en un gradiente urbano-natural del Concepción metropolitano, Chile. *Revista Chilena de Ornitología* 26: 13-18.
- Cardoso GC & JW Atwell (2011) On the relation between loudness and the increased song frequency of urban birds. *Animal Behaviour* 82: 831-836.
- Center for Conservation Bioacoustics (2014) Raven Pro: Interactive Sound Analysis Software (Version 1.5) [Computer software]. Ithaca, NY: The Cornell Lab of Ornithology. Available from <http://ravensoundsoftware.com/>.
- Chapman FM (1940) The post-glacial history of *Zonotrichia capensis*. *Bulletin of the AMNH* 77: 381-438.
- Collins S (2004) Vocal fighting and flirting: the functions of birdsong. Pp. 39-79 in Marler P & H Slabbekoorn (eds). *Nature's music: The Science of Birdsong*. Elsevier, London, UK.
- Curry CM, PG Des Brisay, P Rosa & N Koper (2018) Noise source and individual physiology mediate effectiveness of bird songs adjusted to anthropogenic noise. *Scientific reports* 8: 1-9.
- Cyr MĚ, K Wetten, MH Warrington & N Koper (2020) Variation in song structure of house wrens living in urban and rural areas in a Caribbean small island developing state. *Bioacoustics*: 1-14.
- Da Silva A, M Valcu & B Kempenaers (2015) Light pollution alters the phenology of dawn and dusk singing in common European songbirds. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370: 20140126.
- Danner JE, RC Fleischer, RM Danner & IT Moore (2017) Genetic population structure in an equatorial sparrow: roles for culture and geography. *Journal of Evolutionary Biology* 30: 1078-1093.
- Derryberry EP, RM Danner, JE Danner, GE Derryberry, JN Phillips, SE Lipshutz, K Gentry & DA Luther (2016) Patterns of song across natural and anthropogenic soundscapes suggest that white-crowned sparrows minimize acoustic masking and maximize signal content. *PLoS One* 11: e0154456.
- Dominoni DM, S Greif, E Nemeth & H Brumm (2016) Airport noise predicts song timing of European birds. *Ecology and Evolution* 6: 6151-6159.
- Dorado-Correa AM, M Rodríguez-Rocha & H Brumm (2016) Anthropogenic noise, but not artificial light levels predicts song behaviour in an equatorial bird. *Royal Society Open Science* 3: 160231.
- Eriksson D & L Wallin (1986) Male bird song attracts females—a field experiment. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 19: 297-299.
- ESRI (2017) ArcGIS Desktop: release 10. 5. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Galán de Mera A, E Linares, C Trujillo & F Villasante (2010) Termoclima y humedad en el sur del Perú. *Bioclimatología y bioindicadores* en el departamento de Arequipa. *Zonas Áridas* 14: 71-82.
- García NC, RS Arrieta, C Kopuchian & PL Tubaro (2015) Stability and change through time in the dialects of a Neotropical songbird, the Rufous-collared Sparrow. *Emu-Austral Ornithology* 115: 309-316.
- Gentry KE, EP Derryberry, RM Danner, JE Danner & DA Luther (2017) Immediate signaling flexibility in response to experimental noise in urban, but not rural, white-crowned sparrows. *Ecosphere* 8: e01916.
- Gorissen L, T Snoeijs, E Van Duyse & M Eens (2005) Heavy metal pollution affects dawn singing behaviour in a small passerine bird. *Oecologia* 145: 504-509.
- Hadfield JD (2010) MCMC Methods for Multi-Response Generalized Linear Mixed Models: The MCMCglmm R Package. *Journal of Statistical Software* 33: 1-22.
- Halfwerk W, S Bot, J Buikx, M van der Velde, J Komdeur, C ten Cate & H Slabbekoorn (2011) Low-frequency songs lose their potency in noisy urban conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108: 14549-14554.
- Handford P (1985) Morphological relationships among subspecies of the rufous-collared sparrow, *Zonotrichia capensis*. *Canadian Journal of Zoology* 63: 2383-2388.
- Handford P & F Nottebohm (1976) Allozymic and morphological variation in population samples of rufous-collared sparrow, *Zonotrichia capensis*, in relation to vocal dialects. *Evolution* 30: 802-817.
- Herrera AN (2019) Evaluación y modelamiento del ruido producido por el tráfico vehicular en las Av. Goyeneche e Independencia de la Ciudad de Arequipa. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.
- Instituto Municipal de Planeamiento de Arequipa (2016) Plan de Desarrollo Metropolitano de Arequipa 2016-2025. Disponible en <http://impla.gob.pe/publicaciones/pdm-2016-2025/> [Consultado el 3 de octubre del 2020]
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2017) Perú: Perfil sociodemográfico – Informe Nacional. Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. INEI, Lima, Perú.
- Job JR, SL Kohler & SA Gill (2016) Song adjustments by an open habitat bird to anthropogenic noise, urban structure, and vegetation. *Behavioral Ecology* 27: 1734-1744.
- Kight CR, MK Hinders & JP Swaddle (2012) Acoustic space is affected by anthropogenic habitat features: Implications for avian vocal communication. *Ornithological Monographs* 74: 47-62.
- Kroodsma DE & EH Miller (1996) *Ecology and Evolution of Acoustic Communication in Birds*. Cornell University Press, Ithaca, NY, USA.
- Laiolo P (2011) The Rufous-collared Sparrow *Zonotrichia capensis* utters higher frequency songs in urban habitats. *Revista Catalana d'Ornitologia* 27: 25-30.
- Leitner S (2007) Environmental factors affecting song control and song perception in songbirds. *Journal of Ornithology* 148: 539-545.
- León E, A Beltzer & M Quiroga (2014) El jilguero dorado (*Sicalis flaveola*) modifica la estructura de sus vocalizaciones para adaptarse a hábitats urbanos. *Revista mexicana de biodiversidad* 85: 546-552.
- Lougheed SC, L Campagna, JA Dávila, PL Tubaro, DA Lijtmaer & P Handford (2013) Continental phylogeography of an ecologically and morphologically diverse Neotropical songbird, *Zonotrichia capensis*. *BMC Evolutionary Biology* 13: 58.
- Luther D & L Baptista (2010) Urban noise and the cultural evolution of bird songs. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 277: 469-473.
- Luther DA, J Phillips & EP Derryberry (2016) Not so sexy in the city: urban birds adjust songs to noise but compromise vocal performance. *Behavioral Ecology* 27: 332-340.
- Marler P & H Slabbekoorn (2004) *Nature's music: the science of birdsong*. Elsevier, Cambridge, USA.

- Marzluff JM, R Bowman & R Donnelly (2001) A historical perspective on urban bird research: trends, terms, and approaches. Pp. 1-17 in Bowman, R & Donnelly R (eds.). *Avian ecology and conservation in an urbanizing world*. Springer, Boston, USA.
- Mason NA, KJ Burns, JA Tobias, S Claramunt, N Seddon & EP Derryberry (2017) Song evolution, speciation, and vocal learning in passerine birds. *Evolution* 71: 786-796.
- Mendes S, VJ Colino-Rabanal & SJ Peris (2011a) Diferencias en el canto de la Ratona Común (*Troglodytes musculus*) en ambientes con distintos niveles de influencia humana. *El Hornero* 26: 85-93
- Mendes S, VJ Colino-Rabanal & SJ Peris (2011b) Bird song variations along an urban gradient: The case of the European blackbird (*Turdus merula*). *Landscape and Urban Planning* 99: 51-57.
- Mendes S, VJ Colino-Rabanal & SJ Peris (2017) Adaptación acústica del canto de *Turdus leucomelas* (Passeriformes: Turdidae) a diferentes niveles de ruido antrópico, en el área metropolitana de Belém, Pará, Brasil. *Revista de Biología Tropical* 65: 633-642.
- Miller AH & VD Miller (1968) The behavioral ecology and breeding biology of the Andean sparrow, *Zonotrichia capensis*. *Caldasia* 10: 83-154.
- Montesinos-Tubée DB, H Núñez, BJ Toni, EM Álvarez, A Borgoño, J Zegarra, G Gutiérrez, M Maldonado, MP Rodríguez, GC Riveros & D Guillén (2019) Diversidad florística, comunidades vegetales y propuestas de conservación del monte ribereño en el río Chili (Arequipa, Perú). *Arnaldoa* 26: 97-130.
- Moseley DL, GE Derryberry, JN Phillips, JE Danner, RM Danner, DA Luther & EP Derryberry (2018) Acoustic adaptation to city noise through vocal learning by a songbird. *Proceedings of the Royal Society B* 285: 20181356.
- Nemeth E & H Brumm (2010) Birds and anthropogenic noise: are urban songs adaptive? *The American Naturalist* 176: 465-475.
- Nottebohm F (1969) The song of the chingolo, *Zonotrichia capensis*, in Argentina: Description and evaluation of a system of dialects. *The Condor* 71: 299-315.
- Patricelli GL & JL Blickley (2006) Avian communication in urban noise: causes and consequences of vocal adjustment. *The Auk* 123: 639-649.
- Phillips JN & M Katti (2020) Anthropogenic noise affects winter song structure of a long-distance migrant, Gambel's white-crowned sparrow. *Journal of Urban Ecology* 6: 1-9.
- Proppe DS (2010) The effect of anthropogenic noise on songbird vocal communication. Ph.D. diss., University of Alberta, Edmonton, Canada.
- Proppe DS, CB Sturdy & CCS Clair (2011) Flexibility in animal signals facilitates adaptation to rapidly changing environments. *PLoS One* 6: e25413.
- Proulx R, J Waldinger & N Koper (2019) Anthropogenic landscape changes and their impacts on terrestrial and freshwater soundscapes. *Current Landscape Ecology Reports* 4: 41-50.
- R Core Team (2019) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available at <https://www.R-project.org/>.
- Ríos-Chelén AA, AN McDonald, A Berger, AC Perry, AH Krakauer & GL Patricelli (2017) Do birds vocalize at higher pitch in noise, or is it a matter of measurement? *Behavioral Ecology and Sociobiology* 71: 1-12.
- Sayers C, C Moreland, H Morgan & JE Arévalo (2019) Efecto de corto plazo del ruido por tráfico sobre coros de aves en un bosque nuboso neotropical. *Zeledonia* 23: 8-28.
- Schäfer JE, MM Janocha, S Klaus & DT Tietze (2017) How weather instead of urbanity measures affects song trait variability in three European passerine bird species. *Ecology and Evolution* 7: 4868-4880.
- Schulenberg T, D Stotz, D Lane, J O'Neill & T Parker (2010) Aves de Perú. Centro de Ornitología y Biodiversidad, Lima, Perú.
- Searcy WA & M Andersson (1986) Sexual selection and the evolution of song. *Annual Review of Ecology and Systematics* 17: 507-533.
- Seddon N & JA Tobias (2007) Song divergence at the edge of Amazonia: an empirical test of the peripatric speciation model. *Biological Journal of the Linnean Society* 90: 173-188.
- Slabbekoorn H & A den Boer-Visser (2006) Cities change the songs of birds. *Current Biology* 16: 2326-2331.
- Slabbekoorn H & M Peet (2003) Birds sing at a higher pitch in urban noise. *Nature* 424: 267.
- Slabbekoorn H & TB Smith (2002) Bird song, ecology and speciation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 357: 493-503.
- Tubaro PL & ET Segura (1994) Dialect differences in the song of *Zonotrichia capensis* in the southern Pampas: a test of the acoustic adaptation hypothesis. *The Condor* 96: 1084-1088.
- Zwart MC, JC Dunn, PJ McGowan & MJ Whittingham (2016) Wind farm noise suppresses territorial defense behavior in a songbird. *Behavioral Ecology* 27: 101-108.