



El Colegio de la Frontera Sur

Comportamiento vocal de tres especies de gorriones (*Passer domesticus*, *Zonotrichia capensis* y *Haemorhous mexicanus*)
en condiciones de simpatria en zonas urbanas de San
Cristóbal de Las Casas, Chiapas

TESIS

presentada como requisito parcial para optar por el grado de Maestra en Ciencias en Recursos
Naturales y Desarrollo Rural con orientación en Ecología y Sistemática

Por

Khareni Díaz Lezama

2022

Dedicatoria

Dedico este trabajo de investigación a mis padres Ana Bertha Lezama y José Octavio Díaz, quienes han sido mi principal motivación y fortaleza para crecer en todo sentido, sobre todo académicamente. Reconozco el enorme esfuerzo que han puesto en mi crianza y educación, el cual espero de todo corazón algún día poder recompensarles. También agradezco a mis hermanos Octavio y Nundehui, ellos han sido un gran ejemplo de dedicación y pasión por sus carreras, y siempre me han motivado a seguir mis sueños.

Quiero dedicar también este estudio a Edgar Hernández Cabrera, quien ha estado conmigo durante todo el proceso, en los momentos buenos y en los difíciles. Su paciencia, amor y comprensión, me han dado el soporte y apoyo emocional justo en los momentos indicados. Gracias por creer en mí, recordarme mis capacidades y fortalezas.

También, me gustaría dedicar este trabajo a todas las aves del mundo, porque son un grupo de animales increíbles que me siguen asombrando con sus cualidades. Les dedico este trabajo, porque ellas son la inspiración de mis ideas y curiosidad, y me motivan a seguir dedicando mi vida a investigar su comunicación acústica. Cuando escucho sus cantos, es como si escuchara individuos con una voz única, una voz y un estilo particular de hablar. Pienso que la comunicación acústica de las aves es un mundo complejo y del cual aún nos falta mucho por explorar, aprender y comprender. El conocer su comunicación nos acercará también a entender el origen de nuestra propia comunicación como especie humana, y sobre todo el origen de nuestro lenguaje.

Agradecimientos

Mi agradecimiento infinito a mi directora de tesis, la doctora Paula Lidia Enriquez Rocha, una investigadora trascendente y apasionada por las aves. Gracias por tantas enseñanzas académicas y para mi vida personal. Agradezco mucho el apoyo y paciencia con que guió mi formación en este postgrado, y como me impulsó para hacer realidad mis ideas y propuestas de investigación. Puedo decir que de ella aprendí a ser más ordenada con mis ideas (algo bastante complicado para mi mente hiperactiva), me transmitió un amor profundo por la conservación de la biodiversidad y me demostró un lado más humano de la ciencia. Sin duda, agradezco cada momento que compartió conmigo para realizar este proyecto y fue un honor ser su estudiante.

Una persona muy especial que quiero nombrar en mis agradecimientos es al doctor Alejandro Ríos Chelén, que desde la licenciatura fue mi inspiración para trabajar con bioacústica de aves. Fue mi primer contacto con el increíble mundo de la bioacústica, y no pude tener mejor guía. Me enseñó que la ciencia no tiene por qué ser tan rígida y abrumadora, que por el contrario es divertida, nos genera curiosidad y que la ciencia está para sacar nuestro lado más humano. Agradezco que más allá de ser mi maestro, ha sido un gran amigo, y de todo corazón, espero seguir colaborando en futuros proyectos.

Asímismo, quiero agradecer al maestro Jorge Castellanos Albores, por ser una parte muy importante en el análisis y diseño de mi investigación. Le agradezco por enseñarme la belleza de la estadística y que debo ser más crítica con mis métodos, fue un placer trabajar a su lado.

También, quiero agradecer a mi amigo Héctor Luna, quién me apoyó en el trabajo de campo. Le agradezco por cuestionarme, por aportarme ideas y mostrar tanto interés en el proyecto. Puedo decir que trabajar con aves es increíble, pero poder compartirlo con amigos como Héctor, lo hace aún más divertido y enriquecedor.

Mi gran agradecimiento también al Dr. José Raúl Vázquez Pérez, quién me apoyó en repetidas ocasiones en la parte estadística del proyecto. Quiero agradecer por sus enseñanzas y asesorías, su paciencia y siempre disponibilidad para resolver mis dudas, fue una persona muy importante en esta investigación.

Agradecimientos especiales a El Colegio de la Frontera Sur por contribuir en mi formación académica, profesional y también personal. Gracias por los fondos del Programa de Apoyo de Tesis de Maestría (PATM) 2020 del Posgrado de ECOSUR, que sirvieron para financiar mi proyecto de investigación.

Así, también extendiendo mi agradecimiento al personal administrativo, de coordinación del posgrado y al personal de la biblioteca de ECOSUR por siempre estar para apoyarme y resolver mis dudas.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico que proporcionó para realización de mis estudios de posgrado.

Índice

Resumen	1
---------------	---

Capítulo 1

Introducción	4
--------------------	---

Capítulo 2. Urban noise, percentage of vegetation and abundance of individuals are related to peak frequency and song entropy of three urban sympatric sparrows: House finch, Rufous-collared sparrow, and House sparrow

Abstract	21
----------------	----

Resumen	22
---------------	----

Lay Summary	23
-------------------	----

Introduction	24
--------------------	----

Methods	29
---------------	----

Results	32
---------------	----

Discussion	34
------------------	----

Acknowledgments	39
-----------------------	----

Literature cited	40
------------------------	----

Tables and Figures	48
--------------------------	----

Capítulo 3. Más allá del ruido antropogénico: ¿el porcentaje de vegetación y la abundancia de individuos se relacionan con las características temporales del canto de tres especies de gorriones simpátricos (gorrión mexicano, gorrión chingolo y gorrión domestico)?

Resumen	55
---------------	----

Introducción 56

Métodos 59

Resultados 63

Discusión 66

Conclusiones 71

Literatura citada73

Tablas y figuras77

Capítulo 4

Conclusiones85

Literatura citada88

Resumen

En sitios urbanos, el ruido, la vegetación y las construcciones afectan la estructura del canto de las aves en sitios urbanos. También, la abundancia de las especies y las interacciones intra e interespecíficas se relacionan con las características del canto de algunas aves. Evitar el enmascaramiento y solapamiento del canto es primordial para las aves, pues estas dependen principalmente del medio acústico para comunicarse. En este estudio analizamos si las características del canto de tres especies de gorriones simpátricos se asocian con el nivel de ruido, el porcentaje cobertura de la vegetación y construcción, y la abundancia de individuos en 14 sitios urbanos dentro de la ciudad de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas. Grabamos cantos de los individuos del gorrión mexicano (*Haemorhous mexicanus*), el chingolo (*Zonotrichia capensis*) y el doméstico (*Passer domesticus*), y analizamos sus parámetros temporales y de frecuencia. Encontramos que la frecuencia pico del gorrión mexicano se relacionó a la abundancia conespecífica, y para el gorrión doméstico la frecuencia pico se relacionó a la abundancia heteroespecífica y al porcentaje de vegetación. La entropía se relacionó al ruido máximo para los tres gorriones. La entropía del gorrión doméstico se relacionó al porcentaje de vegetación. Y la entropía del gorrión mexicano se relacionó a la abundancia del gorrión chingolo. La duración del canto del gorrión chingolo y doméstico se relacionaron al porcentaje de vegetación, y al nivel de ruido en el gorrión doméstico. El número de sílabas se relacionó con el ruido urbano para el gorrión mexicano. Las tasas de sílabas del gorrión mexicano y doméstico se relacionaron al porcentaje de vegetación, y la del gorrión mexicano se relacionó con el ruido. La tasa de sílabas del gorrión mexicano se relacionó a la abundancia conespecífica, y para el gorrión mexicano y doméstico su tasa se relacionó a la abundancia heteroespecífica. La diversidad silábica se relacionó al nivel de ruido en el gorrión mexicano y al porcentaje de vegetación en el gorrión chingolo. La diversidad silábica del gorrión chingolo se relacionó a la abundancia conespecífica y heteroespecífica. Concluimos que cada especie de gorrión posee características particulares del canto cuya variación está relacionada con características del ambiente acústico urbano y con sus interacciones conespecíficas y heteroespecíficas.

Palabras clave: porcentaje de vegetación, ruido urbano, entropía, abundancia, parámetros temporales, cantos de aves, porcentaje de vegetación.

Capítulo 1

Introducción

La comunicación es una actividad imprescindible para los animales, que les permite mantener el flujo de información entre dos o más individuos (Simmons 2003). Existen muchos tipos de comunicación tales como la visual, química y la acústica, siendo esta última particularmente importante para las aves (Catchpole y Slater 2008). Para que la comunicación ocurra son necesarios cuatro elementos principales: un emisor, un receptor, un mensaje y el medio a través del que se transmite el mensaje (Catchpole y Slater 2008). Cuando un mensaje es capaz de modificar la conducta de un individuo entonces la comunicación ha ocurrido (Catchpole y Slater 2008). Las aves vocalizan en ambientes con distintas características acústicas, que presentan diferentes sonidos de acuerdo con su origen. Los sonidos pueden clasificarse en componente abiótico procedente de fuentes carentes de vida, y que se subdivide en dos grupos: las geofonías (sonidos como el viento, la lluvia y olas del mar); y las antropofonías (sonidos de aviones, helicópteros, barcos, automóviles, áreas urbanas e industrias) (Brumm 2004; Brumm y Zollinger 2013; Farina et al. 2013; Farina 2018). Por otro lado, los sonidos bióticos (biofonías), incluyen a los sonidos de los animales y otros organismos que emiten señales acústicas (Brumm 2004; Brumm y Zollinger 2013; Farina 2018).

Las dos funciones principales del canto de las aves macho son cortejo para atraer a la hembra y de agresión para la defensa de territorio (Slabbekoorn y den Boer-Visser 2006; Planqué y Slabbekoorn 2008; Brumm y Zollinger 2013). La mayoría de las aves hembra, son menos activas vocalmente, a pesar de poseer fibras musculares en la siringe muy similares a las de machos, así como un hipogloso con el mismo número de neuronas encargadas de la vocalización (Yamaguchi y Kelley 2003). Sin embargo, se ha encontrado que, en algunas especies las hembras emiten cantos con función de agresión durante la época reproductiva (Yamaguchi y Kelley 2003; Brumm y Zollinger 2013).

¿Qué es un canto? y ¿por qué es importante su transmisión eficiente?

Las aves emiten distintos tipos de vocalizaciones, y para discernir entre ellas se consideran tanto las características morfológicas de la vocalización, como el contexto social y la conducta vocal (Laiolo and Rolando 2003; Forstmeier et al. 2009; Matsunaga and Okanoya 2009; Elie and Theunissen 2018). Por un lado, los llamados son un tipo de vocalización simple, corta y emitidas tanto por machos como hembras, con distintos propósitos (como llamados de contacto con la pareja y polluelos, avisar la presencia de un depredador, llamados de alimentación, y otros) y durante todo el año (Catchpole y Slater 2008). Mientras que, los cantos usualmente son vocalizaciones largas, complejas y bastante melódicas al oído humano, emitidas principalmente por machos en la temporada reproductiva (Catchpole y Slater 2008). La complejidad del canto dependerá de la especie, y puede medirse por el número de diferentes sílabas emitidas por un macho dentro de un canto, y también de acuerdo con el número o estructura de sílabas dentro de un canto (Nolan y Hill 2004). Estas sílabas son los elementos acústicos fundamentales mínimos que conforman un canto, y sirven para su caracterización. Por lo tanto, los cantos pueden variar en su estructura, desde sonidos extensos con muchas modulaciones de frecuencia hasta simples silbidos de pocas sílabas (Nolan y Hill 2004). Lo más importante de un canto es la información que codifica para el ave o individuos (incluso de otras especies o grupos animales) que los escuchan. Por ejemplo, pueden informar acerca de la identidad individual del ave, su sexo, habilidades parentales, calidad genética e incluso la carga parasitaria (Collins 2004).

Los machos poseen generalmente cantos con una menor variación intraespecífica de características acústicas, y la mayoría de las hembras seleccionan a su pareja a través de las características de estos cantos de cortejo (Yamaguchi y Kelley 2003). Por lo anterior, se consideran los cantos un rasgo de selección sexual importante (Collins 2004; Odom et al. 2021). La variación de los cantos de las aves no solo se da entre especies, también entre individuos de la misma o diferentes poblaciones, incluso a nivel intra-individual. Cuando la variación del canto de una especie es grande entre poblaciones geográficamente distantes se conoce como dialecto (Nottebohm 1969; Bitterbaum y Baptista 1979; Tubaro et al. 1993).

Estudiando el canto de las aves: características de frecuencia y temporales

En estudios de bioacústica se utilizan ciertos parámetros de las vocalizaciones que pueden ser muy informativos sobre la biología de cada especie. Los parámetros (o características) del canto, nos permiten describir de forma sintética la información contenida en el sonido (Caycedo-Rosales et al. 2013). Tradicionalmente, se utilizan parámetros temporales (dominio temporal) y de frecuencia (dominio espectral o de frecuencia) para describir las vocalizaciones. Para las características temporales se utiliza como unidad de medida el hercio (Hz), y las características temporales pueden medirse en segundos (s), o no contener una unidad definida (Caycedo-Rosales et al. 2013).

Las características del canto contienen información que promueve la atracción de pareja y la defensa del territorio. Para algunas especies los parámetros de frecuencia serán de mayor importancia biológica, para otras lo serán los temporales. Existen características del canto de las aves macho que son especialmente atractivas a las hembras, por ejemplo, las hembras comúnmente prefieren cantos más largos, así como repertorios más largos y cantos más complejos (Catchpole 1986; Eens et al. 1991; Vallet and Kreutzer 1995; Gentner and Hulse 2000; Marler y Slabbekoorn 2004; Morisaka et al. 2008; Dunning et al. 2020). Por otro lado, las características de frecuencia o espectrales de los cantos de los machos son importantes en la defensa de territorio. En las aves, así como otros taxas, los parámetros espectrales pueden indicar de forma confiable el tamaño corporal de los individuos. Generalmente la relación entre el tamaño corporal y la frecuencia de los cantos es negativa, es decir, aves de mayor tamaño tendrán cantos con frecuencias más bajas, y aves de menor tamaño tendrán frecuencias más altas (Seddon 2005; Price et al. 2006). Los parámetros de frecuencia tienen una función reproductiva, y por lo general las hembras prefieren machos con cantos de frecuencias bajas, ya que son indicativos de individuos de mayor tamaño o calidad (Linhart et al. 2012). No obstante, existen casos donde a las hembras les resultan más atractivos los machos con cantos de frecuencias altas (Cardoso 2012). Además, las características de frecuencia de los cantos pueden ser útiles en la defensa de territorio. Por ejemplo, en algunas especies de aves la frecuencia baja del canto de

los machos señala mayores habilidades de pelea y son percibidos como señales más amenazantes (Linhart et al. 2012; Dickerson et al. 2021).

Los cantos de las aves son dinámicos: El ruido como un factor que influye en la estructura del canto

Muchos factores modifican la conducta vocal de las aves, y un factor que mayor interés ha causado recientemente es el efecto del ruido urbano en la comunicación acústica. Varias especies de aves han demostrado capacidad para ajustar las características de sus cantos como una estrategia para evitar el enmascaramiento por ruido (Brumm 2004; Fernández-Juricic et al. 2005; Bermúdez-Cuamatzin et al. 2010; Dorado-Correa et al. 2016). Es conviene distinguir ruido de sonido, los cuales comunmente causan confusión. Los sonidos consisten en ondas superpuestas con diferentes valores de frecuencia (Domingo 2014), y dependiendo de la especie, será la gama de frecuencias que los individuos logren emitir y percibir mejor. Por otro lado, un ruido se puede definir como cualquier sonido que aumenta la probabilidad de errores en el rendimiento (percepción e identificación) del receptor, y que interfiere en el proceso de comunicación (Gil y Brumm 2014). Los ruidos producen como consecuencia el enmascaramiento de los cantos, el cual ocurre cuando un sonido de tono puro afecta la percepción de otro sonido puro, haciendo inaudible al sonido menos intenso (Domingo 2014). Además, el enmascaramiento puede acentuarse si ambas fuentes de sonido que compiten tienen frecuencias iguales o similares.

Las consecuencias del enmascaramiento e interferencia acústica se pueden reflejar en la adecuación de las especies, al afectar incluso el éxito reproductivo de estas: y entonces su adecuación. En algunas aves se ha encontrado una reducción del tamaño de nidada, así como del número de polluelos volantones relacionado al exceso de ruido (Halfwerk, Holleman, et al. 2011; Dorado-Correa et al. 2016). Además, los ambientes ruidosos pueden relacionarse con la disminución de la riqueza y abundancia de especies en poblaciones de aves (Mendes et al. 2017). Algunas especies son muy sensibles, y no son capaces de adecuarse a las condiciones de ruido, por lo que terminan

abandonando las zonas urbanas y desplazándose a sitios menos ruidosos (Mendes et al. 2017). Por otra parte, el exceso de ruido modifica la detectabilidad de los cantos de machos rivales, afectando la capacidad de defender el territorio. Los rivales podrían entrar al territorio de otro macho sin que éste se percate de su presencia (Mockford y Marshall 2009). Incluso, algún macho invasor puede llegar a participar en cópulas extra-pareja, y provocar la pérdida de paternidad del macho dueño del territorio (Mockford y Marshall 2009).

Es importante para las aves evitar los efectos desfavorables del exceso de ruido. La teoría del efecto Lombard propone que las aves (así como otros taxones de animales) han desarrollado una solución compartida para enfrentar los problemas en la comunicación acústica. Esta solución consiste en modificar la amplitud vocal dependiendo de la cantidad de ruido presente en el ambiente (Bermúdez-Cuamatzin et al. 2010; Brumm y Zollinger 2013). Una ineficiente transmisión de los cantos, aumenta la probabilidad de que las aves tengan que enfrentarse físicamente a sus enemigos, y que la atracción de pareja resulte más complicada (Slabbekoorn y den Boer-Visser 2006).

Una manera en que las aves pueden mejorar la relación señal-ruido de una vocalización, a través del ajuste de de las frecuencias (kHz). Las aves ajustan los niveles de frecuencia de sus cantos para que éstos sean lo más distinguibles posible de las bandas de frecuencias contenidas en otras fuentes acústicas del ambiente (Brumm 2004; Laiolo 2011; Brumm y Zollinger 2013; Mendes et al. 2017). Algunas aves, aumentan la frecuencia mínima de sus cantos para lidiar con el exceso de ruido en ambientes urbanos (Rheindt 2003; Slabbekoorn 2004; Mockford y Marshall 2009; Wouter Halfwerk et al. 2011; Laiolo 2011). Debido a que el ruido de las ciudades es en su mayoría de frecuencias bajas, las aves cantan con frecuencias más altas para así evitar el solapamiento vocal.

Las aves pueden modificar otras características del canto, así como, los horarios o tiempos de emisión de los cantos en ambientes urbanos (Fernández-Juricic et al. 2005; Ríos-Chelén et al. 2012; Farina et al. 2013). Por ejemplo, adecuar la duración de

las vocalizaciones puede ser una estrategia efectiva para mejorar la detectabilidad y transmisión de sus vocalizaciones (Brumm y Slabbekoorn 2005). Algunas especies de aves emiten cantos más cortos, y/o con menor cantidad de sílabas, en las ciudades ruidosas en comparación con sus conoespecíficos en sitios de bosque (Slabbekoorn y den Boer-Visser 2006). Los cantos más cortos y con menos sílabas podrían servir para aprovechar los intervalos de silencio entre el ruido, y así lograr transmitir el mensaje en medio del ruido urbano. También, aumentar la redundancia de las señales es una estrategia que permite a las aves incrementar las probabilidades de que su señal se transmita eficientemente. La redundancia consiste en que un ave cante repetidamente el mismo tipo de canto, o la misma sílaba de un canto, antes de cambiar a otro tipo de canto o sílaba (Brumm y Slater 2006).

Ante un exceso de ruido, las aves pueden aumentar la tonalidad de sus vocalizaciones, lo que incrementa el radio entre señal y ruido. Las señales acústicas con mayor tonalidad (i.e. tonos puros) poseen un ancho de banda más corto, lo que posiblemente las hace más fáciles de ser detectadas en ambientes ruidosos, que las señales menos tonales (Lohr et al. 2003; Hanna et al. 2011). La tonalidad se puede medir con un parámetro denominado entropía, que representa la cantidad de desorden o aleatoriedad de un sonido, y aquellos sonidos de tono puro tendrán una entropía cercana a cero (Hanna et al. 2011; Ríos-Chelén et al. 2018). Se ha demostrado que las aves que canta con valores de entropía bajos, pueden mejorar la detectabilidad de sus señales acústicas en ambientes ruidosos (Ríos-Chelén et al. 2018). Por ejemplo, el tordo sargento (*Agelaius phoeniceus*) emite cantos más tonales cuando se le expone a fuentes de ruido de frecuencias bajas (Hanna et al. 2011).

La estructura del hábitat afecta las características del canto: vegetación y construcción

La variación de las características de las vocalizaciones de las aves y otros animales se relaciona con la variación de las características de sus hábitats y filogenia (Handford

1981; Shy 1983; Price et al. 1988; Nicholls y Goldizen 2006; Bueno-Enciso et al. 2016). La Hipótesis de Adaptación Acústica (AAH) propone que las características del canto de las aves se adaptan a las características de transmisión del sonido del ambiente (Brumm y Naguib 2009). La vegetación es un factor del ambiente que puede absorber la energía contenida en los sonidos, produciendo una disminución de la amplitud, y por tanto, la atenuación del canto (Slabbekoorn y Smith 2002; Slabbekoorn et al. 2007). Además, los cantos pueden sufrir otro proceso llamado degradación, el cual consiste en cualquier cambio en las características acústicas, espectrales y temporales, que se ocasiona entre el emisor y el receptor (Slabbekoorn y Smith 2002). La degradación de las señales acústicas es un proceso complejo e involucra distintos factores: la turbulencia del viento, la dispersión de las señales por la vegetación, la dispersión en la atmósfera y la reflexión del sonido sobre superficies (Slabbekoorn et al. 2007). Por ejemplo, en especies de rana como Hilia verde (*Hylia prasina*) modifican la duración de su canto debido a las características de la vegetación (Slabbekoorn y Smith 2002).

La vegetación también puede motivar la variación en otras características como la tasa del canto; i.e., la cantidad de cantos que emite un ave en un tiempo determinado (Handford 1981; Bueno-Enciso et al. 2016), el tipo de canto y las sílabas que el ave canta de su repertorio (Handford 1981). Generalmente, los cantos se degradan más en hábitats de vegetación densa, y son las frecuencias altas las más afectadas por esta degradación. También, se ha observado que las aves de hábitats abiertos tienen cantos que se caracterizan por contener frecuencias altas, cortos intervalos entre notas, un amplio rango de frecuencias, notas más complejas y presencia de trinos (Morton 1975; Handford 1981; Nicholls y Goldizen 2006). En cambio, los cantos de aves en bosques se caracterizan por ser de notas largas y simples, de frecuencias bajas y con intervalos de frecuencias estrechos (Shy 1983; Anderson y Conner 1985; Nicholls y Goldizen 2006; Boncoraglio y Saino 2007). Los parámetros temporales también varían de acuerdo a la vegetación, las vocalizaciones más largas y lentas (i.e. es decir, con menor tasa de sílabas), se transmiten mejor en sitios con abundante vegetación (Slabbekoorn and den Boer-Visser 2006). También, algunas aves que viven en sitios con abundante vegetación cantan con mayor diversidad silábica que sus congéneres viviendo en sitios

más abiertos (Hill et al. 2013), aunque existen casos donde ocurre justo lo contrario (Hill et al. 2013; Hill et al. 2017).

Al igual que la vegetación, las estructuras de concreto producen la atenuación y degradación del canto de las aves (Naguib 2003; Slabbekoorn et al. 2007; Job et al. 2016). Los ambientes urbanos se caracterizan por presentar una gran cantidad de estructuras verticales de concreto (como casas y edificios), que funcionan como reflectores del sonido y producen reverberaciones. Tales reverberaciones son ecos que se generan a partir de que una señal acústica choca con una superficie (como contra árboles, hojas y construcciones) y genera reflejos o réplicas del sonido original (Slabbekoorn et al. 2007). Las reverberaciones alteran las características temporales del canto debido a que rellenan con ecos los intervalos de silencio entre cantos y/o sílabas. Las cantos más afectados por las reverberaciones son los de frecuencias bajas, más largos y con mayor tasa de emisión (Slabbekoorn et al. 2007). Entonces, algunas aves emiten cantos más cortos para disminuir el efecto y la acumulación de reverberaciones (Naguib 2003). Otras especies disminuyen la frecuencia pico, aumentan la frecuencia mínima y la duración del silencio entre cantos sucesivos al aumentar la estructura urbana (Job et al. 2016).

La abundancia de individuos influye en la estructura del canto de las aves

Las vocalizaciones emitidas por otras especies son una fuente acústica a la que deben de enfrentarse las aves, y entre mayor sea el número de individuos cantando en un mismo ambiente, habrá un incremento del sonido que debe ser evitado. La Hipótesis de Nicho Acústico establece que el ensamble avifaunístico tendrá un efecto sobre las características del canto de las aves (Azar y Bell 2016). El solapamiento del canto se produce cuando un ave comienza a cantar antes de que su contraparte haya terminado de cantar (Todt y Naguib 2000). La intensidad de dicho solapamiento depende de las similitudes del canto con heteroespecíficos y la distancia entre las aves cantoras (Todt y Naguib 2000). Algunas aves pueden evitar activamente el solapamiento acústico, de intraespecíficos e interespecíficos, para mejorar la eficiencia en la

transmisión de sus mensajes (Popp et al. 1985; Knapton 1987). Además, evitar el solapamiento acústico, puede ayudar a optimizar el tiempo y energía en las vocalizaciones, ya que de otra forma su mensaje podría perderse (Popp et al. 1985).

Algunas aves evitan el solapamiento vocal cantando en horarios y a frecuencias distintas a las utilizadas por el resto de las aves de su ensamble, minimizando la competencia por espacio acústico con las diferentes fuentes de ruido (Brumm y Zollinger 2013). El ruiseñor (*Luscinia megarhynchos*) evita el solapamiento acústico insertando sus cantos en los intervalos de silencio entre los cantos de sus heteroespecíficos (Brumm 2006). Otras especies evitan cantar después de sí mismas (evitan el período refractorio), para reducir el solapamiento de sus cantos con el de vecinos interespecíficos (Popp et al. 1985). Entonces, la modificación o desplazamiento de caracteres acústicos, así como el cambio de las conductas vocales, promueven una repartición del espacio acústico y facilita el reconocimiento del canto entre las especies simpátricas (Morinay et al. 2013).

La abundancia de individuos simpátricos puede afectar otras características del canto. Por ejemplo, el ruiseñor (*Luscinia megarhynchos*) emite cantos más cortos o más largos al ser expuesto a playbacks de cantos de diferentes aves heteroespecíficas, mientras que en alopatría no altera la duración de sus cantos (Brumm 2006). También, se ha propuesto que las aves presentan mayor diversidad de sílabas en sus cantos como consecuencia de altas abundancias de las aves vecinas conoespecíficas (Hamao y Ueda 2000; Hill et al. 2013; Hill et al. 2017).

Tres especies de gorriones cantando en simpatria en ambientes urbanos: ¿Qué variables se relacionarán con las características de los cantos?

En la ciudad de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, ocurren los gorriones mexicano (*Haemorhous mexicanus*), chingolo (*Zonotrichia capensis*) y doméstico (*Passer domesticus*), y comparten el nicho acústico. El gorrión mexicano se considera nativo del oeste de Estados Unidos, y se ha extendido a la parte oriental de América del Norte, habita principalmente zonas urbanas y suburbanas (Fernández-Juricic et al. 2005). El gorrión chingolo tiene una distribución del sur de México hasta Argentina y Chile

(Chapman 1940; Cadena-Ortiz 2018). El gorrión doméstico se considera originario de Europa, pero fue introducido en Brooklyn, Nueva York, Estados Unidos en 1850 (Henry y Lucas 2009; Moulton et al. 2010; Verboom y Heij 2018). En la primera década de 1900, el gorrión doméstico se expandió rápidamente hasta cubrir todo Estados Unidos, y parte de Canadá y México, principalmente en zonas urbanas y suburbanas (Liebl et al. 2015; Menacho et al. 2018)

Los cantos del gorrión mexicano (*Haemorhous mexicanus*)

El gorrión mexicano es una especie de ave paseriforme oscina que habita áreas abiertas y semiabiertas en ambientes urbanos y semi-urbanos (Fernández-Juricic et al. 2005). Muestra preferencia por parques grandes con una buena cobertura forestal, especialmente con coníferas, que son buenos sitios para la formación de sus nidos. Poseen un tipo de canto complejo, rápido y con mucha variación intra e inter-individual (Mundinger 1975). Sus cantos se componen de una sección introductoria; fluctúa rápidamente entre sílabas de alta y baja frecuencia, y termina con una o varias sílabas de zumbido. Además, sus cantos tienen mínimo cuatro sílabas o elementos, con una separación de no más de un segundo entre sílabas (Nolan y Hill 2004).

Los gorriones mexicanos no defienden activamente sus territorios (Nolan y Hill 2004; Fernández-Juricic et al. 2005; Mennill et al. 2006), entonces los cantos, al parecer, no se utilizan para este propósito. Sus cantos son principalmente para la atracción de pareja (Mennill et al. 2006; Ciaburi y Williams 2019), y se clasifican como: cantos con sílabas de zumbido (comúnmente son sílabas finales del canto), y cantos sin zumbido (Mennill et al. 2006). El promedio de sílabas en el repertorio de un individuo es de 25.2 (Pytte 1997), y tiene en promedio 13 sílabas por canto (Bitterbaum y Baptista 1979). Poseen aproximadamente tres tipos de cantos individuales, y la frecuencia con que vocalizan oscila entre 1.4 y 8.2 kHz (Bitterbaum y Baptista 1979).

Los gorriones mexicanos de una misma población comparten secciones o conjuntos de sílabas (principalmente de la porción media) del canto (Bitterbaum y Baptista 1979; Pytte 1997). Es decir, los gorriones mexicanos de una población

determinada cantan de forma más similar al resto de miembros de su población, en comparación con individuos de otras poblaciones. Sin embargo, aún no se ha encontrado una relación entre las características del canto del gorrión mexicano y la presencia/ausencia de conoespecíficos (Fernández-Juricic et al. 2005).

Las características del canto del gorrión mexicano pueden servir a las hembras como un rasgo de selección sexual, e influir en su éxito reproductivo. Las hembras del gorrión mexicano al parecer prefieren a machos con cantos más largos y con una mayor tasa de canto, pero no muestran una preferencia por el tamaño de repertorio de sílabas (Nolan y Hill 2004). Además, los machos de esta especie con mayor número de sílabas por canto inician antes su reproducción, y las hembras emparejadas a estos machos tienen puestas más grandes (Mennill et al. 2006).

El ruido urbano es un factor que puede afectar las características del canto del gorrión mexicano. Esta especie aumenta la frecuencia mínima de sus cantos al incrementar el nivel de ruido en zonas urbanas (Fernández-Juricic et al. 2005; Bermúdez-Cuamatzin et al. 2009; Bermúdez-Cuamatzin et al. 2010). Además, se ha demostrado que el gorrión mexicano emite cantos con menos sílabas y más cortos en sitios urbanos ruidosos (Fernández-Juricic et al. 2005).

Las características de la vegetación no parecen tener un efecto significativo en las características del canto del gorrión doméstico (Bitterbaum y Baptista 1979; Fernández-Juricic et al. 2005). Por ejemplo, no se encontraron diferencias en el tono del canto (frecuencia máxima, frecuencia mínima, ni rango de frecuencia) entre gorriones mexicanos viviendo en ambientes abiertos con matorrales y hierbas, versus los cantos de gorriones en sitios con vegetación de tipo arbustiva y arbórea (Bitterbaum y Baptista 1979).

Los cantos y dialectos del gorrión chingolo (*Zonotrichia capensis*)

El gorrión chingolo (*Zonotrichia capensis*) es una especie de ave oscina ampliamente distribuida, y que habita en áreas urbanas y periurbanas, bordes de carreteras, parques y en menores densidades en áreas conservadas (Chapman 1940; Laiolo 2011). Se trata

de una de las especies de ave más polítípicas del mundo, existiendo cerca de veinte subespecies (Lougheed et al. 2013), y esta gran variación morfológica se acompaña de una marcada variación vocal (Lougheed et al. 2013). El gorrión chingolo canta de forma muy activa desde el amanecer hasta el anochecer, sus cantos duran entre 1-2 segundos y con un rango de frecuencias de 2-7 kHz (Nottebohm 1969).

El canto de este gorrión se compone de dos secciones: un silbido o tema (“theme”) y un trino terminal (trill). El tema es una porción del canto que presenta gran variabilidad interindividual entre gorriones chingolo de una misma área (Nottebohm 1969; Nottebohm 1975; Tubaro et al. 1993). Mientras que el trino es una porción terminal del canto que comunmente se comparte entre aves de una misma localidad (Nottebohm 1969; Nottebohm 1975; Tubaro et al. 1993). Debido a que las características del trino del gorrión chingolo son constantes entre individuos de una región, se utiliza como un rasgo diagnóstico de dialectos de esta especie.

La vegetación es un factor que influye en las características del canto del gorrión chingolo. Por ejemplo, los gorriones chingolo que viven en bosques de Argentina tienen cantos con intervalos de trino mayores y menor frecuencia, que los individuos de pastizales y estepas (Nottebohm 1975; Tubaro et al. 1993). Aunque, se ha demostrado que los individuos cantan con frecuencias mayores en pastizales que en sitios de bosque (Tubaro y Segura 1994).

Además, las características del canto del gorrión chingolo se pueden relacionar con el ruido urbano. Los gorriones que viven en suburbios tienen cantos con frecuencias mínimas más altas (tanto en el trino como en el tema) que las aves en zonas rurales. En ocasiones, el gorrión modifica el inicio de su coro del amanecer dependiendo de los niveles de ruido (Dorado-Correa et al. 2016). Cantar más temprano en la mañana, podría incrementar la oportunidad de cantar sin interrupción por el pico de ruido producido por el tráfico.

Características de los cantos del gorrión doméstico (*Passer domesticus*).

El gorrión doméstico es un ave que ha logrado una increíble adaptación en ambientes urbanos con altos niveles de perturbación, aunque estudios recientes han demostrado un declive en las poblaciones de esta especie en algunas regiones del mundo (principalmente en Europa) (Shaw et al. 2008; Murgui y Maclas 2010; Berigan et al. 2020). El gorrión doméstico tiene cinco vocalizaciones principales, con características específicas de velocidad e intensidad, emiten: llamados de alarma, acompañamiento, llamados juveniles y canto de cortejo. Sus llamados consisten en cortos “píos” que sirven para indicar sumisión dentro de la parvada, o intra-pareja como parte del ritual de cortejo/copulación (The Cornell Lab 2019; Mertins 2021). Por otro lado, el canto del gorrión doméstico consiste en una serie de sonidos “chirriantes” o “píos” repetidos (Marques et al. 2011; Verboom y Heij 2018; The Cornell Lab 2019; Mertins 2021). Se describen dos tipos de cantos en esta especie: los primeros los emiten cuando están tranquilos, son constantes chirridos cortos y algo gorjeantes. Su otro tipo de canto es menos trinado, se forma por una a dos combinaciones de barridos ascendentes y descendentes, y presentan armónicos de más de 8 kHz (Verboom y Heiji 2018). Los cantos del gorrión doméstico tienen rangos de frecuencias que oscilan entre 3.2 y 5.4 kHz, y la tasa de canto llega a su máximo durante la puesta de huevos entre finales de marzo y principios de agosto en Norteamérica (Henry y Lucas 2008; Henry y Lucas 2009). La frecuencia dominante de sus cantos es a los 4.6 kHz, tienen una frecuencia máxima aproximada de 6.5 kHz y duran 1.1 s en promedio (Henry y Lucas 2008).

El ruido ambiental influye sobre las características de frecuencia del canto del gorrión doméstico. Se determinó que los gorriones domésticos viviendo en sitios con altos niveles de ruido emiten cantos con mayor frecuencia mínima, que gorriones viviendo en sitios más silenciosos (Sheldon et al. 2020). Además, se comprobó que los gorriones de ambientes ruidosos responden con más fuerza a los cantos procedentes de su propio hábitat, que a los cantos de frecuencias más bajas de otros sitios (Sheldon et al. 2020).

La competencia por recursos entre especies simpátricas: el espacio acústico como un recurso por el cual se compete.

Los ambientes urbanos poseen características desafiantes para distintas especies animales, aunque, algunas especies logran adaptarse a las características acústicas urbanas. El gorrión doméstico es una especie con una gran capacidad de adaptación y éxito en los ambientes urbanos, y representa una fuente de competencia para otras especies de aves (Brumm 2006; Ortega-Alvarez y MacGregor-Fors 2010; Tennessen et al. 2013; Pereira et al. 2017; Riyahi 2017; Menacho et al. 2018). El gorrión doméstico compite con el gorrión chingolo y el gorrión mexicano (Kalinowski 1975; Wootton 1987; Cooper et al. 2007) por recursos como alimento y sitios de anidación (Cadena-Ortiz 2018; Menacho et al. 2018). Incluso, la abundancia del gorrión mexicano se ve afectada por la presencia y abundancia del gorrión doméstico (Ortega-Alvarez y MacGregor-Fors 2010). Por otro lado, el gorrión doméstico sobrelapa su dieta con el chingolo, debido a que ambos se alimentan de semillas y una baja cantidad de insectos (Menacho et al. 2018). Podría estar ocurriendo la competencia entre estas tres especies por otros recursos, tales como el nicho acústico para vocalizar. Y la presión por el espacio disponible para vocalizar, podría motivar la modificación de las características de sus cantos.

En la ciudad de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México encontramos a las tres especies de gorriones (doméstico, chingolo y mexicano), viviendo en simpatria. Son consideradas especies simpátricas debido a que viven en una misma área geográfica o su distribución se superpone (Haavie et al. 2004). En este estudio buscamos determinar si existe una relación entre las características del canto de tres especies de gorriones simpátricos, con los factores de nivel de ruido, los porcentajes de cobertura de la vegetación y construcción, y la abundancia conoespecífica/heteroespecífica, dentro de sitios urbanos de San Cristóbal de Las Casas. Lo anterior, con el propósito de observar que características del ambiente urbano pueden potencialmente afectar el canto de los gorriones. Se analizaron características de frecuencia y temporales de los cantos de los gorriones mexicano, chingolo y doméstico. Posteriormente, se determinaron las relaciones entre las características del canto y los factores ambientales (nivel de ruido y porcentaje de cobertura de la vegetación), y características ecológicas (abundancia conoespecífica/heteroespecífica). El

estudio se dividió en dos artículos: uno enfocado a los parámetros de frecuencia del canto (la frecuencia pico y la entropía), y el otro en los parámetros temporales del canto (duración, número de sílabas, tasa de sílabas y diversidad silábica). Esta división fue útil y necesaria para profundizar en la interpretación de los resultados, de acuerdo con el significado biológico de cada parámetro para cada especie.

A continuación, presentamos las predicciones para cada artículo. Para el análisis de los parámetros de frecuencia pico y entropía del canto (Capítulo 2) nuestras predicciones fueron: 1) La frecuencia pico del canto de los gorriones se relacionará positivamente con el nivel de ruido, lo que podría mejorar la proporción señal/ruido. 2) El porcentaje de cobertura de la vegetación se relacionará negativamente con la frecuencia pico de los tres gorriones, ya que las frecuencias bajas se transmiten mejor en ambientes con mucha vegetación arbustiva y arbórea. 3) La abundancia heteroespecífica y conoespecífica tendrá una relación con la frecuencia pico de los gorriones chingolo y doméstico, debido a que los cantos de otras aves también representan una fuente de ruido que puede solaparse con los cantos; la abundancia de individuos no se relacionará con la frecuencia pico del gorrión mexicano porque es una especie poco territorial. 4) La entropía del canto de los tres gorriones se relacionará negativamente con nivel de ruido urbano y la abundancia de conoespecíficos y heteroespecíficos; basamos esta predicción en que los cantos más tonales (i.e. con menor entropía) pueden distinguirse mejor en ambientes más ruidosos.

Las predicciones para el segundo artículo (Capítulo 3) para los parámetros temporales (duración, número de sílabas, tasa de sílabas y diversidad silábica) del canto fueron: 1) la duración del canto se relacionará negativamente con el nivel de ruido, como una posible consecuencia de ajustarlo a los intervalos de silencio en medio del ruido; esperamos que, la duración se relacione positivamente con el porcentaje de cobertura de la vegetación para las tres especies de gorriones, debido a que los cantos más largos en ambientes abiertos pierden energía más rápido; y la duración se relacionará negativamente con la abundancia de individuos debido al aumento de individuos vocalizando al mismo tiempo. 2) El número de sílabas se relacionará negativamente con el nivel de ruido, lo que podría evitar la acumulación y solapamiento con las

reverberaciones; y se relacionará positivamente con la cobertura de la vegetación y la abundancia de individuos (conespecífica y heteroespecífica). 3) la tasa de sílabas se relacionará negativamente (i.e. cantarán más lento) con el nivel de ruido y con el porcentaje de vegetación; pero se relacionará positivamente con la abundancia de individuos, al cantar más rápido para evitar sobrelaparse con el canto de otros individuos. 4) Esperamos que la diversidad silábica se relacione negativamente con nivel de ruido, ya que esto podría hacer a los individuos más fáciles de percibir y distinguir en medio del ruido; también esperamos que la diversidad silábica se relacione negativamente con la abundancia conespecífica y heteroespecífica, ya que tener cantos más redundantes y predecibles puede ayudar a que se distingan del resto de las aves que cantan en simpatria.

Capítulo 2

Are urban noise and biotic factors associated with the song features of three sympatric urban sparrows?

Autores: Xharení Díaz-Lezama^{1*}, Alejandro Ríos-Chelén³, Jorge Castellanos-Albores², and Paula L. Enríquez-Rocha^{2*}

*Artículo sometido a la revista *Ornithological Applications*

ABSTRACT

Urban environments have challenging characteristics for bird acoustic communication. Excessive anthropogenic noise as well as vegetation structure have been associated with the song frequency characteristics of several bird species. An additional factor such as individuals abundance may play an important role in determining bird song structure. In this study, we analyzed whether different noise levels, vegetation percentage, and abundance of conspecifics and heterospecific influence the song characteristics of three sparrow species House Finch (*Haemorhous mexicanus*), Rufous-collared Sparrow (*Zonotrichia capensis*), and House Sparrow (*Passer domesticus*) living in sympatry in urban sites. We recorded the songs of these species and measured the peak frequency and entropy of their songs at 14 urban sites. We also obtained noise levels, percentage of vegetation and abundance of individuals. The peak frequency of the House Finch and House Sparrow was positively related to abundance of conspecifics and heterospecifics, respectively. The peak frequency of the House Sparrow was negatively related to the percentage of vegetation. Entropy of all three species was related to noise level. In House Finch and House Sparrow, the variation in entropy was also explained by the abundance of heterospecific and the percentage of vegetation. In conclusion, the peak frequency and song entropy of the three sparrow species were differentially related to urban acoustic variables, as

well as to the abundance of these three sympatric sparrow species. Our results suggest that different song features in our studied species have evolved as response to different anthropogenic and biotic factors.

Key words: *urban noise, entropy, bird song, vegetation percentage, abundance, peak frequency, sympatry, sparrow.*

Características del canto de gorriones urbanos simpátricos en Chiapas, México

RESUMEN

Los habitats urbanos presentan características que desafían la comunicación acústica de las aves. El exceso de ruido antropogénico, y la estructura de la vegetación, se han asociado a las características de frecuencia del canto de varias especies de aves. Otro factor como la abundancia de individuos puede desempeñar, también, un papel importante en la determinación de la estructura del canto de las aves. En este estudio, analizamos como los niveles de ruido, el porcentaje de vegetación y la abundancia de conespecíficos y heteroespecíficos, influyen en las características del canto de tres especies de gorriones: *Haemorhous mexicanus*, *Zonotrichia capensis* y *Passer domesticus* que viven en simpatría en zonas urbanas. En 14 sitios urbanos grabamos los cantos de estas especies y medimos la frecuencia pico y la entropía de sus cantos. También, obtuvimos los niveles de ruido, el porcentaje de vegetación y la abundancia de individuos. La frecuencia pico del *H. mexicanus* y del *P. domesticus* estuvieron relacionadas positivamente a la abundancia de conespecíficos y heteroespecíficos respectivamente. La frecuencia pico del *P. domesticus* se relacionó negativamente al porcentaje de vegetación. La entropía de las tres especies estuvo relacionada con el nivel de ruido. En el *H. mexicanus* la

variación de su entropía se explicó por la abundancia de heteroespecíficos. Mientras que en el *P. domesticus* la variación de su entropía se explicó por el porcentaje de vegetación. En conclusión, la frecuencia pico y la entropía del canto de las tres especies de gorriones se relacionaron de distinta forma con las variables del hábitat acústico urbano, así como con la abundancia de estas tres especies de gorriones simpátricos. Nuestros resultados sugieren que las diferentes características del canto de las especies estudiadas han evolucionado como respuesta a diferentes factores antropogénicos y bióticos.

Palabras clave: ruido urbano, entropía, canto de aves, porcentaje de vegetación, abundancia, frecuencia pico, simpatría, gorrión.

LAY SUMMARY

- We studied the relationship between song characteristics of three species of sympatric sparrows (House Finch, Rufous-collared Sparrow, and House Sparrow) in urban sites with noise level, percentage of vegetation, and abundance of individuals.
- We recorded the song of individuals of the three sparrow species and measured peak frequency and entropy for each song.
- The peak frequency of House Finch and House Sparrow was positively related to conspecific and heterospecific abundance, respectively. And the peak frequency of House Finch was negatively related to the percentage of vegetation.
- The song entropy of three sparrows was related to noise level. In addition, the entropy of the House Finch was negatively related to heterospecific abundance, and that of House Sparrow negatively related to percentage of vegetation.

- Our results suggest that both urban and biotic factors play a role in the evolution of song characteristics in the tree studied sparrows.

INTRODUCTION

Urban environments represent challenging environments for those species that live in or close to these areas. Some birds species have been able to successfully establish themselves in urban conditions, but they required adaptations for mating and breeding in specific sites, such as houses and buildings, diversifying behavior and even, modifying their songs and vocal behavior (Slabbekoorn and den Boer-Visser 2006, Slabbekoorn et al. 2007, Bermúdez-Cuamatzin et al. 2009, Ey and Fisher 2009, Nemeth and Brumm 2009, Winandy et al. 2021). Cities generally feature many structures and buildings, a limited amount of vegetation, excessive artificial light, human sources of food and, of course, anthropogenic noise (Brumm 2004, Fernández-Juricic et al. 2005, Hu and Cardoso 2009, Dorado-Correa 2016). Noise pollution represents a problem for many species that communicate acoustically as it can hinder proper acoustic communication (reviewed in Ríos-Chelén 2009, Brumm and Slabbekoorn 2005, Patricellu and Blickley 2006, Gil and Brumm 2014).

Acoustic communication is essential for bird mating and reproduction since songs are used for mate attraction and territory defense (Slabbekoorn and den Boer-Visser 2006, Catchpole and Slater 2008). Then, if birds fail to transmit their songs effectively, due to a high level of noise, individuals will probably have to use alternative strategies to defend their territory, and then attracting a mate will be a more complicated task (Slabbekoorn and den Boer-Visser 2006). Noise limits the available acoustic space and interferes with the transmission of acoustic signals from birds. The energy in anthropogenic noise is generally concentrated in low frequencies

(below 3 kHz), thus, vocal signals with low frequencies can be easily masked than high frequency ones (Hu and Cardoso 2009). Faced with anthropogenic noise, several species increase the signals to noise ratio (Slabbekoorn and den Boer-Visser 2006, Slabbekoorn et al. 2007, Nemeth and Brumm 2009, Mendes et al. 2011a). One strategy birds use to achieve a higher signal to noise-ratio is to increase the frequency (pitch) of their vocalizations, which can improve to a certain extent signal transmission (e.g., Nemeth and Brumm 2010, Laiolo 2011, Slabbekoorn et al. 2012). Thus, in noisy urban habitats, birds sing at higher frequencies to presumably, avoid low-frequency ambient noise. For example, male great tits (*Parus major*) sing at higher minimum frequencies in response to increased levels of traffic noise (Slabbekoorn and den Boer-Visser 2006). Also, some passerine species in urban areas emit songs with higher dominant frequencies than their rural congeners (Nemeth and Brumm 2009, Ripmeester et al. 2010, Mendes et al. 2011a).

Increasing tonality of signals represents an alternative strategy to increase the signal-to-noise ratio. Pure tone signals have a narrow bandwidth that transmits better through noisy habitats, than signals with higher bandwidth (Lohr et al. 2003, Hanna et al. 2011). Entropy represents the amount of disorder or randomness of a sound, so that pure pitch sounds will have an entropy close to zero (Hanna et al. 2011, Ríos-Chelén et al. 2018). Some species may increase the tonality of their songs when exposed to low-frequency noise. For example, the Red-winged blackbird (*Agelaius phoeniceus*) produces in the final part of the song (the trill) more tonal, when exposed to low-frequency noise sources (Hanna et al. 2011). Many species do not have the ability to adapt their songs and vocal behavior to noise conditions, which could reduce the richness and abundance of these species in urban conditions (Slabbekoorn and Ripmeester 2008, Francis et al. 2011).

Vegetation structure (Azar and Bell 2016) and building materials in urban areas can also be influence birds vocalizations (Slabbekoorn et al. 2007, Job et al. 2016). The Acoustic Adaptation Hypothesis (AAH), establish that due to the acoustic properties of the environment which influence sound propagation, several species of birds, anurans, and mammals, adjust their vocal signals to decrease their degradation in the environment (Ey and Fisher 2009). AHH includes, also, the physical structure of the habitat, such as vegetation cover and soil texture, and which are factors that produce sound attenuation (Konishi 1970, Morton 1975). Dense vegetation results in a higher degree of sound attenuation, where sounds with longer wavelengths (i.e., low frequencies) transmit around vegetation obstacles instead of undergoing reflection, diffraction, or absorption (Konishi 1970, Morton 1975). While short wavelength sounds (high frequencies) have a low capacity to travel around obstacles.

Birds face anthropogenic noise sources or vegetation cover, but also the sounds emitted by other bird species with which they coexist (Doutrelant et al. 2000, Azar and Bell 2016). The greater the similarity in song frequencies of birds sharing the same sites, the greater the risk of frequency overlaps. The Acoustic Niche Hypothesis (NAH) indicates that there is an effect of the bird community in the formation of bird song characteristics (Azar and Bell 2016). Birds in the same community are then expected to decrease similarities in frequency characteristics to avoid song overlap and then competition for acoustic space (Azar and Bell 2016). Some studies have shown some bird species living in habitats with high species richness have songs with less variation, compared to those living in areas with lower species richness (Kroodsma 1985, Naugler and Ratcliffe 1994).

In allopatry, closely related species tend to become more physically and behaviorally similar, and they tend to have similar songs (Haavie et al. 2004, Luther 2009). But in sympatry, their songs differ in time and space (Haavie et al. 2004, Kirschel et al. 2009, Luther 2009, Cardoso and Price 2010). For example, Eurasian blue tits (*Cyanistes caeruleus*) sing songs with trills when in sympatry with high densities of Great tits (Doutrelant et al. 2000, Doutrelant and Lambrechts 2001), but with low densities they do not emit this type of songs.

Urban habitats have different noise levels, variation in vegetation structure and different species abundance. Depending on the species, when vocalizing, they will have a greater or lesser capacity to avoid attenuation or degradation of their songs in anthropized habitats. Three species that have apparently adapted well to urban conditions are the House Finch (*Haemorhous mexicanus*), the Rufous-collared Sparrow (*Zonotrichia capensis*) and the House Sparrow (*Passer domesticus*). These three sparrows have their own song characteristics, and the effect of some environmental variables, like vegetation and noise, on their song structure has been studied .

The House Finch (*H. mexicanus*) has a complex and fast song with intra- and inter-individual variation (Mundinger 1975). This is a not very territorial species (Fernández-Juricic et al. 2005, Mennill et al. 2006) and its songs are mainly used for mate attraction (Mennill et al. 2006).

Individuals of this species vocalize with a minimum frequency of approximately 1.4 kHz and a maximum of 8.2 kHz (Bitterbaum and Baptista 1979). As urban noise increases, this species may adjust the minimum frequency of their songs (Fernández-Juricic et al. 2005, Bermúdez-Cuamatzin et al. 2010). But a previous study found no evidence that the presence or absence of conspecifics affects the temporal-frequency parameters of its song (Fernández-Juricic et al. 2005).

On the other hand, the Rufous-collared Sparrow (*Z. capensis*) is a polytypic species with about twenty subspecies, and such morphological variation is accompanied with a large variation in vocal behavior (Lougheed et al. 2013). The Rufous-collared sparrow actively sings from dawn to dusk, its songs have a frequency range of 2 to 7 kHz lasting 1 to 2 s (Nottebohm 1969).

Sometimes this sparrow sings with lower frequencies in forested habitats when compared to open habitats (Tubaro et al. 1993); although another study showed an opposite pattern (Nottebohm 1975). At the same time, Tubaro and Segura (1994) found a positive association between conspecific density and characteristics of their songs.

The House Sparrow (*P. domesticus*) produce simple songs such as repeated "chirping" sounds and use them to attract mates and defend their territory (Marques et al. 2011, Verboom and Heij 2018, The Cornell Lab 2019, Mertins 2021). House Sparrow song frequency ranges from 3.2 to 5.4 kHz, with a dominant frequency of 4.6 kHz (Henry and Lucas 2008), and an average duration of 1.1 s. These three species of sparrows live in sympatry in the city of San Cristóbal de las Casas, Chiapas, Mexico.

In this study, we evaluated how, if so, noise level, the percentage of vegetation, and conspecific and heterospecific abundance are associated with song characteristics of each of the three sparrow species (House Finch, Rufous-collared Sparrow, and House Sparrow). We analyzed the song peak frequency and song entropy of each species and predicted that 1) The song peak frequency of each sparrow species will be positively related to noise level (especially Rufous-collared Sparrow and House Finch whose minimum frequencies can reach lower frequencies when compared with the songs of the House sparrow) to avoid overlapping their songs with the low frequencies of urban noise, 2) The peak frequency of each species will be negatively related to the percentage of vegetation, 3) The abundance of inter- and intraspecific individuals will be

related either positively or negatively to the peak frequency of the House and Rufous-collared Sparrows, but not to the House Finch, because the latter species is not territorial, and 4) The song entropy of the three species will be negatively related to the level of urban noise and the abundance of the species because more tonal songs (i.e. with lower entropy) have a higher probability of detection in noisy habitats.

METHODS

Study Area

We conducted this study in fourteen urban sites from February to April 2021 in San Cristóbal de las Casas city (16.7317°N and 92.6375°W, 2121 meters above sea level) Chiapas, Mexico (INEGI 2017; Figure 1). The climate is temperate sub-humid with summer rainfall, with mostly pine-oak forest vegetation (INEGI 2017). San Cristóbal de las Casas city has annual temperature ranges from 12 to 24°C and an annual precipitation range of the 1,000 to 1,500 mm. This city has a total population of 215,874 people (INEGI 2020), making it one of the most populated cities in Chiapas state. The three species of sparrows (House Finch, Rufous-collared and House sparrows) were present in the fourteen sampling sites, where they were exposed to different sources of anthropogenic noise (vehicular and people traffic noise). The sites were surrounded by man-made constructions and building, and they also harbored green areas or gardens. The minimum distance among sites was 100 m between to reduce the probability of recording the same individual at different sites. The geographic coordinates of each site were obtained with a Garmin GPS Navigator GPSMAP 64SX. ArcMap 10.8. (ESRI 2020) software was used to obtain the vegetation and built area percentages in a 50 m radius for each sampling site. For the statistical

analyses we only included the vegetation percentage due to the correlation with the construction percentage (Spearman's correlation: $r_s = -0.820$, $p < 0.001$).

Song recording and analysis

At each site, recordings were made with a SONY PCM-M10 digital hand-held recorder with a sampling rate of 44 kHz and 16-bit precision, connected to an Audio-technica AT8035 Shotgun condenser microphone. Only the songs of males of each species were recorded. Male House Finches and House Sparrows were easy to distinguish because of the sexual dimorphism of their plumage. However, Rufous-collared Sparrows are not sexually dimorphic in morph; males could be distinguished by their vocal behavior. Each recording period was recorded for at least one minute, except in cases where the bird flew away or stopped singing before the end of the recording period. The recording periods were from 0630 hours to 1100 hours, avoiding recording days with rain and wind greater than 3 m per s (Mendes et al. 2017). At the start of the recordings, we pointed the unidirectional microphone toward the focal bird at a distance 5-10 m (Bermúdez-Cuamatzin et al. 2009). House and Rufous-collared Sparrows greater tolerance to human proximity allowed us to record them at a distance as short as 1-2 m. When there was more than one male vocalizing at the same time, the microphone was directed towards the new individual only after obtaining a minimum of 5-10 songs from the former male.

We made 13 visits to each sampling site to record, and once sampling was completed, we selected the recordings to be analyzed. Recordings were numbered for each species, and 30 were selected per site and species with random numbers. The first song of the recording was chosen with sufficient quality to be analyzed (i.e., none background noise interference, no overlapping of other sounds). Subsequently the peak frequency (Hz) and average entropy of each song were

measured with RavenPro1.6.3 (Yang 2022). Peak frequency was the frequency with the highest energy of the song and is one of the most common characteristics used to analyze the variation of bird vocalizations. Entropy is a measure of the amount of information contained in a sign and allow us to know how versatile, complex, and random a song is (Shannon and Weaver 1964, Briefer et al. 2009, Mendes et al. 2017, Sandoval et al. 2018). Higher entropy values indicate more random and disordered songs, while lower entropy songs are more tonal (Hanna et al. 2011).

Ambient noise

Noise levels were measured at each recording site with a digital sound level meter EXTECH 407730 (range 20-130 dB (Type 2 ANSI S1.4-1983), A' weighting, 'fast' response). To measure noise levels, we placed the sound level meter horizontally to the ground at each cardinal point, starting from the North, followed by East, South and West. The noise was measured for 60 seconds, and the maximum and minimum values were recorded. These measurements were always taken 10 min before starting the recording of the songs. An average value for maximum and minimum noise level per site was obtained. Only the maximum noise values were considered for analyses. Noise measures are reported in dB SPL re 20 μ Pa.

Abundance

To estimate the relative abundance of the species at each sampling site, we used the point count method without a fixed radius, which consisted of counting all individuals per species during a period of 10 min. Abundance estimations and ambient noise measures were also carried out at the same time and day as the song recording. At each sampling point, a total of 13 repetitions were carried out to estimate abundance.

Statistical Analysis

We use Generalized Linear Models (GLM) to analyze a possible relationship between the song acoustic variables (peak frequency and entropy) of each sparrow species and the variables of noise level, percentage level of vegetation and abundance of individuals. Prior to the design of the models, we performed Shapiro-Wilk normality tests, and found that our data lacked a normal distribution. We also performed a substitution of missing values in our database using the linear interpolation and series average methods. Since the original values had different magnitudes and units of measurement, all variables were Z-standardized (i.e., re-scaled with mean =0 and SD =1). We performed segmented GLMs to test in each species the relationship between the dependent variables, acoustic parameters (song peak frequency and song entropy), and the maximum noise, the percentage of vegetation and the abundance of each species. The GLMs were custom models, with normal distribution and identity link function. The models were built with main effects and maximum likelihood estimation. Also, we tested through Kruskal-Wallis analyses for differences in noise levels between sites, abundances of individuals per species between sites, and peak frequency and song entropy between sparrow species. All statistical analyses were performed with SPSS 28.0 software (IBM Corp 2021).

RESULTS

Characteristics of the sites

Noise levels varied greatly across sites, ranging from $56.34 \text{ dB} \pm 1.52$ (mean \pm SE) to sites with $81.48 \text{ dB} \pm 4.30$ (mean \pm SE). The maximum noise level was also different among the 14 studied sites ($H= 81.72$, $df=13$, $P < 0.001$). Percentage of vegetation was also different among sites; and at least in some sites ($n= 5$) the highest maximum noise values coincided with the lowest

percentages of vegetation cover. Few sites had more than 25% vegetation (four sites), while most of them presented percentages of less than 5% of vegetation (seven sites).

Although all three sparrow species occurred in all sites their abundances varied across sites; House Finch ($H= 84.18$, $df=13$, $P < 0.001$); Rufous-collared Sparrow ($H= 56.22$, $df=13$, $P < 0.001$); and House Sparrow ($H= 82.98$, $df=13$, $P < 0.001$). The House Sparrow was the most abundant species ($x= 8 \pm 6.28$ individuals per site), followed by the Rufous-collared Sparrow ($x= 4.87 \pm 3.37$ individuals per site) and the least abundant was the House Finch ($x= 2.62 \pm 4.02$ individuals per site).

Vocal characteristics of the songs of the three sparrows

Song peak frequency differed across species ($H= 375.40$, $df= 2$, $P < 0.001$). Rufous-collared Sparrow had on average the highest peak frequency (mean \pm SE) of the three species (4503.72 Hz \pm 163.49, $n=420$), followed by the House sparrow (4135.81 Hz \pm 390.38, $n=420$) and the House Finch had the lowest values (3604.30 Hz \pm 90.49, $n=420$) (Figure 2; Table 1).

Song entropy also significantly varied among species ($H= 660.64$, $df=2$, $P < 0.001$). The House Finch had the highest mean value (3.38 ± 0.22 , $n=420$) compared to the other two species, House sparrow (3.24 ± 0.11 , $n=420$) and Rufous-collared Sparrow (2.55 ± 0.13 , $n=420$; Table 2).

Acoustic variables vs. noise level, percentage of vegetation and species abundance

We found different associations between song peak frequency and song entropy of each sparrow species with noise level, percentage of vegetation and abundance of individuals. For House Finch the song peak frequency was positively related to the abundance of conspecifics (Table 3). For

House Sparrow the song peak frequency was negatively related to vegetation percentage and positively related with House Finch abundance (Table 3). For the Rufous-collared Sparrow, there was no significant relationship between peak frequency and any of the measured variables (Table 3).

In the case of entropy, for House Finch and the Rufous-collared Sparrow this variable was positively related to noise level (Table 4). In addition, there was a negative relationship between the entropy of House Finch and the abundance of Rufous-collared Sparrow (Table 4). On the other hand, entropy in House Sparrow songs was negatively related to the percentage of vegetation, and to the noise level (Table 4).

DISCUSSION

Song peak frequency, noise, and vegetation relationship

The measured song characteristics were related to noise level, percentage of vegetation and abundance of conspecifics and heterospecifics in different ways according to each sparrow species. House Sparrow had a negative relationship between peak frequency and percent vegetation. Our results agreed with the prediction of the Acoustic Adaptation Hypothesis, where birds will sing at lower frequencies in habitats with abundant vegetation. Other bird species have been reported to sing at lower frequencies in densely vegetated habitats (Cardoso and Price 2010), since lower frequencies degrade less and lose less energy in closed habitats (Nicholls and Goldizen 2006, Boncoraglio and Saino 2007). House sparrows singing at lower frequencies in densely vegetated sites could transmit their song more efficiently.

Peak frequency of the House Finch was unrelated to the percentage of vegetation, like what has been reported previously (Bitterbaum and Baptista 1979, Fernández-Juricic 2005). Likewise, we did not find a relationship between the maximum song frequency of the Rufous Sparrow and the variables of noise level and percentage of vegetation. Although a positive relationship of these variables (vegetation and maximum song frequency) has been reported, where frequencies of this species are higher in closed habitats with more vegetation than in open habitats (Nottebohm 1975, Handford and Loughheed 1991, Tubaro and Segura 1994). Laiolo (2011) observed that Rufous-collared Sparrow songs in noisy urban habitats have higher frequencies than those in quieter rural areas. But also, these frequencies are higher in places with more vegetation than in open habitats (Nottebohm 1975, Handford and Loughheed 1991, Tubaro and Segura 1994). So, this species will increase its peak frequency when it detects barriers that may affect its communication.

Although, increased peak song frequency has been related to urban noise, we were unable to test this relationship for any of the three sparrows. It has been reported that House Finch can increase the minimum frequency of its songs in response to urban noise (Fernández-Juricic et al. 2005, Bermúdez-Cuamatzin et al. 2009), and that they do this frequency adaptation through vocal flexibility (Bermúdez-Cuamatzin et al. 2010). In this study we observed that House Finch presented significant variation in its peak frequency between sites, but noise was not a variable associated with this variation.

Peak frequency of song and sparrows' abundance

The peak frequency of House Finch was positively related to the abundance of conspecifics. Fernandez- Juricic et al. (2005) found no association between conspecific density and House

Finch's song peak frequency. Being a nonterritorial species, we expected that this species would not show a relationship between song peak frequency and conspecific abundance. Because the main function its song is to attract mates, inter-sexual selection has been proposed as a main force determining song characteristics in the House Finch (Mennill et al. 2006). Although the preferences of House Finch females have not been determined for song frequency parameters, it has been observed that females select males that emit longer songs and at a higher emission rate (Nolan and Hill 2004).

The peak frequency of House Sparrow was positively related to the abundance of House Finch (Table 1). The frequencies of the House Finch song fall between 1.4 kHz - 8.2 kHz (Bitterbaum and Baptista 1979), while those of the House Sparrow fall between 3.2 - 6.5 kHz (Henry and Lucas 2008). Thus, the song frequencies of House Finch can mask those of the House Sparrow. Peak song frequency in some species may depend on the species with which they coexist. For example, Yellow Rumped Tinkerbird (*Pogoniulus bilineatus*) decreases its song frequency when in sympatry with Yellow-throated Tinkerbird (*P. subsulphureus*), while this last species increases its song frequency (Kirschel et al. 2009). Song divergence of sympatric species has been documented to result in part from competition (Doutrelant et al. 2000, Haavie et al. 2004, Kirschel et al. 2009, Cardoso and Price 2010). This interspecific competition leads to character displacement in the frequency and temporal dimensions of acoustic signals (Haavie et al. 2004, Kirschel et al. 2009, Luther 2009, Cardoso and Price 2010). Then, the character displacement may help avoiding masking of their songs and ambiguity in species recognition.

For Rufous-collared Sparrow, although there was significant variation in peak frequency among sites, the abundance of conspecifics and heterospecifics does not appear to be a variable

influencing such variation. Most studies on the songs of the Rufous-collared Sparrow have focused on analyzing the effect of habitat on its song characteristics, however some researchers have suggested that there may be other factors in urban areas that could influence the variation or design of its songs. One such factor is the density of conspecifics (Nottebohm 1975, Tubaro and Segura 1994). Tubaro and Segura (1994) suggest that the density of conspecifics may contribute to variation in song characteristics of the Rufous-collared Sparrow between sites with closed vs. open vegetation. To our knowledge, our study is the first to include a measure of abundance of conspecifics to evaluate a possible association with song attributes in this species.

Song entropy in sparrows

Entropy is an acoustic variable that relatively few studies have included in their analyses. In this study, House Sparrow song entropy values were negatively related to the percentage of vegetation indicating that individuals emit more tonal songs at sites with higher percentage of vegetation. This could be due to the negative relationship that exists between entropy and frequency range (more tonal sounds have smaller bandwidths), which could help the sound to disperse better at sites with abundant vegetation.

The House sparrow's entropy was also negatively related to noise level. Individuals singing with lower entropy may be effective in improving the detectability of acoustic signals in noisy conditions (Lohr et al. 2003). Perhaps then, the low entropy values of house sparrows' songs in noisy sites are a consequence of an adjustment to maximize the transmission of their song. Red-winged Blackbird (*Agelaius phoeniceus*) decreased the entropy (i.e., increase the tonality) of their songs when exposed to low-frequency white noise (Hanna et al. 2011). The reasons for the

increase in song tonality, in noisy habitats, are still unclear. Songs with lower entropy are easier to detect and discriminate in noisy habitats (Lohr et al. 2003).

Noise level was positively related to Rufous-collared Sparrow and House Finch song entropy.

Previously, it has been reported that some birds have songs with higher entropy in noisy habitats.

Mendes et al. (2011a) compared the song of Tropical Wren (*Troglodytes musculus*) in a noise gradient in urban, peri-urban, and rural sites, where they found that song entropy was higher in urban than in peri-urban sites but found no significant variation between urban vs. rural areas.

They also found no effect of density of individuals on song entropy, although the authors attributed this to similar densities of individuals between sites. The same behavior was recorded for Pale-breasted thrush (*Turdus leucomelas*) with a positive relationship between noise levels and song entropy (Mendes et al. 2017). Songs with more entropy in noisy areas (as we found here for the Rufous-collared Sparrow and House Finch) may decrease the detectability by conspecifics potentially leading to an impaired territory defense and mate attraction. Future studies are needed to understand why some birds increase song entropy in noisy urban habitats.

House Finches vocalized with lower song entropy as Rufous-collared Sparrow abundance increased. We confirm the prediction of a negative relationship between entropy and heterospecific abundance. Singing with lower entropy would allow House Finches to be more distinguishable from the vocalizations of its heterospecific, when heterospecific individuals are abundant. A decrease in song entropy may decrease the probability of vocal overlap between individuals. In the case of the Rufous-collared and House Sparrows there was no relationship between entropy and abundance of heterospecific or conspecifics. Other studies have not reported

a significant relationship between song entropy and species density (Briefer et al. 2009, Mendes et al. 2011b, Mendes et al. 2017).

In this study, noise level, percentage of vegetation, and abundance of individuals were factors related to song peak frequency and song entropy in three studied sparrows living sympatry in San Cristóbal de Las Casas, Chiapas. The associations relationship between both biotic and abiotic factors with characteristics of the urban habitat and song variables (peak frequency and song entropy) varied markedly for each species. In two species, peak frequency was related to the percentage of vegetation and the abundance of conspecifics or heterospecific, while song entropy showed a relationship with noise levels for all three sparrows. The findings suggest that all three species are adjusting the tonality of their song in response to urban noise. Song entropy was also negatively associated with the percentage of vegetation and abundance of heterospecific in two sparrows. Adjusting song entropy could promote songs to be more distinguishable from the other vocalizations of birds with which they live in sympatry. More studies are needed to understand how the accelerated urbanization process associated with increased noise could severely affect acoustic communication, and consequently the adaptation of many species in urban habitats.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank Héctor Luna for his support in the fieldwork. José-Raúl Vázquez Pérez made the vegetation percentage estimates, and assisted in the statistical analyses and Figure 1.

Funding statement: We thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) of Mexico for providing funding for graduate studies to XDL (No. 001283). We are also grateful to El Colegio de la Frontera Sur's PATM graduate fellowship to field work.

Ethics statement: This research has been conducted under the principles dictated by the Research Ethics Committee (REC) from El Colegio de la Frontera Sur. The REC is an academic advisory body that promotes greater awareness of the ethical implications of scientific research. It is based on the Universal Declaration on Bioethics and Human Rights adopted by UNESCO (2005) and the Convention on Biological Diversity.

Author contributions: X.D.L. formulated the research question, collected the field data, measured the acoustic parameter of bird songs, performed the statistical analyses, wrote the first draft of the manuscript; P.L.E. formulated the research question, designed the study, wrote the manuscript to be translated into English; A.R.C. designed the study, contributed with feedback and discussion, and wrote parts of the manuscript; J.C.A. assisted in statistical analysis.

Data depository: The analyses in this article can be reproduced using the data provided by Díaz-Lezama et al. (2022).

LITERATURE CITED

- Azar, J. F., and B. D. Bell (2016). Acoustic features within a forest bird community of native and introduced species in New Zealand. *Emu* 116(1):22–31.
- Bermúdez-Cuamatzin, E., A. A. Ríos-Chelén, D. Gil, and C. M. Garcia (2009). Strategies of song adaptation to urban noise in the house finch: Syllable pitch plasticity or differential syllable use? *Behaviour* 146(9):1269–1286.
- Bermúdez-Cuamatzin, E., A. A. Ríos-Chelén, D. Gil, and C. M. Garcia (2010). Experimental evidence for real-time song frequency shift in response to urban noise in a passerine bird. *Biology Letters* 7(1):36–38.
- Bitterbaum, E., and L. Baptista (1979). Geographical variation in songs of California House finches (*Carpodacus mexicanus*). *Auk* 96:462–474.

- Boncoraglio, G., and N. Saino (2007). Habitat structure and the evolution of bird song: a meta-analysis of the evidence for the acoustic adaptation hypothesis. *Functional Ecology* 21(1):134–142.
- Briefer, E., T. S. Osiejuk, F. Rybak, and T. Aubin (2009). Are bird song complexity and song sharing shaped by habitat structure? An information theory and statistical approach. *Journal of Theoretical Biology* 262(1):151–164.
- Brumm, H. (2004). The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird. *Journal of Animal Ecology* 73(3):434–440.
- Brumm, H., and M. Naguib (2009). Chapter 1. Environmental acoustics and the evolution of bird song. In *Advances in the Study of Behavior Vocal Communication in Birds and Mammals* (M. Naguib, V. M. Janik, K. Zuberbühler and N. S. Clayton, Editors) *Advances in the Study of Behavior* 40:1–33. ELSEVIER. doi:10.1016/S0065-3454(09)40001-9.
- Brumm, H., and H. Slabbekoorn (2005). Acoustic Communication in Noise. *Advances in the Study of Behavior* 35:151–209.
- Cardoso, G. C., and T. D. Price (2010). Community convergence in bird song. *Evolutionary Ecology* 24(2):447–461.
- Catchpole, C. K., P. J. B. Slater (2008). *Bird song biological themes and variations*. Catchpole CK, Slater PJB, editors. New York: Cambridge University Press.
- Díaz-Lezama, X., A. A. Ríos-Chelén, J. Castellanos-Albores, and P. L. Enríquez (2022). Data from: Urban noise and biotic factors are associated with song features of three urban sympatric sparrows?. *Ornithology*. Data DOI or URL.
- Dorado-Correa, A. (2016). Anthropogenic noise, but not artificial light levels predicts song behaviour in an equatorial bird. *The Royal Society Publishing* 3:1–7.

- Doutrelant, C., and M. M. Lambrechts (2001). Macrogeographic variation in song - a test of competition and habitat effects in blue tits. *Ethology* 107(6):533–544.
- Doutrelant, C., A. Leitao, K. Otter, and M. M. Lambrechts (2000). Effect of blue tit song syntax on great tit territorial responsiveness - An experimental test of the character shift hypothesis. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 48(2):119–124.
- ESRI (2020). ArcGIS Desktop, version 10.8. Redlands, CA. <https://www.arcgis.com/index.html>
- Ey, E., and J. Fisher (2009). The “acoustic adaptation hypothesis”—a review of the evidence from birds, anurans and mammals. *Bioacoustics* 19(1–2):21–48.
- Fernández-Juricic, E., R. Poston, K. de Collibus, T. Morgan, B. Bastain, C. Martin, K. Jones, and R. Treminio (2005). Microhabitat selection and singing behavior patterns of male house finches (*Carpodacus mexicanus*) in urban parks in a heavily urbanized landscape in the western U.S. *Urban Habitats* 3(1):49–69.
- Francis, C. D., C. P. Ortega, and A. Cruz (2011). Noise pollution filters bird communities based on vocal frequency. *PLoS ONE* 6(11):1–8.
- Fuller, R. A., P. H. Warren, and K. J. Gaston (2007). Daytime noise predicts nocturnal singing in urban robins. *Biology Letters* 3(4):368–370.
- Gil D., and H. Brumm (2014). Acoustic communication in the urban environment: patterns, mechanisms, and potential consequences of avian song adjustments. In *Avian urban ecology* (H. Gil and H. Brumm, Editors). Oxford University Press, Oxford.
- Haavie, J., T. Borge, S. Bures, L. Z. Garamszegi, H. M. Lampe, J. Moreno, A. Qvarnström, J. Török, G. Saetre (2004). Flycatcher song in allopatry and sympatry – convergence, divergence, and reinforcement. *Journal of Evolutionary Biology* 17:227–237.

- Handford, P., and S. C. Loughheed (1991). Variation in duration and frequency characters in the song of the Rufous-Collared Sparrow, *Zonotrichia capensis*, with respect to habitat, trill dialects and body size. *Condor* 93(3):644–658.
- Hanna, D., G. Blouin-Demers, D. R. Wilson, and D. J. Mennill (2011). Anthropogenic noise affects song structure in red-winged blackbirds (*Agelaius phoeniceus*). *Journal of Experimental Biology* 214(21):3549–3556.
- Henry, K. S., and J. R. Lucas (2008). Coevolution of auditory sensitivity and temporal resolution with acoustic signal space in three songbirds. *Animal Behaviour* 76(5):1659–1671.
- Hu, Y., and G. C. Cardoso (2009). Are bird species that vocalize at higher frequencies preadapted to inhabit noisy urban areas? *Behavioral Ecology* 20(6):1268–1273.
- IBM Corp. (2021). IBM SPSS Statistics for Macintosh, version 28.0. Armonk, NY.
<https://www.ibm.com/spss>
- INEGI (2017). Anuario estadístico y geográfico de Chiapas 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI, México.
- INEGI (2020). México en cifras. [Online.] Available at
<https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/#collapse-Resumen>.
- Job, J.R., S. L. Kohler, and S. A. Gill (2016). Song adjustments by an open habitat bird to anthropogenic noise, urban structure, and vegetation. *Behavioral Ecology* 27(6):1734–1744.
- Kirschel, A. N. G., Blumstein DT, Smith TB. 2009. Character displacement of song and morphology in African tinkerbirds. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 106(20):8256–8261.
- Konishi, M. (1970). Evolution of design features in the coding of species-specificity. *American Zoologist* 10:67–72.

- Kroodsma DE. 1985. Geographic variation in songs of the Bewick's wren: a search for correlations with avifauna complexity. *Behavioral Ecology Sociobiology* 16:143–150. <https://doi.org/10.1007/BF00295148>.
- Laiolo, P. (2011). The rufous-collared sparrow *Zonotrichia capensis* utters higher frequency songs in urban habitats. *Revista Catalana d'Ornitologia* 27:25–30.
- Lohr, B., T. F. Wright, and R. J. Dooling (2003). Detection and discrimination of natural calls in masking noise by birds: estimating the active space of a signal. *Animal Behaviour* 65(4):763–777.
- Lougheed, S. C., L. Campagna, J. A. Dávila, P. L. Tubaro, D. A. Lijtmaer, and P. Handford (2013). Continental phylogeography of an ecologically and morphologically diverse Neotropical songbird, *Zonotrichia capensis*. *BMC Evolutionary Biology* 13(58):1–15.
- Luther, D. (2009). The influence of the acoustic community on songs of birds in a neotropical rain forest. *Behavioral Ecology* 20(4):864–871.
- Marques, T., S. T. Buckland, and L. Thomas (2011). Distance sampling. In *International Encyclopedia of Statistican Science* (M. Lovric, Editor). Springer-Verlag, Berlin.
- Marzluff, J., R. Bowman, and R. Donnelly (2001). A historical perspective on urban bird research: trends, terms, and approaches. In *Avian Ecology and Conservation in an Urbanizing World* (J. Marzluff, R. Browman, and R. Donnelly, Editors). *Avian Ecology and Conservation in an Urbanizing World*. Springer, Boston pp. 1-17.
- Mendes, S., V. J. Colino-Rabanal, and S. J. Peris (2011a). Changes in the vocalization of the Southern House Wren (*Troglodytes musculus*) in environments with different levels of human disturbance. *Hornero* 26(2):85–93.

- Mendes, S., V. J. Colino-Rabanal, and S. J. Peris (2011b). Bird song variations along an urban gradient: the case of the European blackbird (*Turdus merula*). *Landscape and Urban Planning* 99(1):51–57.
- Mendes, S., V. J. Colino-Rabanal, and S. J. 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(2):633–642.
- Mennill, D., A. Badyaev, L. M. Jonart, and G. E. Hill (2006). Male house finches with elaborate songs have higher reproductive performance. *Ethology* 112(2):174–180.
- Mertins, B. (2021). Nature mentoring. Why do sparrows chirp? (five sparrow calls & what they mean). [Online.] Available at <https://nature-mentor.com/why-sparrows-chirp/>
- Morton, E. S. (1975). The American society of naturalist ecological sources of selection on avian sounds. *The American naturalist* 109(965):17–34.
- Mundinger, P. (1975). Song dialects and colonization in the house finch, *Carpodacus mexicanus*, on the east coast. *The Condor* 77:407.
- Naugler, C., and L. Ratcliffe (1994). Character release in bird song: a test of the acoustic competition hypothesis using American Tree Sparrows *Spizella arborea*. *Journal of avian biology* 25(2):142–148.
- Nemeth, E., and H. Brumm (2009). Blackbirds sing higher-pitched songs in cities: adaptation to habitat acoustics or side-effect of urbanization? *Animal Behaviour* 78(3):637–641.
- Nicholls, J., and A. Goldizen (2006). Habitat type and density influence vocal signal design in satin bowerbirds. *Journal of Animal Ecology* 75(2):549–558.
- Nolan, P. M., and G. E. Hill (2004). Female choice for song characteristics in the house finch. *Animal Behaviour* 67(3):403–410.

- 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.
- Nottebohm, F. (1975). Continental patterns of song variability in *Zonotrichia capensis*: some possible ecological correlates. *The American Naturalist* 109(970):605–624.
- Patricelli G. L., and J. L. Blickley (2006). Avian communication in urban noise: causes and consequences of vocal adjustment. *Auk* 123:639–649.
- Polak, M. (2014). Relationship between traffic noise levels and song perch height in a common passerine bird. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 30:72–75.
- Ríos-Chelén A.A. (2009). Birdsong: the interplay between urban noise and sexual selection. *Oecol Brasil* 13:153–164.
- Ríos-Chelén, A. A., C. Cuatianquiz-Lima, A. Bautista, and M. Martínez-Gómez (2018). No reliable evidence for immediate noise-induced song flexibility in a suboscine. *Urban Ecosystems* 21(1):15–25.
- Ripmeester, E. A. P., M. Mulder, and H. Slabbekoorn (2010). Habitat-dependent acoustic divergence affects playback response in urban and forest populations of the European blackbird. *Behavioral Ecology* 21(4):876–883.
- Sandoval L, Barrantes G, Wilson D. 2018. Conceptual and statistical problems with the use of the Shannon-Weiner entropy index in bioacoustic analyses. *Bioacoustics* 28(4):297–311.
- Seddon, N. (2005). Ecological adaptation and species recognition drives vocal evolution in neotropical suboscine birds. *Evolution* 59(1):200–215.
- Shannon, C. E., and W. Weaver (1964). *The mathematical theory of communication*. The University of Illinois Press, United States of America.
- Slabbekoorn, H. (2004). Singing in the wild: the ecology of birdsong. In *Bird calls: a cornucopia for communication* (P. Marler and H. Slabbekoorn, Editors). Elsevier, California, USA.

- Slabbekoorn, H., and A. den Boer-Visser A. (2006). Cities change the songs of birds. *Current Biology* 16(23):2326–2331.
- Slabbekoorn, H., and E. A. P. Ripmeester (2008). Birdsong and anthropogenic noise: Implications and applications for conservation. *Molecular Ecology* 17(1):72–83.
- Slabbekoorn, H., P. Yeh, and K. Hunt (2007). Sound transmission and song divergence: a comparison of urban and forest acoustics. *Condor* 109(1):67–78.
- Tubaro P. L., and E. Segura (1994). Dialect differences in the song of *Zonotrichia capensis* in the southern Pampas: a test of the acoustic adaptation hypothesis. *Condor* 96(4):1084–1088.
- Tubaro, P. L., and E. T. Segura, and P. Handford (1993). Geographic variation in the song of the Rufous-collared sparrow in eastern Argentina. *Condor* 95(3):588–595.
- Verboom, W., and C. Heij (2018). Bird vocalizations: the House sparrow (*Passer domesticus*). https://www.researchgate.net/publication/326234889_Bird_vocalizations_the_House_sparrow_Passer_domesticus.
- Winandy G., R. Félix, R. Sacramento, M. Rilquer, H. Batalha-Filho, H. F. Japyassú, P. Izar, and H. Slabbekoorn (2021). Urban noise restricts song frequency bandwidth and syllable diversity in Bananaquits: Increasing audibility at the expense of signal quality. *Frontiers in Ecology and Evolution* 9(570420):1–11.
- Yang, K.L. Center for Conservation Bioacoustics at the Cornell Lab of Ornithology. (2022). Raven Pro: Interactive Sound Analysis Software, version 1.6.3 [Computer software]. Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY, USA. from <https://ravensoundsoftware.com/>.

Table 1. Song peak frequency of the three sparrow species (Post Hoc Kruskal-Wallis) in San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, February-April 2021.

Pairwise comparison of song peak frequency	Kruskal-Wallis (<i>H</i>)	SE	<i>P</i>
House Finch – House Sparrow	-260.26	25.06	< 0.001
House Finch – Rufous-collared Sparrow	-485.16	25.06	< 0.001
Rufous-collared Sparrow - House Sparrow	-224.90	25.06	< 0.001

Table 2. Song entropy of three sparrow species (Post Hoc Kruskal-Wallis) in San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, February-April 2021.

Pairwise comparison of song entropy	Kruskal-Wallis (<i>H</i>)	SE	<i>P</i>
House Finch – House Sparrow	180.83	25.10	< 0.001
House Finch – Rufous-collared Sparrow	626.96	25.10	< 0.001
Rufous-collared Sparrow - House Sparrow	446.08	25.10	< 0.001

Table 3. Average song peak frequency of the three sparrow species (n=1260) and maximum noise level, vegetation percentage, and abundance of the three species in San Cristobal de Las Casas, Chiapas, Mexico. February-April 2021.

Dependent variable	Explanatory variable	β	95% Wald's confidence interval		<i>P</i> -value
			lower	upper	
Song peak frequency of House Finch	Maximum noise	0.03	-0.03	0.09	0.28
	Vegetation percentage	-0.01	-0.07	0.05	0.65
	House Finch Abundance	0.11	0.02	0.19	0.01
	House Sparrow Abundance	0.03	-0.02	0.08	0.24
	Rufous-collared Sparrow Abundance	-0.03	-0.12	0.06	0.48
Song peak frequency of Rufous-collared Sparrow	Maximum noise	-0.05	-0.15	0.06	0.39
	Vegetation percentage	0.05	-0.05	0.16	0.31
	Rufous-collared Sparrow Abundance	-0.07	-0.23	0.10	0.41
	House Finch Abundance	-0.10	-0.25	0.06	0.22
	House Sparrow Abundance	0.03	-0.05	0.10	0.48
Song peak frequency of House Sparrow	Maximum noise	-0.08	-0.20	0.03	0.16
	Vegetation percentage	-0.39	-0.51	-0.28	<0.001
	House Sparrow Abundance	-0.01	-0.10	0.08	0.86
	House Finch Abundance	0.29	0.12	0.46	0.001
	Rufous-collared Sparrow Abundance	-0.08	-0.23	0.08	0.33

Table 4. Average entropy of the three sparrow species (n=1260) and of maximum noise level, vegetation percentage, and abundance of sparrow species in San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, Mexico. February-April 2021.

Dependent variable	Explanatory variable	β	95% Wald's confidence interval		P-value
			lower	upper	
Entropy of House Finch	Maximum noise	0.17	0.10	0.23	<0.001
	Vegetation percentage	0.01	-0.06	0.08	0.71
	House Finch Abundance	-0.06	-0.15	-0.04	0.24
	House Sparrow Abundance	0.03	-0.02	0.09	0.27
	Rufous-collared Sparrow Abundance	-0.16	-0.26	-0.07	<0.001
Entropy of Rufous-collared Sparrow	Maximum noise	0.09	0.00	0.17	0.05
	Vegetation percentage	0.06	-0.03	0.14	0.21
	Rufous-collared Sparrow Abundance	0.09	-0.05	0.23	0.22
	House Finch Abundance	0.04	-0.09	0.16	0.59
	House Sparrow Abundance	-0.03	-0.09	0.03	0.27
Entropy of House Sparrow	Maximum noise	-0.14	-0.21	-0.07	<0.001
	Vegetation percentage	-0.14	-0.21	-0.07	<0.001
	House Sparrow Abundance	-0.02	-0.07	0.03	0.46
	House Finch Abundance	0.03	-0.07	0.13	0.55
	Rufous-collared Sparrow Abundance	-0.01	-0.10	0.09	0.90

Figure Captions

Figure 1. Study areas in fourteen urban sites where songs of the House Finch (*Haemorhous mexicanus*), Rufous-collared Sparrow (*Zonotrichia capensis*) and House Sparrow (*Passer domesticus*) were recorded, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, Mexico. From February to April 2021.

Figure 2. Sonogram of the song of three sparrow species: (2A) House Finch, (2B) Rufous-collared Sparrow, (2C) House Sparrow in San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, February-April 2021.

Figure 1

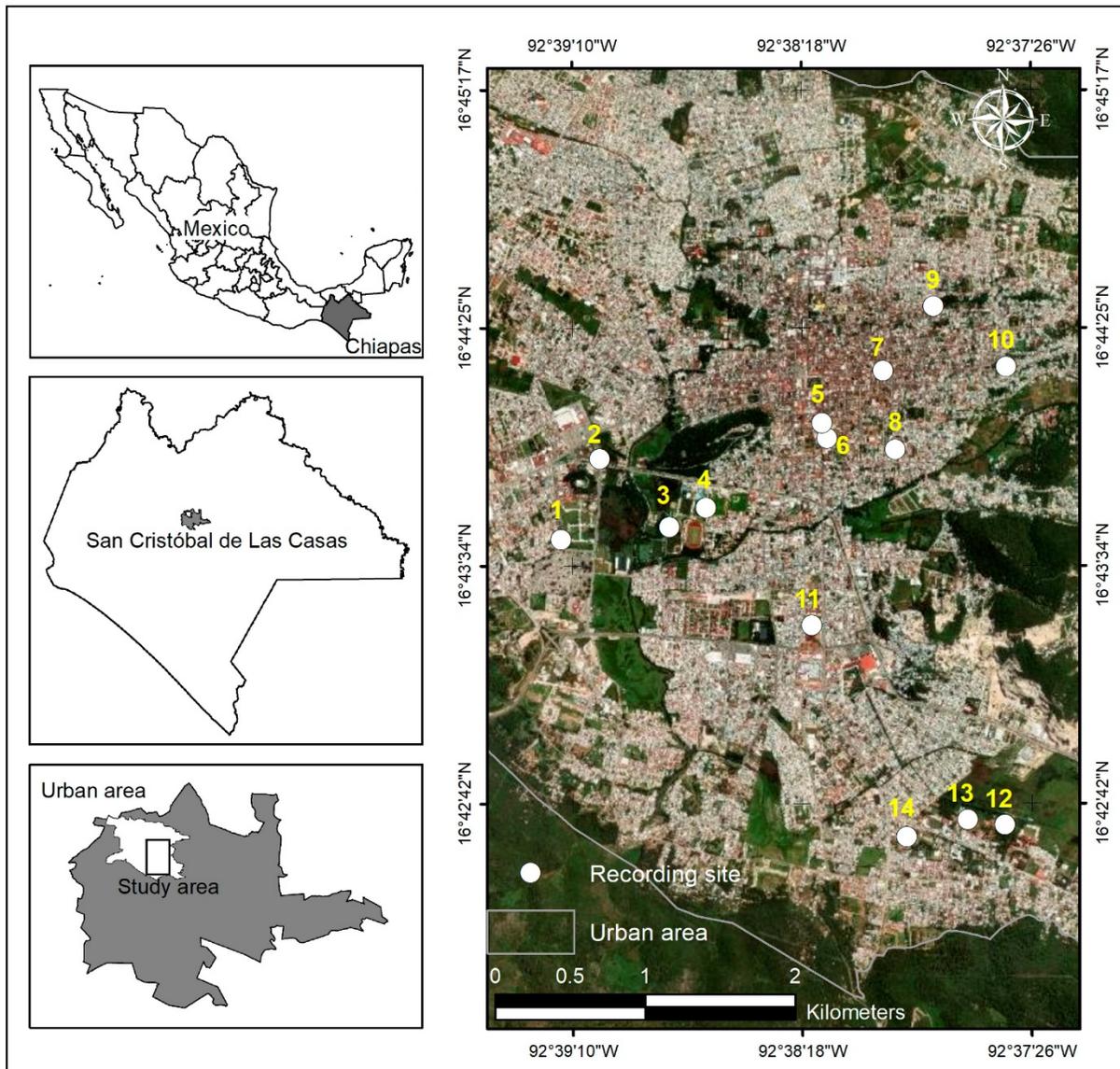
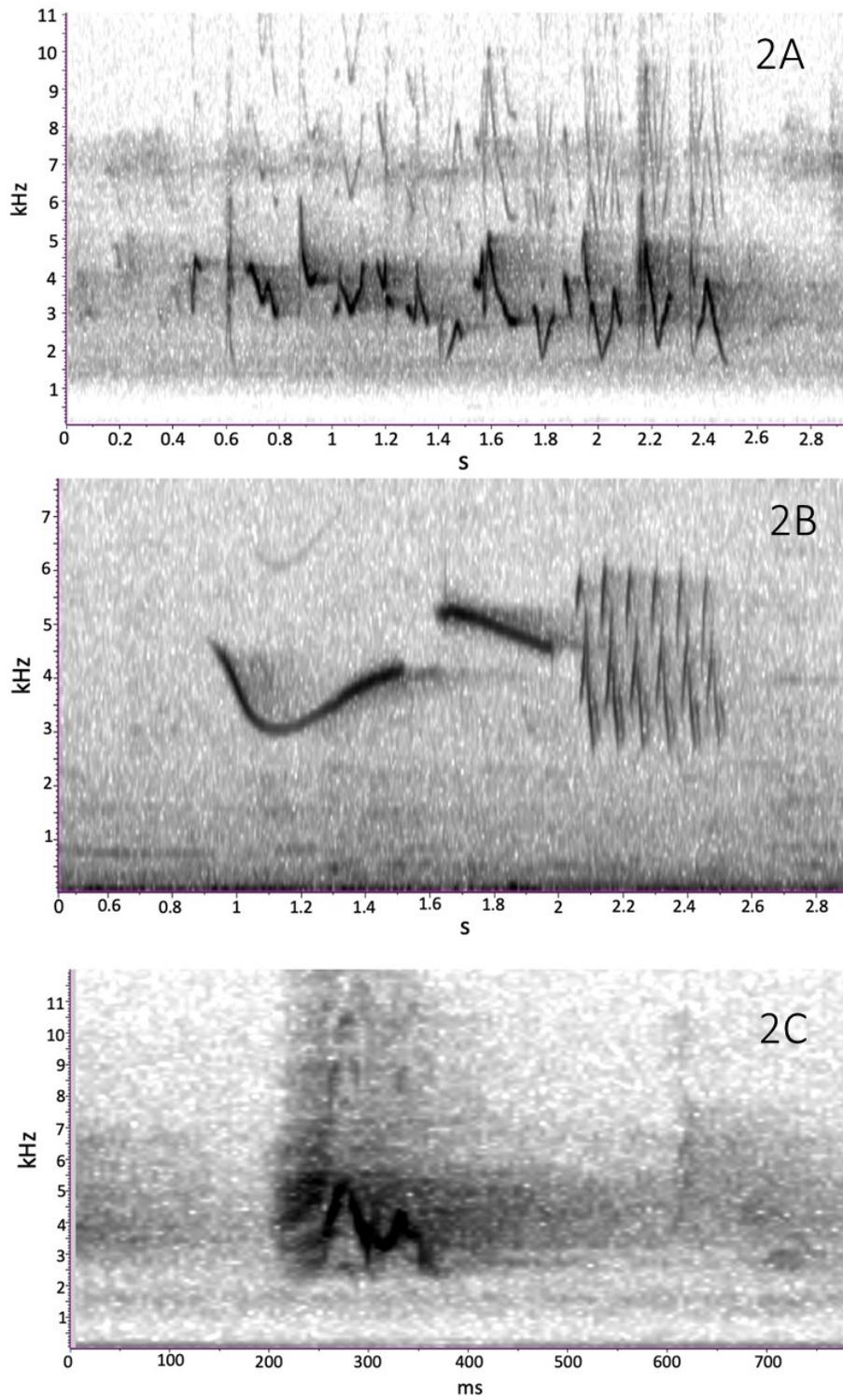


Figure 2



Capítulo 3

Más allá del ruido antropogénico: ¿El porcentaje de vegetación y la abundancia de individuos se relacionan con las características temporales del canto de tres especies de gorriones simpátricos (gorrión mexicano, gorrión chingolo y gorrión doméstico)?

Resumen:

Factores como el nivel de ruido, la estructura de la vegetación y las interacciones intra e interespecíficas pueden afectar las características del canto de las aves que viven en zonas urbanas. Evitar el enmascaramiento y la degradación del canto es de vital importancia porque las aves que dependen principalmente de la vía acústica para su comunicación. Estudiamos si las características del canto de tres especies de gorriones simpátricos urbanos se relacionan con el nivel de ruido, el porcentaje de cobertura vegetal y la abundancia conoespecífica/heteroespecífica. Grabamos los cantos del gorrión mexicano (*Haemorhous mexicanus*), gorrión chingolo (*Zonotrichia capensis*) y gorrión doméstico (*Passer domesticus*) en 14 sitios urbanos de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, y analizamos sus características de duración, número de sílabas, tasa de sílabas y diversidad silábica. Encontramos que la duración del canto del gorrión chingolo y doméstico se relacionaron con el porcentaje de cobertura de la vegetación, y también al nivel de ruido para el gorrión doméstico. El número de sílabas del gorrión mexicano se relacionó con el nivel de ruido. La tasa de sílabas del gorrión mexicano se relacionó con el porcentaje de cobertura de la vegetación, ruido, y abundancia conoespecífica y heteroespecífica. Y la tasa de sílabas del gorrión doméstico se relacionó con el porcentaje de cobertura de la vegetación y la abundancia heteroespecífica. La diversidad silábica se relacionó al nivel de ruido en el gorrión mexicano. Y la diversidad silábica del gorrión chingolo se relacionó al porcentaje de cobertura de la vegetación, abundancia conoespecífica y heteroespecífica. Concluimos que los diferentes factores que forman parte de los ambientes urbanos se relacionan en mayor o menor medida con las características del canto de las tres especies de

gorriones. Esto nos indica la importancia de entender cómo los factores ambientales influyen en la comunicación de las aves en ambientes urbanos.

Palabras clave: *características acústicas, diversidad silábica, estructura urbana, ruido urbano, abundancia de aves, cantos de aves.*

Introducción

El ruido en ambientes urbanos originado por vehículos de motor, tráfico, fábricas, aviones y transeúntes puede saturar e interferir las vías de comunicación acústica de diversas especies de aves, motivándolas a modificar tanto la estructura del canto como su conducta vocal (Rheindt 2003; Fuller et al. 2007; Mockford y Marshall 2009; Laiolo 2011; Mockford et al. 2011; Polak 2014). Las principales funciones del canto son para atracción de la pareja y la defensa del territorio, entonces, una comunicación ineficiente repercute negativamente en la adecuación de las especies (Bermúdez-Cuamatzin et al. 2009; Briefer et al. 2009). En ambientes ruidosos se ha observado que algunas especies pueden adaptar las características de frecuencia y temporales de sus cantos (Potash 1972; Fernández-Juricic et al. 2005; Brumm and Slater 2006; Bermúdez-Cuamatzin et al. 2009; Bermúdez-Cuamatzin et al. 2010; Hamao et al. 2011; Mendes et al. 2011; Ríos-Chelén et al. 2013; Job et al. 2016; Mendes et al. 2017; Winandy et al. 2021) como una estrategia para evitar el solapamiento por ruido. Aumentar la duración del canto y emitir mayor número de elementos o sílabas por canto parece ser una estrategia que aplican algunas aves para transmitir eficientemente su canto en ambientes ruidosos (Potash 1972; Hamao y Ueda 2000; Ríos-Chelén et al. 2013). Aunque algunas especies pueden producir cantos más cortos (Fernández-Juricic et al. 2005; Slabbekoorn and den Boer-Visser 2006) y con menos sílabas en sitios ruidosos (Fernández-Juricic et al. 2005; Potvin et al. 2011). La tasa de cantos y tasa de sílabas son dos parámetros cuya variación también se relaciona al nivel del ruido (Slabbekoorn and den Boer-Visser 2006; Potvin et al. 2011). Por ejemplo, los silvereyes (*Zosterops lateralis*) cantan con menor tasa de sílabas cuando están en sitios con mayor nivel de ruido urbano (Potvin et al. 2011). Esto puede ser una estrategia que permita aumentar

el radio temporal entre la señal-ruido, y así evitar que los cantos se enmascaren con el ruido urbano.

La estructura de la vegetación es otro factor que influye en la transmisión de los cantos. Los cantos de frecuencias altas se degradan más rápido en ambientes cerrados que en ambientes abiertos. Además, la vegetación influye en características temporales y de complejidad del canto, como la tasa de canto (Handford 1981; Bueno-Enciso et al. 2016), el tipo de canto y las sílabas que el ave canta de su repertorio (Handford 1981). Las aves llegan a emitir cantos más largos en sitios con vegetación densa que en sitios más abiertos (Handford and Loughheed 1991; van Dongen and Mulder 2006; Hill et al. 2017). Esto puede deberse a que, los cantos más largos sufren menor absorción y pierden menos energía que los cantos cortos al pasar a través de obstáculos de la vegetación (como hojas, ramas y arbustos). Otras aves emiten cantos con mayor diversidad silábica a mayor densidad y complejidad de la vegetación (Hill et al. 2017).

Las construcciones humanas son otras estructuras del entorno, que pueden absorber las ondas sonoras y/o degradar la estructura del sonido. Comúnmente los ambientes urbanos presentan poca y fragmentada vegetación, y una gran cantidad de construcciones verticales de concreto. Las construcciones generan reverberaciones, que son ecos producidos por una señal acústica al reflejarse varias veces contra una superficie (Slabbekoorn et al. 2007). Las reverberaciones actúan rellenando con ecos los intervalos de silencio entre cantos y/o sílabas, y alteran la estructura original de los cantos (Naguib 2003; Slabbekoorn et al. 2007; Job et al. 2016). Algunas estrategias pueden ayudar a las aves a lidiar con la degradación del canto. Por ejemplo, el gorrión coronirrofo (*Spizella passerina*) aumenta la duración del silencio entre cantos sucesivos como respuesta al incremento de la estructura urbana (Job et al. 2016).

La densidad de individuos es otro factor que puede incentivar la modificación de las características del canto. Las altas densidades de individuos implican mayor número de interacciones sociales, más intensas y más frecuentes, y mayor cantidad de individuos vocalizando para intentar comunicarse (Nemeth y Brumm 2009). Además, distintas especies de aves pueden tener características de canto similares y vocalizar al mismo

tiempo en un mismo sitio, lo cual produce interferencias o sobreposición entre sus cantos. Para evitar esta sobreposición acústica, existe la partición de la dimensión acústica (Kirschel et al. 2009; Luther y Wiley 2009). En sitios con altas densidades de individuos, los machos de algunas especies emiten cantos más largos y con mayor tasa de canto (i.e. cantos más rápidos), que en sitios con menores densidades (Goretskaia 2004; Hamao et al. 2011). Además, especies como el carbonero común (*Parus major*) tienen mayor cantidad de frases por canto a mayor densidad de individuos (Hamao et al. 2011). También, la alta densidad de individuos puede influir en la redundancia de los cantos, promoviendo que las aves repitan varias veces un mismo canto o sílabas antes de cambiar a otras (i.e. tienen cantos redundantes), (Jouventin et al. 1999; Lengagne et al. 1999). Mayor redundancia o menor diversidad silábica aumenta la probabilidad de que la información acústica sea recibida por el receptor, sobre todo en sitios con mucho ruido tanto abiótico como procedente de otras especies vocalizando en el mismo espacio acústico (Brumm and Slater 2006).

En San Cristóbal de las Casas, Chiapas, ocurren en simpatria los gorriones mexicano (*Haemorhous mexicanus*), chingolo (*Zonotrichia capensis*) y doméstico (*Passer domesticus*). San Cristóbal de las Casas ha sufrido un acelerado e intenso proceso de urbanización, y con ello la modificación de las características del ambiente acústico. Cada una de las especies de gorriones estudiadas posee cantos con características específicas. El gorrión mexicano es una especie que tiene un canto complejo y rápido, con mucha variación intra e inter-individual (Mundinger 1975). Sus cantos duran de 1 a 4 segundos, presentan entre 4 a 30 sílabas cada uno y en ocasiones contienen zumbidos terminales (Tracy y Baker 1999). Por otro lado, el gorrión chingolo es una de las especies más polítípicas del mundo con cerca de veinte sub-especies (Lougheed et al. 2013), y posee una gran variación vocal. Su canto se compone de un tema o sílbido (con gran variación interindividual en aves de una misma área), y una porción terminal o trino (el cual es compartido por aves de una misma área) (Nottebohm 1969; Nottebohm 1975; Tubaro et al. 1993). Su canto dura en promedio 1.49 segundos (Handford y Lougheed 1991), con 2 a 5 sílabas en el tema (Tubaro et al. 1993) y de 3 a 5 sílabas en el trino (observ. pers.). Mientras que, el gorrión doméstico posee un tipo de canto muy simple y corto, es una especie de sonido “chirriante” o “píos” repetidos. Presenta de dos

a cuatro sílabas cortas por canto (observ. pers.) y la duración promedio de sus cantos es de 1.1 s (Henry y Lucas 2008).

En este estudio decidimos analizar el cómo las características del canto de los gorriones mexicano, chingolo y doméstico, se relacionan con el nivel de ruido, el porcentaje de cobertura de la vegetación y de construcción, y la abundancia de individuos conespecífica/heteroespecífica. Estudiamos las características de duración del canto, número de sílabas, tasa de sílabas y diversidad silábica del canto de cada especie. Para cada característica del canto establecimos las siguientes predicciones: 1) La duración del canto se relacionará negativamente con el nivel de ruido, como un posible ajuste de su canto a los intervalos de silencio en medio del ruido. Por otra parte, la duración del canto de los tres gorriones se relacionará positivamente con el porcentaje de vegetación, ya que los cantos más largos en ambientes abiertos pierden energía más rápido. También, la duración del canto se relacionará negativamente a la abundancia de individuos, debido al aumento de individuos vocalizando al mismo tiempo. 2) El número de sílabas se relacionará negativamente con el nivel de ruido, evitando la acumulación y solapamiento de las reverberaciones con los cantos. Además, el número de sílabas se relacionará positivamente con el porcentaje de cobertura vegetal y la abundancia de individuos (conespecíficos y heteroespecíficos). 3) La tasa de sílabas se relacionará negativamente con el ruido y el porcentaje de cobertura vegetal, pero se relacionará positivamente con la abundancia de individuos, ya que al cantar más rápido pueden evitar solaparse con el canto de otros individuos. 4) Esperamos que la diversidad silábica se relacione negativamente al nivel de ruido, ya que esto podría hacerlos más redundantes, y por lo tanto más fáciles de percibir en medio del ruido. La diversidad silábica se relacionará negativamente a la abundancia conespecífica y heteroespecífica, debido a que cantos más redundantes y predecibles se distinguen más fácilmente del resto de aves simpátricas cantando. Finalmente, la diversidad silábica se relacionará positivamente al porcentaje de vegetación.

Métodos

Área de estudio

El trabajo de campo se realizó en 14 sitios urbanos de la ciudad de San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México (16.4412 ° N, de 92.3818° W, 2,121 msnm; INEGI 2017) (Figura 1), en el período de febrero a abril de 2021. San Cristóbal de Las Casas posee un clima principalmente templado subhúmedo con lluvias en verano, tiene una temperatura media anual de 15.1 °C, y su vegetación es bosque de pino-encino (INEGI 2017). En el 2020 la población aproximada de esta ciudad fue de 215,874 personas, lo que representó un crecimiento del 16.1% en comparación al año 2010 (DataMÉXICO BETA 2020). Esto posiciona a San Cristóbal de las Casas como una ciudad con un alto crecimiento poblacional en Chiapas, México. Los sitios para grabar los cantos de las tres especies de gorriones presentaron las siguientes características: 1) la presencia de los tres gorriones en simpatría; 2) estar rodeadas por construcciones humanas; 3) estar expuestos al ruido urbano; y 4) presentar áreas verdes o jardines. La distancia mínima entre sitios fue de 100 m, para disminuir la probabilidad de grabar al mismo individuo en dos sitios.

Grabación de cantos:

Se realizaron grabaciones de cantos de machos de cada especie en cada uno de los 14 sitios urbanos. Los machos del gorrión mexicano y doméstico se distinguieron por su dicromatismo sexual. En el caso del gorrión chingolo, los machos se diferenciaron por su conducta vocal activa. En cada sitio se identificaba al ave cantando y nos acercábamos a una distancia de entre 5-10 m para empezar a grabar (Bermúdez-Cuamatzin et al. 2009). En caso de haber más de un macho vocalizando al mismo tiempo, grabábamos de 5-10 cantos del ave más cercana y después procedíamos a grabar a la más lejana. Se grababa durante mínimo un minuto, a menos que el ave volara o dejara de cantar. Las grabaciones se realizaron de 6:30 a 11:00 h, evitando grabar en días con lluvia y con una velocidad de viento mayor a 3 m/s (Mendes et al.

2017). Utilizamos una grabadora manual digital modelo SONY PCM-M10 configurada con una tasa de muestreo de 44 kHz y 16 bits de precisión. Conectamos la grabadora a un micrófono unidireccional tipo Shotgun modelo Audio-technica AT8035, con el objetivo de obtener una mayor fidelidad del sonido. En total se realizaron 13 visitas en cada sitio de grabación y al completar el período de grabación se seleccionaron los cantos que serían analizados. Todos los cantos grabados fueron archivados por especie en un disco duro y se les asignó un número consecutivo. Posteriormente se generó una base de datos con toda la información de cada grabación y mediante números aleatorios se seleccionaron 30 grabaciones por sitio/especie. En cada grabación seleccionada, por medio del espectograma se elegía el primer canto que tuviera buena calidad para ser analizada (i.e. que no tuviera solbreapamiento ni interferencia con otros sonidos o ruido de fondo). Al seleccionar los cantos para ser analizados, se utilizó el software RavenPro1.6 (K. Lisa Yang Center for Conservation Bioacoustics at the Cornell Lab of Ornithology 2022) a partir del espectograma con la transformación rápida de Fourier. En las grabaciones de los cantos medimos la duración (largo del canto medido en segundos (s), el número de sílabas (total de sílabas contenidas en el canto), la tasa de sílabas (el número de sílabas emitidas por segundo) y la diversidad silábica (el número de distintas sílabas por canto).

Medición del ruido urbano y porcentaje de vegetación:

Medimos el nivel de ruido urbano con un sonómetro digital marca EXTECH 407730, con una escala de 20-130 dB (ASIN: B000BEZV90). El nivel de ruido se obtuvo mediante una ponderación A' y con un tiempo de respuesta 'rápida'. Se midió el nivel de ruido siempre en el mismo punto de cada sitio de grabación, y en los mismos días cuando se grababan los cantos y se media la abundancia de individuos. El nivel de ruido se midió durante los 10 minutos previos al comienzo del proceso de grabación de los cantos con una adaptación del método de Brumm (2004). Este método consistió en colocar el sonómetro de manera horizontal al suelo dirigido al Norte. En esta posición se medía el ruido por 60 segundos y se registraban los valores mínimo y máximo. Posteriormente, se giraba el sonómetro 90° en dirección de las manecillas del reloj (Este) para realizar la siguiente medida de ruido. Se repitió el proceso hasta completar los cuatro puntos

cardinales (0, 90, 180 y 360 grados). Los valores obtenidos al día se promediaron para cada punto muestreado. Debido a que encontramos que el nivel de ruido mínimo y máximo son variables complementarias correlacionadas, utilizamos sólo el nivel ruido máximo para los análisis posteriores. Los valores de ruido se dan en decibelios dB SPL re 20 μ Pa.

Para obtener el porcentaje de cobertura de la vegetación y construcción de los sitios urbanos, primero obtuvimos las coordenadas geográficas de los sitios con un GPS Garmin Navegador GPSMAP 64SX. Consideramos el porcentaje de cobertura de la vegetación al porcentaje de suelo que está cubierto por vegetación verde (incluyendo jardines sin árboles, parques, humedales, fragmentos de bosque, huertos, etc), y el porcentaje de construcción como la superficie de suelo cubiertas por estructuras de construcción que se alzan verticalmente sobre el suelo. Las coordenadas geográficas de los sitios, se ingresaron al programa ArcMap 10.8 (ESRI 2020), para realizar la estimación de los porcentajes de cobertura de la vegetación y construcción en un buffer de 50 metros para cada sitio de muestreo.

Abundancia de individuos:

La abundancia de los individuos por especie se estimó para cada uno de los 14 sitios. Utilizamos el método de conteo por puntos con radio variable (González-García 2011). Este método consistió en contar todos los individuos que se observaban por especie en cada sitio durante un periodo de 10 min sin límite de radio de observación. En cada conteo se utilizaron los mismos puntos dentro del sitio para hacer la estimación de abundancia, y los conteos se realizaban 10 minutos previos a comenzar la grabación de los cantos de los gorriones.

Análisis Estadísticos

Utilizamos Modelos Lineales Generalizados (GLM) para analizar una posible relación entre las variables acústicas del canto (duración del canto, número de sílabas del canto, tasa de sílabas, y diversidad silábica del canto) de cada especie de gorrión y las

variables de nivel de ruido, nivel porcentual de vegetación y abundancia de individuos. Previo al diseño de los modelos, realizamos pruebas de normalidad de Shapiro-Wilks, y comprobamos que nuestros datos carecían de una distribución normal ($P > 0.05$). También, realizamos una sustitución de los valores faltantes en nuestra base de datos, utilizando los métodos de interpolación lineal y de la media de la serie. Debido a que los valores originales tenían diferentes magnitudes y unidades de medida, todas las variables se estandarizaron a valores Z (es decir, se reescalaron con media =0 y DE =1). Realizamos GLMs segmentados para probar en las especies la relación entre las variables dependientes y los parámetros acústicos (i.e. duración del canto, número de sílabas del canto, tasa de sílabas, y diversidad silábica del canto), y los factores del ruido máximo, el porcentaje de vegetación y la abundancia de individuos por especie. Los GLM fueron modelos personalizados, con distribución normal y función de enlace identidad. Los modelos se construyeron con los efectos principales, y con estimación de máxima verosimilitud. Además, se comprobó con análisis de Kruskal-Wallis las diferencias en los niveles de ruido entre sitios, y las abundancias de individuos por especie entre sitios. También, se probaron con Kruskal-Wallis las diferencias en la duración del canto, número de sílabas del canto, tasa de sílabas, y diversidad silábica del canto entre especies de gorriones. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software SPSS 28.0 (IBM Corp 2021).

RESULTADOS

Características de los sitios

Encontramos que el ruido máximo promedio fue distinto entre los 14 sitios urbanos ($H=81.72$, $df=13$, $P < 0.0001$). El sitio con el menor promedio de ruido máximo fue el sitio Alba2, con un promedio de $55.89 \text{ dB} \pm 2.19$ (Figura 2). Mientras que, el mayor nivel de ruido máximo lo encontramos en el sitio PN, donde se alcanzaron niveles de hasta $80.39 \text{ dB} \pm 8.25$ (Figura 2). Por otro lado, el porcentaje de vegetación también fue distinto entre sitios; y al menos en 5 sitios los niveles más altos de ruido coincidieron con los niveles de porcentaje de vegetación más bajos. Solo tres sitios presentaron un

porcentaje de cobertura vegetal mayor al 25%, mientras que 8 sitios tuvieron porcentajes de cobertura vegetal menores al 5%.

El gorrión doméstico fue la especie más abundante ($x = 8.08 \pm 6.28$ individuos por sitio), seguida por el gorrión chingolo (4.87 ± 3.37 individuos/sitio), y el gorrión mexicano fue el menos abundante ($x = 2.62 \pm 4.02$ individuos/sitio). Aunque las tres especies ocurrieron en los 14 sitios de estudio, sus distribuciones de abundancias variaron entre sitios para cada especie (Figura 3). La abundancia del gorrión mexicano presentó variación entre sitios ($H = 84.18$, $df=13$, $P < 0.0001$), así también la del gorrión chingolo ($H = 56.22$, $df=13$, $P < 0.0001$) y el gorrión doméstico ($H = 82.98$, $df=13$, $P < 0.0001$).

Características del canto

Las cuatro características del canto estudiadas (duración, número de sílabas, tasa de sílabas y diversidad silábica) variaron entre las tres especies de gorriones. El gorrión mexicano presentó valores de la duración del canto y número de sílabas más altos que los de las otras dos especies (Tabla 1). El gorrión doméstico presentó los valores más altos tanto en tasa de sílabas como en diversidad silábica (Tabla 1). Por otra parte, el gorrión chingolo tuvo los menores valores de tasa de sílabas y diversidad silábica de las tres especies (Tabla 1).

La duración del canto fue diferente entre las tres especies de gorriones ($H = 1042.31$, $df=2$, $P < 0.001$) (Tabla 1). El gorrión mexicano tuvo en promedio el canto de mayor duración, y el gorrión doméstico el canto más corto (Tabla 1). También, el número de sílabas fue diferente entre las tres especies de gorriones ($H = 1137.16$, $df=2$, $P < 0.001$), y el gorrión mexicano fue el que tuvo en promedio el mayor número de sílabas por canto (Tabla 1). Encontramos diferencias entre la tasa de sílabas de las tres especies de gorriones ($H = 837.25$, $df=2$, $P < 0.001$), y el gorrión doméstico fue el que tuvo la mayor tasa de sílabas promedio (Tabla 1). En cuanto a la diversidad silábica las tres especies difirieron entre sí ($H = 849.14$, $df=2$, $P < 0.001$).

Relación de los parámetros del canto de los gorriones y las variables de nivel de ruido, porcentaje de cobertura de la vegetación y abundancia de individuos

Las características de los cantos de cada especie de gorrión se relacionaron de distinta forma con el nivel de ruido máximo, el porcentaje de cobertura de la vegetación y la abundancia de individuos. No encontramos una relación entre la duración del canto del gorrión mexicano con ninguno de los parámetros medidos (Tabla 2). Por otro lado, la duración del canto del gorrión chingolo se relacionó negativamente con el porcentaje de cobertura de la vegetación (Tabla 2). De la misma forma, la duración del canto del gorrión doméstico se relacionó negativamente con porcentaje de cobertura de la vegetación y con el nivel de ruido (Tabla 2).

El número de sílabas del gorrión mexicano se relacionó positivamente con el ruido máximo (Tabla 3). No encontramos ninguna relación significativa entre la duración del canto y las covariables del estudio para el gorrión chingolo y el gorrión doméstico (Tabla 3).

La tasa de sílabas del gorrión mexicano se relacionó positivamente con el nivel de ruido (Tabla 4), y con la abundancia de conoespecíficos (Tabla 4). Sin embargo, encontramos una relación negativa entre su tasa de sílabas y el porcentaje de vegetación (Tabla 4), y también con la abundancia del gorrión doméstico (Tabla 4). En el caso del gorrión doméstico su tasa de sílabas se relacionó negativamente con la abundancia del gorrión mexicano (Tabla 4). Además, la tasa de sílabas del gorrión doméstico se relacionó positivamente con el porcentaje de cobertura de la vegetación (Tabla 4). El gorrión chingolo no presentó ninguna relación significativa entre su tasa de sílabas y las variables del modelo (Tabla 4).

Encontramos relación entre la diversidad silábica y las variables del estudio para el gorrión mexicano y chingolo, pero no para el gorrión doméstico (Tabla 5). La diversidad silábica del gorrión mexicano se relacionó negativamente con el nivel de ruido (Tabla 5). Mientras que, la diversidad silábica del gorrión chingolo se relacionó

negativamente con el porcentaje de cobertura de la vegetación (Tabla 5), pero no se relacionó con el nivel de ruido (Tabla 5). Encontramos que la diversidad silábica del chingolo se relacionó positivamente con la abundancia de conespecíficos (Tabla 5) y con la abundancia del gorrión mexicano (Tabla 5), pero negativamente con la abundancia del gorrión doméstico (Tabla 5).

DISCUSIÓN

Duración del canto

Las características del canto de cada especie de gorrión mostraron distintas relaciones con el nivel de ruido, el porcentaje de cobertura de la vegetación y la abundancia de individuos. Por ejemplo, encontramos que la duración del canto del gorrión doméstico se relacionó negativamente con el nivel de ruido. Es decir, los cantos de este gorrión fueron más cortos en sitios con mayor cantidad de ruido urbano, justo de acuerdo con nuestras predicciones. Previamente se ha comprobado que en ambientes urbanos ruidosos las aves tienen cantos significativamente más cortos y con menor cantidad de sílabas (Nemeth y Brumm 2009; Winandy et al. 2021). En otros casos, las aves pueden aumentar la duración y la tasa de sus cantos o de sus llamados al aumentar el nivel de ruido (Potash 1972; Jouventin et al. 1999; Ríos-Chelén et al. 2013). Especies como el mosquero cardenal (*Pyrocephalus rubinus*) producen cantos más largos en sitios con alto nivel de ruido (Ríos-Chelén et al. 2013). Una explicación del por qué las aves cantan con mayor duración es que esto podría promover que sus cantos sean más fáciles de escuchar en sitios ruidosos. Aumentar la duración del canto en ocasiones puede incrementar la probabilidad de que el receptor detecte el canto en medio del ruido, o entre los intervalos de silencio en el ruido.

La duración del canto de los gorriones mexicano y chingolo no se relacionaron con el nivel de ruido máximo. Bermudez-Cuamatzin et al. (2009) tampoco encontraron una correlación entre la duración del canto del gorrión mexicano y el nivel de ruido. Sin, otro estudio encontró que el gorrión mexicano emite cantos con menor número de sílabas y más cortos en sitios más ruidosos (Fernández-Juricic et al. 2005).

Nuestra predicción sobre que la duración del canto de los gorriones se relacionaría positivamente al porcentaje de vegetación no se cumplió para ninguna especie. Por el contrario, encontramos que el gorrión chingolo y doméstico tienen cantos más cortos en sitios con mayor porcentaje de vegetación. Este resultado contradice la idea de que en hábitats más cerrados los cantos tienden a ser más largos (Handford and Loughheed 1991; Nemeth et al. 2006). Una posible explicación es que los cantos más cortos del gorrión chingolo, sean la consecuencia de disminuir su diversidad silábica por canto, ya que tanto su duración como diversidad silábica se relacionaron negativamente al porcentaje de vegetación (aunque previamente no encontramos correlación entre estas variables). En el gorrión doméstico, tener cantos más cortos puede deberse al aumento de su tasa de sílabas, ya que este gorrión tuvo cantos más rápidos relacionados a un mayor porcentaje de cobertura vegetal. Las vocalizaciones con mayor duración y más lentas (i.e. menor tasa de sílabas) se transmiten mejor en ambientes con altos porcentajes de vegetación (Slabbekoorn and den Boer-Visser 2006). Sin embargo, nuestros resultados con el gorrión doméstico y chingolo contradicen esta idea.

Nosotros no encontramos evidencia que apoyara nuestra predicción de una relación negativa entre la duración del canto de los gorriones y la abundancia conoespecífica y/o heteroespecífica. En el caso del gorrión mexicano, Fernández-Juricic et al. (2005), aunque no estimaron la abundancia, demostraron que ningún parámetro del canto era afectado por la presencia/ausencia de conoespecíficos. Probablemente la falta de relación entre la duración del canto del gorrión mexicano y la abundancia (conoespecífica y heteroespecífica) se deba a que es una especie poco territorial y su canto lo usa principalmente para atraer pareja y no para defender territorio. En otras especies de aves se ha determinado que la longitud del canto puede ser afectada por la abundancia de individuos (particularmente de machos) simpátricos. Por ejemplo, el ruiseñor (*Luscinia megarhynchos*) emite cantos más cortos o más largos al exponerlos a playbacks de cantos de diferentes aves heteroespecíficas, mientras que en alopatría no altera la duración de sus cantos (Brumm 2006). Además, los ruiseñores insertan sus cantos en los intervalos de silencio entre cantos de heteroespecíficos (Brumm 2006).

Modificar la duración del canto puede ser una estrategia que permita evitar la superposición acústica.

Número de sílabas por canto:

Solo para el gorrión mexicano encontramos una relación positiva entre el número de sílabas por canto y el nivel de ruido. En aves como el mosquero cardenal (*Pyrocephalus rubinus*), también, se demostró que tienen más elementos o sílabas de canto en sitios con alto nivel de ruido (Ríos-Chelén et al. 2013). Cantar con un mayor número de sílabas podría aumentar la probabilidad de que el ave sea escuchada por su receptor en medio del ruido urbano, y así evitar que su mensaje se pierda. En otros casos, se ha encontrado que algunas aves cantan menor cantidad de sílabas por canto en sitios urbanos ruidosos (Potvin et al. 2011), justo lo que esperábamos en nuestras predicciones. Para los gorriones chingolo y doméstico no encontramos que en nivel de ruido se relacionara con el número de sílabas por canto. Algo similar ocurre en los gorriones cantores (*Melospiza melodia*) ya que los niveles de ruido urbano tampoco afectaron el número de sílabas por canto (Wood y Yezerinac 2006).

En algunas especies los cantos con más elementos pueden ser percibidos por otros machos como señales más amenazadoras (Ríos-Chelén y Garcia 2007). Por ello esperábamos encontrar una relación positiva entre el número de sílabas y la abundancia de individuos. En ninguna especie de gorrión se encontró evidencia de que el número de sílabas se relacionara con la abundancia conoespecífica o heteroespecífica de individuos.

Tasa de sílabas:

Previamente se ha demostrado que la tasa silábica del canto se relaciona al nivel de ruido urbano (Slabbekoorn y den Boer-Visser 2006; Potvin et al. 2011). Únicamente el gorrión mexicano se ajustó a nuestra predicción de cantar con mayor tasa de sílabas a mayor nivel de ruido. Es decir, el gorrión mexicano tuvo cantos más rápidos en sitios ruidosos (por ejemplo), y esto a pesar de que la duración de su canto no se relacionó al nivel de ruido. Otras especies, como el carbonero común (*Parus major*), también emite

cantos más rápidos, y más cortos, en ciudades ruidosas (Slabbekorn y den Boer-Visser 2006). Por el contrario, especies como los silvereyes (*Zosterops lateralis*) disminuyen su tasa silábica en ambientes ruidosos, aunque su duración del canto no varía. Una hipótesis que explica el por qué de la variación de la tasa de sílabas, es que las construcciones y estructuras dentro de las ciudades pueden generar reverberaciones, que degradan y modifican los cantos (Job et al. 2016). Las reverberaciones pueden rellenar los huecos de silencio intersílabas del canto y hacer indistinguible una sílaba de otra. Por ello, los cantos con menos sílabas podrían ser una estrategia del gorrión mexicano para disminuir la probabilidad de sobrelapamiento acústico, debido al aumento del tamaño de los huecos inter-silábicos.

La tasa de sílabas del gorrión mexicano se relacionó negativamente al porcentaje de cobertura de la vegetación. Debido a que los porcentajes de cobertura de la vegetación y de construcción estuvieron correlacionados en nuestro estudio, podemos decir entonces que, la tasa de sílabas del gorrión mexicano fue mayor en sitios con mayor porcentaje de construcción. Los cantos con mayor tasa silábica significan que las aves tienen mayor cantidad de sílabas por segundo. Si el ave emite cantos con más sílabas por segundo los espacios inter-sílabas se acortan, haciendo sus cantos más propensos a ser sobrelapados por reverberaciones de las construcciones y el ruido urbano. Por otro lado, el gorrión doméstico tuvo cantos con mayor tasa de sílabas en sitios con mayores porcentajes de cobertura de la vegetación. Es decir, en sitios con mayor porcentaje de construcción sus cantos tienen menor tasa de sílabas. Otras especies de aves tienen menor tasa de canto (aunque no se comprobó si de sílabas también) al aumentar la estructura urbana (Job et al. 2016).

La tasa de sílabas del canto del gorrión mexicano se relacionó positivamente con la abundancia de individuos. Podría ser, en parte, que vocalizar al mismo tiempo con muchos individuos de su misma especie motivó al gorrión a vocalizar a mayor tasa (más intensamente), como posible consecuencia por la competencia por la dimensión acústica. Algunas aves macho aumentan la tasa de trino en contextos de agresión

(DuBois et al. 2009), por lo que el aumento de la tasa de sílabas también podría tratarse de una forma de mostrar un mayor grado de agresión.

Por otra parte, los cantos del gorrión mexicano tuvieron menor tasa de sílabas a mayor abundancia del gorrión doméstico, y los gorriones domésticos tuvieron cantos con menor tasa de sílabas a mayor abundancia del gorrión mexicano (i.e. ambas especies tuvieron cantos más lentos a mayor abundancia del heteroespecífico opuesto). La disminución de la tasa de canto podría ser una estrategia de ambos gorriones, para mejorar la transmisión de sus cantos en sitios con gran abundancia de heteroespecíficos.

Diversidad silábica:

El gorrión mexicano se ajustó a nuestra predicción de cantar con menor diversidad silábica a mayor nivel de ruido, es decir, está cantando sílabas más repetidas o con poca variación a mayor nivel de ruido. Otras aves como los pinzones (*Fringilla coelebs*), emiten cantos más redundantes en sitios con altos niveles de ruido (Brumm y Slater 2006). Nosotros no analizamos la redundancia como tal, aunque la diversidad silábica por canto puede indicarnos si el ave está cantando con mayor o menor redundancia un mismo tipo de sílabas. Repetir muchas veces un canto o secciones del canto antes de pasar a otro tipo puede incrementar la probabilidad de que la señal se transmita de forma exitosa (Brumm y Slater 2006). Los ambientes más ruidosos pueden promover que algunas aves tengan vocalizaciones más repetitivas y menos diversas en términos de cantidad de diferentes tipos de sílabas o cantos (Brumm y Slater 2006; Winandy et al. 2021), y esto ayudaría a la identificación y percepción del canto por parte de los receptores.

Contrario a nuestra predicción, la diversidad silábica del gorrión chingolo se relacionó negativamente con el porcentaje de cobertura de la vegetación. Previamente, se ha visto una relación entre la diversidad de sílabas del canto de las aves y la densidad de la vegetación (Hill et al. 2013; Hill et al. 2017). Por ejemplo, Hill et al. (2013) al analizar dos subespecies de tui (*Prosthemadera novaeseelandiae*), encontraron que aquellas

aves viviendo en islas con vegetación más densa cantan con una diversidad silábica menor que sus congéneres viviendo en sitios con vegetación más abierta y en tierra firme. Por el contrario, Hill et al. (2017) demostraron que los tui cantan con mayor diversidad silábica en sitios con mayor densidad de vegetación. Una hipótesis que podría explicar por qué ocurre esto es que, los ambientes con vegetación más densa tienen más y mejores recursos alimenticios, lo que permite a las aves tener un mejor estado nutricional (Hill et al. 2017). Un estado nutricional óptimo promueve un mejor desarrollo del centro vocal alto (HVC), el cual se relaciona con la capacidad de producir cantos complejos en las aves (Hill et al. 2017)

Algunos autores proponen que una mayor diversidad silábica puede deberse a la mayor abundancia de vecinos conespecíficos (Hamao and Ueda 2000; Hill et al. 2013; Hill et al. 2017), y esta mayor abundancia promueve mayores niveles de competencia con otros machos por recursos (como alimento o pareja). Precisamente, para el gorrión chingolo encontramos que su diversidad silábica se relacionó a la abundancia de conespecíficos, así como con la abundancia del gorrión mexicano. Por otro lado, encontramos que el gorrión chingolo tuvo menor diversidad silábica a mayor abundancia del gorrión doméstico (i.e. está emitiendo cantos más redundantes y predecibles). En algunas especies, compartir un ambiente con una alta densidad de individuos puede promover tener cantos más redundantes. Los pingüinos rey (*Aptenodytes patagonicus*) que viven en colonias densamente pobladas y expuestos a gran cantidad de ruido por viento, emiten cantos con características temporales y de frecuencia altamente redundantes (Jouventin et al. 1999). Repetir la misma información o las mismas sílabas muchas veces, aumenta la posibilidad de encontrar una ventana de silencio para que el pingüino rey transmita su llamado. Esto promueve que, su polluelo lo escuche, evitando la confusión con los llamados de otros individuos así como el ruido del viento (Jouventin et al. 1999). Los cantos con menor diversidad silábica pueden ser una estrategia para emitir cantos más redundantes, y que sean más distinguibles entre el resto de aves cantando en simpatria.

Conclusiones

Las características del canto de cada especie de gorrión se relacionaron de distinta forma al nivel de ruido, porcentaje de cobertura de la vegetación y abundancias conoespecífica y heteroespecífica. A pesar de ser especies con cantos fonética y estructuralmente muy diferentes, en algunos casos sus características del canto se relacionaron de forma similar con las mismas variables. En general, el gorrión mexicano fue la especie cuyas variaciones de las características del canto se lograron explicar mejor por las variables del estudio. En el gorrión mexicano encontramos que tres de cuatro características de su canto analizadas se relacionaron con el nivel de ruido, y esto podría indicarnos una mayor sensibilidad a dicha variable. Para el gorrión chingolo el porcentaje de cobertura de la vegetación fue la variable que se relacionó con más características de su canto (diversidad silábica y duración del canto), esto podría indicarnos la importancia del factor vegetación sobre la estructura temporal de su canto. Además, la diversidad silábica del gorrión chingolo se relacionó con casi todas las variables, y resultaría interesante estudiar en un futuro el significado biológico de esta característica del canto para la especie. En el caso del gorrión doméstico, el porcentaje de cobertura de la vegetación se relacionó con más características de su canto que el resto de las variables. Por tanto, la porcentaje de cobertura de la vegetación puede ser importante para la caracterización del canto de esta especie.

Las relaciones encontradas entre las características del canto de estas tres especies de gorriones y las variables del estudio demuestran cómo distintos factores ambientales se relacionan en la forma de vocalizar de los gorriones urbanos. Son necesarios más estudios que nos permitan comprender el impacto de las características de sitios urbanos sobre la forma de vocalizar de distintas especies de aves, para poder plantear alternativas que promuevan el mantenimiento de las redes de comunicación acústica de las aves urbanas.

LITERATURA CITADA

- Bermúdez-Cuamatzin E, Ríos-Chelén AA, Gil D, Garcia CM. 2010. Experimental evidence for real-time song frequency shift in response to urban noise in a passerine bird. *Biol Lett.* 7(1):36–38. doi:10.1098/rsbl.2010.0437.
- Bermúdez-Cuamatzin E, Ríos-Chelén AA, Gil D, Garcia CM. 2009. Strategies of song adaptation to urban noise in the house finch: Syllable pitch plasticity or differential syllable use? *Behaviour.* 146(9):1269–1286. doi:10.1163/156853909X423104.
- Brumm H. 2006. Signalling through acoustic windows: nightingales avoid interspecific competition by short-term adjustment of song timing. *J Comp Physiol A.* 192:1279–1285. doi:DOI 10.1007/s00359-006-0158-x. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00359-006-0158-x>.
- Brumm H, Slater PJB. 2006a. Ambient noise, motor fatigue, and serial redundancy in chaffinch song. *Behav Ecol Sociobiol.* 60(4):475–481. doi:10.1007/s00265-006-0188-y.
- Brumm H, Slater PJB. 2006b. Ambient noise, motor fatigue, and serial redundancy in chaffinch song. *Behav Ecol Sociobiol.* 60(4):475–481. doi:10.1007/s00265-006-0188-y.
- Bueno-Enciso J, Ferrer ES, Barrientos R, Sanz JJ. 2016. Habitat structure influences the song characteristics within a population of Great Tits *Parus major*. *Bird Study.* 63(3):359–368. doi:10.1080/00063657.2016.1212812.
- DataMÉXICO BETA. 2020. San Cristóbal de las Casas, Municipio de Chiapas. Acerca de San Cristóbal de las Casas. [accessed 2022 Aug 8]. <https://datamexico.org/es/profile/geo/san-cristobal-de-las-casas>.
- van Dongen WFD, Mulder RA. 2006. Habitat density, song structure and dialects in the Madagascar paradise flycatcher *Terpsiphone mutata*. *J Avian Biol.* 37(4):349–356. doi:10.1111/j.2006.0908-8857.03578.x.
- DuBois AL, Nowicki S, Searcy WA. 2009. Swamp sparrows modulate vocal performance in an aggressive context. *Biol Lett.* 5(2):163–165. doi:10.1098/rsbl.2008.0626.
- Fernández-Juricic E, Poston R, de Collibus K, Morgan T, Bastain B, Martin C, Jones K, Treminio R. 2005. Microhabitat selection and singing behavior patterns of male house finches (*Carpodacus mexicanus*) in urban parks in a heavily urbanized landscape in the western U.S. *Urban Habitats.* 3(1):49–69. http://www.urbanhabitats.org/v03n01/finch_pdf.pdf.
- Fuller RA, Warren PH, Gaston KJ. 2007. Daytime noise predicts nocturnal singing in urban robins. *Biol Lett.* 3(4):368–370. doi:10.1098/rsbl.2007.0134.
- González-García F. 2011. Métodos para contar aves terrestres. In: Gallina-Tessaro S, López-González C, editors. *Manual de Técnicas para el estudio de la Fauna.* Vol. 1. 1st ed. Querétaro, México: Universidad Autónoma de Querétaro-Instituto de Ecología, A.C. p. 95–99.
- Goretskaia MI. 2004. Song structure and singing behaviour of willow warbler *Phylloscopus trochilus acredula* in populations of low and high density. *Bioacoustics.* 14(3):183–195. doi:10.1080/09524622.2004.9753524.
- Hamao S, Ueda K. 2000. Simplified song in an island population of the bush warbler *Cettia diphone*. *J Ethol.* 18:53–57. doi:<https://doi.org/10.1007/s101640070025>.

- Hamao S, Watanabe M, Mori Y. 2011. Urban noise and male density affect songs in the great tit *Parus major*. *Ethol Ecol Evol.* 23(2):111–119. doi:10.1080/03949370.2011.554881.
- Handford P. 1981. Vegetational correlates of variation in the song of *Zonotrichia capensis*. *Behav Ecol Sociobiol.* 8(3):203–206. doi:10.1007/BF00299831.
- Handford P, Loughheed SC. 1991. Variation in duration and frequency characters in the song of the rufous-collared sparrow, *Zonotrichia capensis*, with respect to habitat, trill dialects and body size. *Condor.* 93(3):644–658. doi:10.2307/1368196.
- Henry KS, Lucas JR. 2008. Coevolution of auditory sensitivity and temporal resolution with acoustic signal space in three songbirds. *Anim Behav.* 76(5):1659–1671. doi:10.1016/j.anbehav.2008.08.003.
- Hill S, Pawley M, Ji W. 2017. Local habitat complexity correlates with song complexity in a vocally elaborate honeyeater. *Austral Ecol.* 42(5):590–596. doi:10.1111/aec.12477.
- Hill SD, Ji W, Parker K, Amiot C, Wells S, Parker K. 2013. A comparison of vocalisations between mainland tui (*Prothemadera novaeseelandiae novaeseelandiae*) and Chatham Island tui (*P. n. chathamensis*). *N Z J Ecol.* 37(2):214–223. <http://www.newzealandecology.org/nzje/>.
- INEGI. 2017. Anuario estadístico y geográfico de Chiapas 2017. México: INEGI.
- Job JR, Kohler SL, Gill SA. 2016. Song adjustments by an open habitat bird to anthropogenic noise, urban structure, and vegetation. *Behavioral Ecology.* 27:arw105. doi:10.1093/beheco/arw105.
- Jouventin P, Aubin T, Lengagne T. 1999. Finding a parent in a king penguin colony: the acoustic system of individual recognition. *Anim Behav.* 57:1175–1183. <http://www.idealibrary.comon>.
- Kirschel ANG, Blumstein DT, Smith TB. 2009. Character displacement of song and morphology in African tinkerbirds. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 106(20):8256–8261. doi:10.1073/pnas.0810124106.
- Laiolo P. 2011. The rufous-collared sparrow *Zonotrichia capensis* utters higher frequency songs in urban habitats. *Revista Catalana d'Ornitologia.* 27:25–30. http://www.ornitologia.org/ca/queoferim/divulgacio/publicacions/rco/27_25_30.pdf
- Lengagne T, Aubin T, Lauga J, Jouventin P. 1999. How do king penguins (*Aptenodytes patagonicus*) apply the mathematical theory of information to communicate in windy conditions? (April):1623–1628.
- Loughheed SC, Campagna L, Dávila JA, Tubaro PL, Lijtmaer DA, Handford P. 2013. Continental phylogeography of an ecologically and morphologically diverse Neotropical songbird, *Zonotrichia capensis*. *BMC Evol Biol.* 13(58):1–15. doi:10.1186/1471-2148-13-58. https://www.researchgate.net/publication/235774005_Continental_phylogeography_of_an_ecologically_and_morphologically_diverse_Neotropical_songbird_Zonotrichia_capensis.
- Luther DA, Wiley RH. 2009. Production and perception of communicatory signals in a noisy environment. *Biol Lett.* 5(2):183–187. doi:10.1098/rsbl.2008.0733.
- Mendes S, Colino-Rabanal VJ, Peris SJ. 2011. Changes in the vocalization of the Southern House Wren (*Troglodytes musculus*) in environments with different levels of human disturbance. *Hornero.* 26(2):85–93.

- Mendes S, Colino-Rabanal VJ, Peris SJ. 2017. Adaptación acústica del canto de *Turdus leucomelas* (Passeriformes: *Turdidae*) a diferentes niveles de ruido antrópico, en el área metropolitana de Belém, Pará, Brasil. *Rev Biol Trop.* 65(2):633–642. doi:10.15517/rbt.v65i2.25721.
- Mockford EJ, Marshall RC. 2009. Effects of urban noise on song and response behaviour in great tits. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences.* 276(1669):2979–2985. doi:10.1098/rspb.2009.0586.
- Mockford EJ, Marshall RC, Dabelsteen T. 2011. Degradation of rural and urban great tit song: Testing transmission efficiency. *PLoS One.* 6(12). doi:10.1371/journal.pone.0028242.
- Mundinger P. 1975. Song dialects and colonization in the house finch, *Carpodacus mexicanus*, on the east coast. *Condor.* 77(4):407. doi:10.2307/1366088.
- Naguib M. 2003. Reverberation of rapid and slow trills: Implications for signal adaptations to long-range communication. *J Acoust Soc Am.* 113(3):1749–1756. doi:10.1121/1.1539050.
- Nemeth E, Brumm H. 2009. Blackbirds sing higher-pitched songs in cities: adaptation to habitat acoustics or side-effect of urbanization? *Anim Behav.* 78(3):637–641. doi:10.1016/j.anbehav.2009.06.016.
- Nemeth E, Dabelsteen T, Pedersen SB, Winkler H. 2006. Rainforests as concert halls for birds: Are reverberations improving sound transmission of long song elements? *J Acoust Soc Am.* 119(1):620–626. doi:10.1121/1.2139072.
- Nottebohm F. 1969. The song of the chingolo, *Zonotrichia capensis*, in Argentina: description and evaluation of a system of dialects. *Condor.* 71(3):299–315. doi:DOI: 10.2307/1366306.
- Nottebohm F. 1975. Continental patterns of song variability in *Zonotrichia capensis*: some possible ecological correlates. *Am Nat.* 109(970):605–624. doi:10.1086/283033.
- Polak M. 2014. Relationship between traffic noise levels and song perch height in a common passerine bird. *Transp Res D Transp Environ.* 30:72–75. doi:10.1016/j.trd.2014.05.004.
- Potash L. 1972. Noise induced changes in calls of the Japanese quail. *Psychon Sci.* 26(5):252–254.
- Potvin A, Parris K, Mulder R. 2011. Geographically pervasive effects of urban noise on frequency and syllable rate of songs and calls in silvereyes (*Zosterops lateralis*). *Proc R Soc B.* 278(1717):2464–2469. doi:10.1098/rspb.2010.2296.
- Rheindt FE. 2003. The impact of roads on birds: Does Song frequency play a role in determining susceptibility to noise pollution? *J Ornithol.* 144:295–306. doi:https://doi.org/10.1007/BF02465629. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02465629#citeas>.
- Ríos-Chelén AA, García CM. 2007. Responses of a sub-oscine bird during playback: Effects of different song variants and breeding period. *Behavioural Processes.* 74(3):319–325. doi:10.1016/j.beproc.2006.11.007.
- Ríos-Chelén AA, Quirós-Guerrero E, Gil D, Macías García C. 2013. Dealing with urban noise: Vermilion flycatchers sing longer songs in noisier territories. *Behav Ecol Sociobiol.* 67(1):145–152. doi:10.1007/s00265-012-1434-0.
- Slabbekoorn H, den Boer-Visser A. 2006. Cities change the songs of birds. *Current Biology.* 16(23):2326–2331. doi:10.1016/j.cub.2006.10.008.

- Slabbekoorn H, Yeh P, Hunt K. 2007. Sound transmission and song divergence: a comparison of urban and forest acoustics. *Condor*. 109(1):67–78. doi:10.1093/condor/109.1.67.
- Tracy TT, Baker MC. 1999. Geographic variation in syllables of house finch songs. *Auk*. 116(3):666–676. <https://academic.oup.com/auk/article/116/3/666/5172336>.
- Tubaro PL, Segura ET, Handford P. 1993. Geographic variation in the song of the rufous-collared sparrow in eastern Argentina. *Condor*. 95(3):588–595. doi:10.2307/1369603.
- Winandy G, Félix R, Sacramento R, Rilquer M, Batalha-Filho H, Japyassú, Hilton, Izar P, Slabbekoorn H. 2021. Urban Noise Restricts Song Frequency Bandwidth and Syllable Diversity in Bananaquits: Increasing Audibility at the Expense of Signal Quality. *Front Ecol Evol*. 9(570420):1–11. doi:10.3389/fevo.2021.570420.
- Wood W, Yezerinac S. 2006. Song Sparrow (*Melospiza melodia*) song varies with urban noise. *Auk*. 123(3):650–659. doi:10.1642/0004-8038(2006)123[650:SSMMSV]2.0.CO;2.

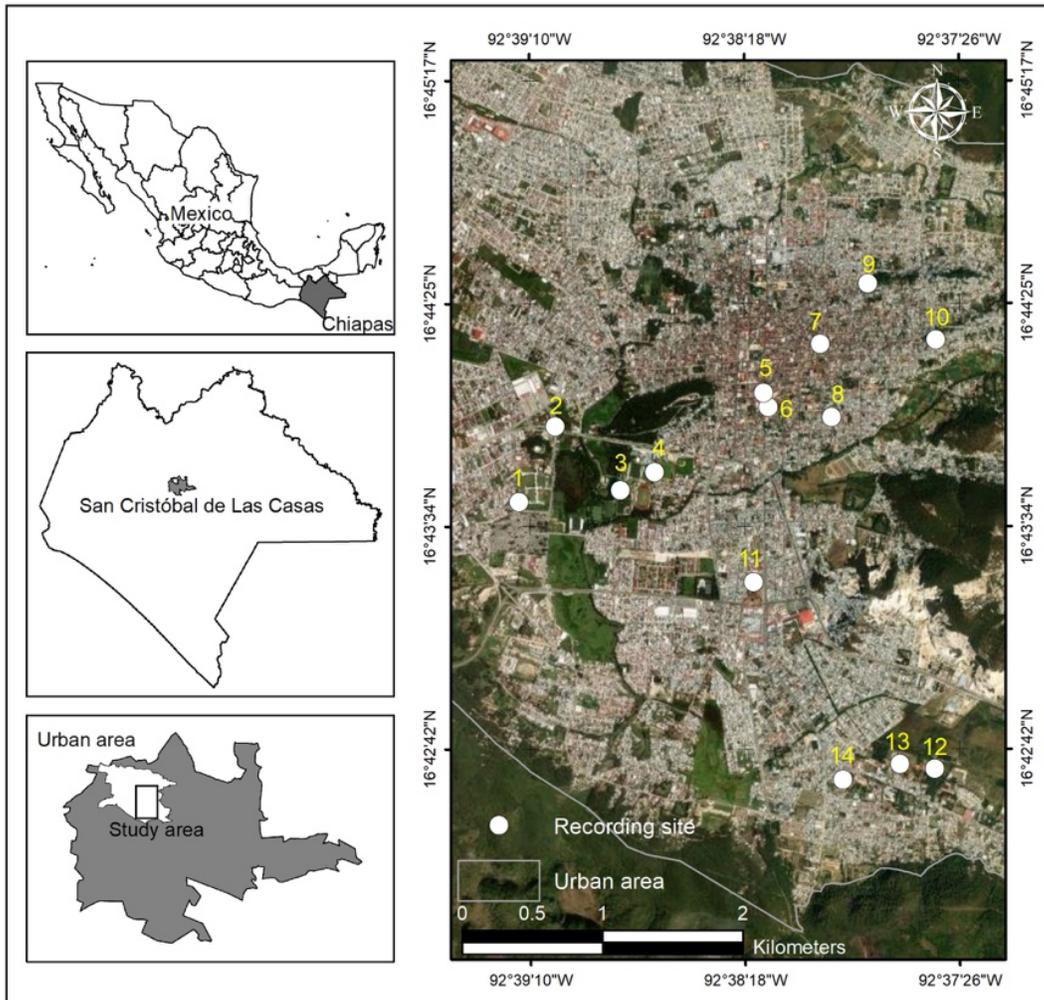


Figura 1. Mapa de los sitios de grabación en San Cristóbal de las Casas, Chiapas. Los puntos blancos son los 14 sitios donde grabamos los cantos del gorrión mexicano (*Haemorhous mexicanus*), chingolo (*Zonotrichia capensis*) y doméstico (*Passer domesticus*) de Febrero a Abril del 2021.

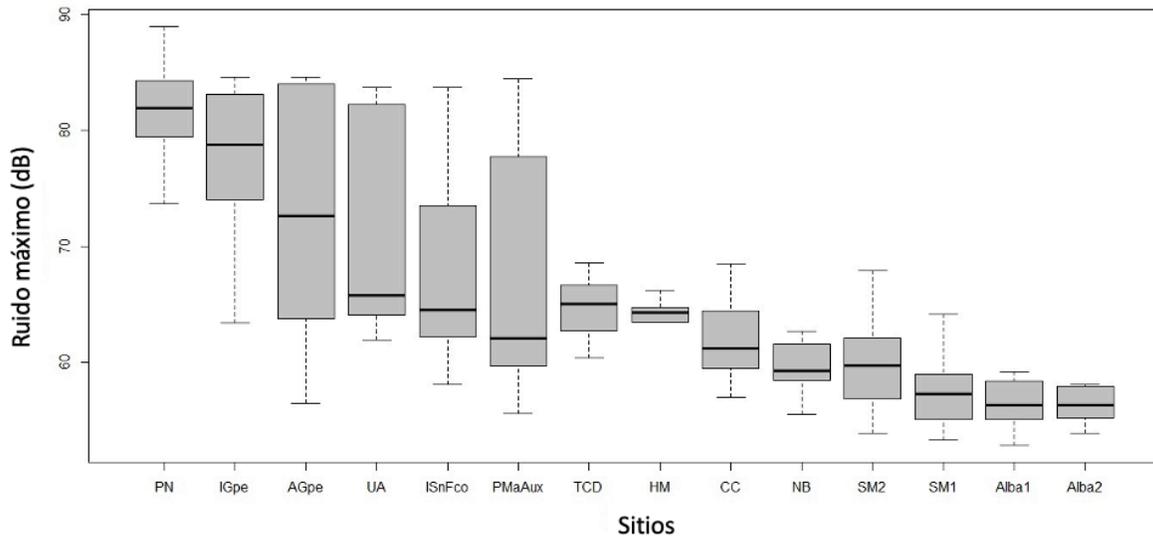


Figura 2. Nivel de ruido máximo (dB) promedio en 14 sitios urbanos de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas (Febrero a Abril del 2021).

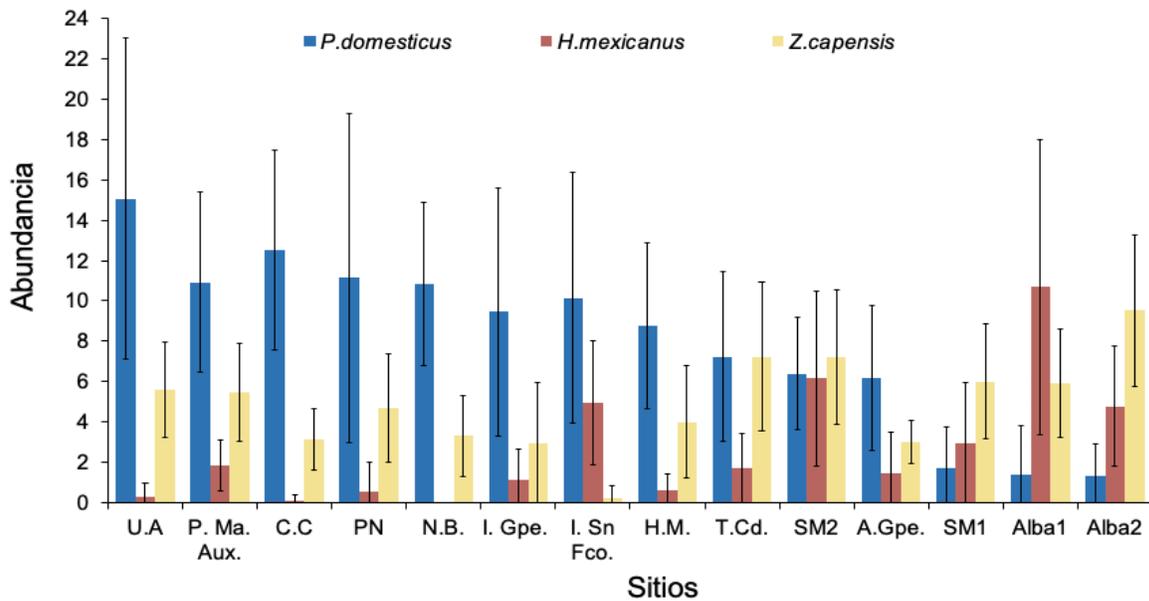


Figura 3. Distribución de las medias de la abundancia de *Haemorhous mexicanus*, *Zonotrichia capensis* y *Passer domesticus* en 14 sitios de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas (Febrero a Abril del 2021).

Tabla 1. Características del canto de tres especies de gorriones simpátricos en sitios urbanos de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, Febrero-Abril 2021 (promedio= \bar{x} , desviación estándar= SD).

<i>Especies</i>	Duración (s)		Número de sílabas por canto		Tasa de sílabas		Diversidad silábica por canto	
	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD
<i>Haemorhous mexicanus</i>	3.12	0.51	18.22	3.22	5.98	0.48	0.84	0.04
<i>Zonotrichia capensis</i>	1.36	0.10	3.89	0.60	2.84	0.33	0.76	0.08
<i>Passer domesticus</i>	0.15	0.02	1.76	0.34	12.05	1.52	0.98	0.02

Tabla 2. Duración del canto de tres especies de gorriones y los parámetros de ruido máximo, porcentaje de cobertura de la vegetación y abundancia de las tres especies, en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, Febrero-Abril 2021 (B = distribución beta, representa el cambio por unidad de x).

Variable dependiente	Variable explicativa	B	95% Intervalo de confianza de Wald		P -valor
			inferior	superior	
Duración del canto de <i>Haemorhous mexicanus</i>	Ruido máximo	-0.101	-0.210	0.008	0.069
	Porcentaje de cobertura de la vegetación	-0.094	-0.205	0.017	0.097
	Abundancia del <i>Haemorhous mexicanus</i>	-0.100	-0.252	0.052	0.197
	Abundancia del <i>Passer domesticus</i>	0.081	-0.009	0.170	0.078
	Abundancia del <i>Zonotrichia capensis</i>	-0.030	-0.183	0.124	0.703
Duración del canto de <i>Zonotrichia capensis</i>	Ruido máximo	-0.010	-0.028	0.007	0.232
	Porcentaje de cobertura de la vegetación	-0.035	-0.052	-0.018	<0.001
	Abundancia del <i>Zonotrichia capensis</i>	0.009	-0.019	0.036	0.538
	Abundancia del <i>Haemorhous mexicanus</i>	-0.006	-0.031	0.020	0.666
	Abundancia del <i>Passer domesticus</i>	-0.003	-0.015	0.009	0.626
Duración del canto de <i>Passer domesticus</i>	Ruido máximo	-0.004	-0.006	-0.001	0.004
	Porcentaje de cobertura de la vegetación	-0.010	-0.012	-0.007	<0.001
	Abundancia del <i>Passer domesticus</i>	-0.001	-0.003	0.001	0.410
	Abundancia del <i>Haemorhous mexicanus</i>	0.003	-0.001	0.007	0.119
	Abundancia del <i>Zonotrichia capensis</i>	-0.003	-0.007	0.000	0.074

Tabla 3. Número de sílabas del canto de tres especies de gorriones y los parámetros de ruido máximo, porcentaje de cobertura de la vegetación y abundancia de las tres especies, en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, Febrero-Abril 2021 (B = distribución beta, representa el cambio por unidad de x).

Variable dependiente	Variable explicativa	B	95% Intervalo de confianza de Wald		P -valor
			inferior	superior	
Número de sílabas por canto de <i>Haemorhous mexicanus</i>	Ruido máximo	0.103	-0.202	-0.005	0.04
	Porcentaje de cobertura de la vegetación	-0.073	-0.173	0.028	0.156
	Abundancia del <i>Haemorhous mexicanus</i>	-0.093	-0.230	0.044	0.185
	Abundancia del <i>Passer domesticus</i>	0.027	-0.054	0.108	0.510
	Abundancia del <i>Zonotrichia capensis</i>	0.039	-0.100	0.178	0.584
Número de sílabas por canto de <i>Zonotrichia capensis</i>	Ruido máximo	-0.012	-0.033	0.009	0.260
	Porcentaje de cobertura de la vegetación	-0.018	-0.039	0.003	0.100
	Abundancia del <i>Zonotrichia capensis</i>	0.008	-0.025	0.042	0.631
	Abundancia del <i>Haemorhous mexicanus</i>	0.005	-0.027	0.036	0.770
	Abundancia del <i>Passer domesticus</i>	-0.002	-0.016	0.013	0.827
Número de sílabas por canto de <i>Passer domesticus</i>	Ruido máximo	-0.003	-0.007	0.001	0.137
	Porcentaje de cobertura de la vegetación	0.001	-0.002	0.005	0.439
	Abundancia del <i>Passer domesticus</i>	0.002	-0.001	0.005	0.179
	Abundancia del <i>Haemorhous mexicanus</i>	-0.005	-0.027	0.036	0.116
	Abundancia del <i>Zonotrichia capensis</i>	-0.004	-0.010	0.001	0.097

Tabla 4. Tasa de sílabas del canto de tres especies de gorriones y los parámetros de ruido máximo, porcentaje de cobertura de la vegetación y abundancia de las tres especies, en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, Febrero-Abril 2021 (B = distribución beta, representa el cambio por unidad de x).

Variable dependiente	Variable explicativa	B	95% Intervalo de confianza de Wald		P -valor
			inferior	superior	
Tasa de sílabas del canto de <i>Haemorhous mexicanus</i>	Ruido máximo	0.140	0.054	0.226	0.001
	Porcentaje de cobertura de la vegetación	-0.134	-0.221	-0.046	0.003
	Abundancia del <i>Haemorhous mexicanus</i>	0.182	0.063	0.302	0.003
	Abundancia del <i>Passer domesticus</i>	-0.119	-0.190	-0.049	<0.001
	Abundancia del <i>Zonotrichia capensis</i>	0.073	-0.049	0.194	0.240
Tasa de sílabas del canto de <i>Zonotrichia capensis</i>	Ruido máximo	-0.014	-0.051	0.023	0.455
	Porcentaje de cobertura de la vegetación	0.004	-0.033	0.041	0.822
	Abundancia del <i>Zonotrichia capensis</i>	0.013	-0.046	0.072	0.656
	Abundancia del <i>Haemorhous mexicanus</i>	0.018	-0.037	0.073	0.515
	Abundancia del <i>Passer domesticus</i>	-0.004	-0.030	0.021	0.736
Tasa de sílabas del canto de <i>Passer domesticus</i>	Ruido máximo	0.030	-0.073	0.133	0.569
	Porcentaje de cobertura de la vegetación	0.239	0.139	0.340	<0.001
	Abundancia del <i>Passer domesticus</i>	0.048	-0.029	0.126	0.222
	Abundancia del <i>Haemorhous mexicanus</i>	-0.175	-0.328	-0.023	0.024
	Abundancia del <i>Zonotrichia capensis</i>	0.025	-0.112	0.163	0.718

Tabla 5. Diversidad silábica del canto de tres especies de gorriones y los parámetros de ruido máximo, porcentaje de cobertura de la vegetación y abundancia de las tres especies, en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, Febrero-Abril 2021 (B = distribución beta, representa el cambio por unidad de x).

Variable dependiente	Variable explicativa	B	95% Intervalo de confianza de Wald		P -valor
			inferior	superior	
Diversidad silábica por canto de <i>Haemorhous mexicanus</i>	Ruido máximo	-0.084	-0.163	-0.006	0.036
	Porcentaje de cobertura de la vegetación	-0.043	-0.123	0.037	0.291
	Abundancia del <i>Haemorhous mexicanus</i>	-0.103	-0.213	0.007	0.066
	Abundancia del <i>Passer domesticus</i>	0.035	-0.030	0.100	0.288
	Abundancia del <i>Zonotrichia capensis</i>	0.078	-0.033	0.189	0.169
Diversidad silábica por canto de <i>Zonotrichia capensis</i>	Ruido máximo	-0.001	-0.014	0.013	0.910
	Porcentaje de cobertura de la vegetación	-0.044	-0.057	-0.030	<0.001
	Abundancia del <i>Zonotrichia capensis</i>	0.085	0.063	0.107	<0.001
	Abundancia del <i>Haemorhous mexicanus</i>	0.058	0.038	0.078	<0.001
	Abundancia del <i>Passer domesticus</i>	-0.025	-0.035	-0.016	<0.001
Diversidad silábica por canto de <i>Passer domesticus</i>	Ruido máximo	-0.003	-0.007	0.001	0.196
	Porcentaje de cobertura de la vegetación	0.002	-0.002	0.006	0.319
	Abundancia del <i>Passer domesticus</i>	0.002	-0.001	0.005	0.206
	Abundancia del <i>Haemorhous mexicanus</i>	-0.005	-0.011	0.001	0.086
	Abundancia del <i>Zonotrichia capensis</i>	-0.004	-0.010	0.001	0.109

Capitulo 4

Conclusiones:

Nuestra primera conclusión es que cada especie de gorrión posee características diferentes de frecuencia (frecuencia pico y entropía) como temporales (duración, número de sílabas, tasa de sílabas y diversidad silábica) de sus cantos. Esta variación no solo es debido a la biología de las especies, ya que encontramos una relación entre las características de sus cantos con las variables ambientales y ecológicas que medimos en los sitios urbanos.

Debido a los antecedentes de que las aves pueden modificar sus parámetros de frecuencia del canto como consecuencia del ruido urbano, esperábamos que las tres especies de gorriones mostraran una relación entre sus características de frecuencia y el ruido. Encontramos que la entropía de los tres gorriones se relacionó con los niveles de ruido, pero no fue así con la frecuencia pico. Esto podría ser una pista sobre la importancia biológica que tiene la entropía para los tres gorriones, y de que las aves estudiadas podrían estar modificando su entropía del canto debido al ruido ambiental.

Al disminuir el valor de entropía se puede aumentar la tonalidad de un canto, y los cantos más tonales pueden transmitirse mejor en ambientes ruidosos. Por otra parte, el ruido se relacionó con tres de los parámetros temporales del gorrión mexicano (número de sílabas, tasa de sílabas y diversidad de sílabas) y un parámetro temporal del gorrión doméstico (duración). Entonces, el ruido parece ser un factor importante para los gorriones mexicano y doméstico al momento de determinar la estructura de sus cantos. Caso contrario, en el gorrión chingolo el ruido no parece estar asociado a la variación de los parámetros temporales de sus cantos. El ruido es posiblemente una de las variables que más estudios han demostrado que se relaciona con la variación y la modificación del canto de diferentes especies animales, y nosotros también encontramos evidencia para apoyar esta hipótesis. Por lo tanto, es necesario proponer medidas que promuevan la disminución de los elevados niveles de ruido de las actividades antropogénicas. Lo anterior con el fin de promover ambientes más amigables para la comunicación acústica de las aves urbanas, y que además

contribuyan a mantener la riqueza (número total de especies diferentes en una comunidad ecológica) y abundancia (número o frecuencia de individuos de la misma especie) de estas poblaciones de aves.

El porcentaje de cobertura de la vegetación se relacionó con los parámetros temporales del canto de los tres gorriones simpátricos, y solo los parámetros de frecuencia del gorrión doméstico. El porcentaje de cobertura de la vegetación podría ser una variable importante para que el gorrión doméstico module la estructura temporal y espectral de su canto, lo cual nos resulta interesante dado que es una especie que se ha establecido exitosamente en zonas sumamente urbanizadas con escasa vegetación. En futuros estudios podríamos analizar cómo la estructura y composición de la vegetación afectan las características del canto de estos gorriones simpátricos. Pero un hecho que no ponemos en duda es que la presencia y estructura de la vegetación pueden motivar la variación del canto de algunas especies de aves, por lo que mantener un determinado porcentaje de cobertura de la vegetación en las áreas urbanas podría promover una comunicación vocal mucho más eficiente.

La abundancia de individuos conespecíficos y heteroespecíficos se relacionaron principalmente con parámetros temporales del canto (tasa de sílabas y diversidad silábica), y en menor número de casos con los parámetros de frecuencia en los tres gorriones urbanos. Y fue la abundancia de heteroespecíficos la que se relacionó en más ocasiones con los parámetros temporales de los cantos de los gorriones simpátricos. Por lo tanto, es probable que la abundancia de otras especies con las que comparten el espacio acústico sea un factor con mayor relevancia a la hora de determinar sus características temporales del canto en comparación con la abundancia de su propia especie. Por otro lado, la abundancia de heteroespecíficos también se relacionó con la frecuencia pico del gorrión doméstico y con la entropía del gorrión mexicano. Es decir, el número de heteroespecíficos presentes en el ambiente podría potencialmente afectar la frecuencia y temporalidad de los cantos de los gorriones. Claro que para comprobar lo anterior, serían necesarios experimentos donde se ponga a prueba el efecto de la presencia/ausencia y abundancia de individuos sobre las

características de los cantos. Resulta interesante poder plantearnos la posibilidad de que las aves son capaces de modificar tan finamente cómo cantar a partir de la información que reciben del ambiente, como son los sonidos de otros individuos a su alrededor en el ambiente acústico.

Existen diversos factores en el ambiente que pueden afectar la forma en que las aves cantan. En este estudio pudimos probar cómo el ruido, el porcentaje de cobertura de la vegetación y la abundancia de individuos son variables que se relacionan de forma importante con los cantos de las tres especies de gorriones en ambientes urbanos. El estudio de la comunicación acústica de aves urbanas no solo permite comprender mejor los efectos de distintos factores antropogénicos sobre las vocalizaciones de estas aves, también ayuda a conocer y predecir las posibles consecuencias de un proceso de urbanización poco responsable con el ambiente. Además, al mismo tiempo nos permite proponer medidas para mejorar las condiciones en que las aves se comunican vocalmente. 1) Se podría establecer un porcentaje mínimo de cobertura de la vegetación y áreas verdes con vegetación local, que promueva la presencia y abundancia de especies de aves nativas, así como mejorar las condiciones de transmisión de sus vocalizaciones. 2) Decretar límites en la cantidad de ruido (dB) antropogénico, así como los horarios en los que las personas pueden emitir más y menos ruido; podría disminuir el impacto de los picos de ruido urbano sobre los picos de actividad vocal de las aves. 3) Reglamentar la forma, altura y tipo de materiales adecuados para las construcciones en las zonas urbanas, podría disminuir la cantidad de ecos y reverberaciones que afectan la estructura original del canto de las aves. Estas propuestas podrían promover un ambiente más amigable para la comunicación acústica de las aves, y en consecuencia otras de sus funciones biológicas como la reproducción.

Literatura citada:

- Anderson ME, Conner RN. 1985. Northern cardinal song in three forest habitats in eastern Texas. Source: *The Wilson Bulletin*. 97(4):436–449. [accessed 2022 May 15]. <http://www.jstor.org/stable/4162139>.
- Azar JF, Bell BD. 2016. Acoustic features within a forest bird community of native and introduced species in New Zealand. *Emu*. 116(1):22–31. doi:10.1071/MU14095.
- Berigan LA, Greig EI, Bonter DN. 2020. Urban House Sparrow (*Passer domesticus*) populations decline in North America. *Wilson J Ornithol*. 132(2):248–258. doi:10.1676/1559-4491-132.2.248.
- Bermúdez-Cuamatzin E, Ríos-Chelén AA, Gil D, Garcia CM. 2010. Experimental evidence for real-time song frequency shift in response to urban noise in a passerine bird. *Biol Lett*. 7(1):36–38. doi:10.1098/rsbl.2010.0437.
- Bermúdez-Cuamatzin E, Ríos-Chelén AA, Gil D, Garcia CM. 2009. Strategies of song adaptation to urban noise in the house finch: Syllable pitch plasticity or differential syllable use? *Behaviour*. 146(9):1269–1286. doi:10.1163/156853909X423104.
- Bitterbaum E, Baptista L. 1979. Geographical variation in songs of California House finches (*Carpodacus mexicanus*). *Auk*. 96(July):462–474. doi:10.1086/physzool.56.3.30152600. https://www.researchgate.net/publication/48803141_Seasonal_and_Geographic_Variation_of_Cold_Resistance_in_House_Finches_Carpodacus_mexicanus.
- Boncoraglio G, Saino N. 2007. Habitat structure and the evolution of bird song: a meta-analysis of the evidence for the acoustic adaptation hypothesis. *Funct Ecol*. 21(1):134–142. doi:10.1111/j.1365-2435.2006.01207.x.
- Brumm H. 2004. The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird. *Journal of Animal Ecology*. 73(3):434–440. doi:10.1111/j.0021-8790.2004.00814.x.
- Brumm H. 2006. Signalling through acoustic windows: nightingales avoid interspecific competition by short-term adjustment of song timing. *J Comp Physiol A*. 192:1279–1285. doi:DOI 10.1007/s00359-006-0158-x. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00359-006-0158-x>.

- Brumm H, Naguib M. 2009. Chapter 1 Environmental acoustics and the evolution of bird song. *Adv Study Behav.* 40(November):1–33. doi:10.1016/S0065-3454(09)40001-9.
- Brumm H, Slabbekoorn H. 2005. Acoustic communication in noise. *Adv Study Behav.* 35:151–209. doi:10.1016/S0065-3454(05)35004-2.
- Brumm H, Slater PJB. 2006. Ambient noise, motor fatigue, and serial redundancy in chaffinch song. *Behav Ecol Sociobiol.* 60(4):475–481. doi:10.1007/s00265-006-0188-y.
- Brumm H, Zollinger A. 2013. Avian vocal production in noise. In: Brumm H, editor. *Animal Communication and Noise.* Vol. 2. 2nd ed. Springer. p. 187–227. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-41494-7>.
- Bueno-Enciso J, Ferrer ES, Barrientos R, Sanz JJ. 2016. Habitat structure influences the song characteristics within a population of Great Tits *Parus major*. *Bird Study.* 63(3):359–368. doi:10.1080/00063657.2016.1212812.
- Cadena-Ortiz H. 2018. Anidación del gorrión criollo *Zonotrichia Capensis (Emberizidae)* en Quito, Ecuador. *Revista Ecuatoriana de Ornitología.*(3):10–15. doi:10.18272/reo.v0i3.748.
- Cardoso GC. 2012. Paradoxical calls: the opposite signaling role of sound frequency across bird species. *Behavioral Ecology.* 23(2):237–241. doi:10.1093/beheco/arr200.
- Catchpole CK. 1986. Song repertoires and reproductive success in the great reed warbler *Acrocephalus arundinaceus*. Source: *Behavioral Ecology and Sociobiology.* 19(6):439–445.
- Catchpole CK, Slater PJB. 2008. Bird song biological themes and variations. second edi. Catchpole CK, Slater PJB, editors. New York: Cambridge University Press.
- Caycedo-Rosales P, Ruiz-Muñoz J, Orozco-Alzate M. 2013. Reconocimiento automatizado de señales bioacústicas: una revisión de métodos y aplicaciones. *Ing Cienc.* 9(18):171–195. doi:10.17230/ingciencia.9.18.10.
- Chapman FM. 1940. The post-glacial history of *Zonotrichia capensis*. *Bulletin American Museum of Natural History.* 77:381–438. <https://digitallibrary.amnh.org/handle/2246/876>.

- Ciaburri I, Williams H. 2019. Context-dependent variation of house finch song syntax. *Anim Behav.* 147:33–42. doi:10.1016/j.anbehav.2018.11.001.
- Collins S. 2004. Vocal fighting and flirting: the functions of birdsong. In: Marler P, Slabbekoorn H, editors. *Natures Music, The Science of Birdsong*. First. California, USA: Elsevier. p. 39–79.
- Cooper C, Hochachka W, Ohondt A. 2007. Contrasting natural experiments confirm competition between house finches and house sparrows. *Ecology.* 88(4):864–870.
- Dickerson AL, Rowland JA, Trama AJE, Wraith-Frank DM, Hall ML. 2021. Male and female Australian magpie-larks respond differently to variation in song frequency (pitch). *Ethology.* 128(2):174–182.
- Domingo A. 2014. *Apuntes de acústica*. España.
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02465629#citeas>.
- Dorado-Correa A, Rodríguez-Rocha M, Brumm H. 2016. Anthropogenic noise, but not artificial light levels predict song behaviour in an equatorial bird. *The Royal Society Open Science.* 3(160231):1–7.
- Dunning JL, Pant S, Murphy K, Prather JF. 2020. Female finches prefer courtship signals indicating male vigor and neuromuscular ability. *PLoS One.* 15(1):1–19. doi:10.1371/journal.pone.0226580.
- Eens M, Pinxten R, Verheyen RF, Frans Verheyen' R. 1991. Male song as a cue for mate choice in the european starling. *Behaviour.* 116(3):210–238. [accessed 2022 May 16]. <http://www.jstor.org/stable/4534919>.
- Elie JE, Theunissen FE. 2018. Zebra finches identify individuals using vocal signatures unique to each call type. *Nat Commun.* 9(1):1–11. doi:10.1038/s41467-018-06394-9.
- Farina A. 2018. Perspectives in ecoacoustics: a contribution to defining a discipline. *Journal of Ecoacoustics.* 2:TRZD5I. doi:10.22261/jea.trzd5i.
- Farina A, Pieretti N, Morganti N. 2013. Acoustic patterns of an invasive species: the red-billed leiothrix (*Leiothrix lutea Scopoli 1786*) in a mediterranean shrubland. *Bioacoustics.* 22(3):175–194. doi:10.1080/09524622.2012.761571.

- Fernández-Juricic E, Poston R, de Collibus K, Morgan T, Bastain B, Martin C, Jones K, Treminio R. 2005. Microhabitat selection and singing behavior patterns of male house finches (*Carpodacus mexicanus*) in urban parks in a heavily urbanized landscape in the western U.S. *Urban Habitats*. 3(1):49–69.
https://www.urbanhabitats.org/v03n01/finch_pdf.pdf.
- Forstmeier W, Burger C, Temnow K, Derégnaucourt S. 2009. The genetic basis of zebra finch vocalizations. *Evolution (N Y)*. 63(8):2114–2130. doi:10.1111/j.1558-5646.2009.00688.x.
- Gentner TQ, Hulse SH. 2000. Female european starling preference and choice for variation in conspecific male song. *Anim Behav*. 59(2):443–458.
doi:10.1006/anbe.1999.1313.
- Gil D, Brumm H. 2014. Acoustic communication in the urban environment: patterns, mechanisms, and potential consequences of avian song adjustments. In: Gil D, Brumm H, editors. *Avian Urban Ecology: Behavioural and physiological adaptations*. first. United Kingdom: Oxford University Press. p. 69–70.
- Haavie J, Borge T, Bures S, Garamszegi LZ, Lampe HM, Moreno J, Qvarnström A, Török J, Sætre GP. 2004. Flycatcher song in allopatry and sympatry - Convergence, divergence and reinforcement. *J Evol Biol*. 17(2):227–237.
doi:10.1111/j.1420-9101.2003.00682.x.
- Halfwerk Wouter, Bot S, Buix J, Van Der Velde M, Komdeur J, Ten Cate C, Slabbekoorn H. 2011. Low-frequency songs lose their potency in noisy urban conditions. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 108(35):14549–14554.
doi:10.1073/pnas.1109091108.
- Halfwerk W., Holleman L, Lessells CK, Slabbekoorn H. 2011. Negative impact of traffic noise on avian reproductive success. *Journal of Applied Ecology*. 48:210–219.
doi:10.1111/j.1365-2664.2010.01914.x.
- Hamao S, Ueda K. 2000. Simplified song in an island population of the bush warbler *Cettia diphone*. *J Ethol*. 18:53–57. doi:<https://doi.org/10.1007/s101640070025>.
- Handford P. 1981. Vegetational correlates of variation in the song of *Zonotrichia capensis*. *Behav Ecol Sociobiol*. 8(3):203–206. doi:10.1007/BF00299831.

- Hanna D, Blouin-Demers G, Wilson DR, Mennill DJ. 2011. Anthropogenic noise affects song structure in red-winged blackbirds (*Agelaius phoeniceus*). *Journal of Experimental Biology*. 214(21):3549–3556. doi:10.1242/jeb.060194.
- Henry KS, Lucas JR. 2008. Coevolution of auditory sensitivity and temporal resolution with acoustic signal space in three songbirds. *Anim Behav*. 76(5):1659–1671. doi:10.1016/j.anbehav.2008.08.003.
- Henry KS, Lucas JR. 2009. Vocally correlated seasonal auditory variation in the house sparrow (*Passer domesticus*). *Journal of Experimental Biology*. 212(23):3817–3822. doi:10.1242/jeb.033035.
- Hill S, Pawley M, Ji W. 2017. Local habitat complexity correlates with song complexity in a vocally elaborate honeyeater. *Austral Ecol*. 42(5):590–596. doi:10.1111/aec.12477.
- Hill SD, Ji W, Parker K, Amiot C, Wells S, Parker K. 2013. A comparison of vocalisations between mainland tui (*Prosthemadera novaeseelandiae novaeseelandiae*) and Chatham Island tui (*P. n. chathamensis*). *N Z J Ecol*. 37(2):214–223. <http://www.newzealandecology.org/nzje/>.
- Job JR, Kohler SL, Gill SA. 2016. Song adjustments by an open habitat bird to anthropogenic noise, urban structure, and vegetation. *Behavioral Ecology*. 27:arw105. doi:10.1093/beheco/arw105.
- Kalinoski R. 1975. Intra- and interspecific aggression in house finches and house sparrows. *Condor*. 77(4):375–384. doi:10.2307/1366086. <https://doi.org/10.2307/1366086>.
- Knapton R. 1987. Intraspecific avoidance and interespecific overlap of songs series in the eastern meadowlark. *Auk*. 104(October):775–779.
- Laiolo P. 2011. The rufous-collared sparrow *Zonotrichia capensis* utters higher frequency songs in urban habitats. *Revista Catalana d'Ornitologia*. 27:25–30. http://www.ornitologia.org/ca/queoferim/divulgacio/publicacions/rco/27_25_30.pdf
- Laiolo P, Rolando A. 2003. The evolution of vocalisations in the genus *Corvus*: effects of phylogeny, morphology and habitat. *Evolutionary Ecology*. 17:111–123.

- Liebl A, Schrey A, Andrew S, Sheldon E, Griffith S. 2015. Invasion genetics: lessons from a ubiquitous bird, the house sparrow *Passer domesticus*. *Curr Zool.* 61(3):465–476. doi:10.1093/czoolo/61.3.465.
- Linhart P, Slabbekoorn H, Fuchs R. 2012. The communicative significance of song frequency and song length in territorial chiffchaffs. *Behavioral Ecology.* 23(6):1338–1347. doi:10.1093/beheco/ars127.
- Lohr B, Wright TF, Dooling RJ. 2003. Detection and discrimination of natural calls in masking noise by birds: estimating the active space of a signal. *Anim Behav.* 65(4):763–777. doi:10.1006/anbe.2003.2093.
- Lougheed SC, Campagna L, Dávila JA, Tubaro PL, Lijtmaer DA, Handford P. 2013. Continental phylogeography of an ecologically and morphologically diverse Neotropical songbird, *Zonotrichia capensis*. *BMC Evol Biol.* 13(58):1–15. doi:10.1186/1471-2148-13-58. https://www.researchgate.net/publication/235774005_Continental_phylogeography_of_an_ecologically_and_morphologically_diverse_Neotropical_songbird_Zonotrichia_capensis.
- Marler P, Slabbekoorn H. 2004. Nature's music The science of Birdsong. first edit. Marler P, Slabbekoorn H, editors. USA: Elsevier.
- Marques T, Buckland ST, Thomas L. 2011. Distance sampling. In: Lovric M, editor. *International Encyclopedia of Statistican Science*. Berlin: Springer-Verlag. p. 398–400.
- Matsunaga E, Okanoya K. 2009. Evolution and diversity in avian vocal system: An Evo-Devo model from the morphological and behavioral perspectives. *Dev Growth Differ.* 51(3):355–367. doi:10.1111/j.1440-169X.2009.01091.x.
- Menacho K, Salinas L, Arana C. 2018. Diet overlap of the invasive house sparrow and the native rufous-collared sparrow in an agroecosystem of central coast of Peru. *Rev Peru Biol.* 25(2):111–116. doi:10.15381/rpb.v25i2.14687.
- Mendes S, Colino-Rabanal VJ, Peris SJ. 2017. Adaptación acústica del canto de *Turdus leucomelas* (Passeriformes: *Turdidae*) a diferentes niveles de ruido antrópico, en el área metropolitana de Belém, Pará, brasil. *Rev Biol Trop.* 65(2):633–642. doi:10.15517/rbt.v65i2.25721.

- Mennill D, Badyaev A, Jonart LM, Hill GE. 2006. Male house finches with elaborate songs have higher reproductive performance. *Ethology*. 112(2):174–180. doi:10.1111/j.1439-0310.2006.01145.x.
- Mertins B. 2021. Nature mentoring. Why do sparrows Chirp? (five sparrow calls & what they mean). <https://nature-mentor.com/why-sparrows-chirp/>.
- Mockford EJ, Marshall RC. 2009. Effects of urban noise on song and response behaviour in great tits. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 276(1669):2979–2985. doi:10.1098/rspb.2009.0586.
- Morinay J, Cardoso G, Doutrelant C, Covas R. 2013. The evolution of birdsong on islands. *Ecol Evol*. 3(16):5127–5140. doi:10.1002/ece3.864.
- Morisaka T, Katahira K, Okanoya K. 2008. Variability in preference for conspecific songs with syntactical complexity in female bengalese finches: towards an understanding of song evolution. *Ornithol Sci*. 7(1):75–84. doi:10.2326/1347-0558(2008)7[75:vipfcs]2.0.co;2.
- Morton ES. 1975. The American society of naturalists ecological sources of selection on avian sounds. *Am Nat*. 109(965):17–34. [accessed 2022 May 16]. <http://www.jstor.org/stable/2459634>.
- Moulton M, Cropper W, Avery M, Moulton L. 2010. The earliest house sparrow introductions to North America. *Biol Invasions*. 12(9):2955–2958. doi:10.1007/s10530-010-9692-0.
- Mundinger P. 1975. Song dialects and colonization in the house finch, *Carpodacus mexicanus*, on the east coast. *Condor*. 77(4):407. doi:10.2307/1366088.
- Murgui E, Maclas A. 2010. Changes in the house sparrow *Passer domesticus* population in Valencia (Spain) from 1998 to 2008. *Bird Study*. 57(3):281–288. doi:10.1080/00063651003716762. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00063651003716762?needAccess=true>.
- Naguib M. 2003. Reverberation of rapid and slow trills: Implications for signal adaptations to long-range communication. *J Acoust Soc Am*. 113(3):1749–1756. doi:10.1121/1.1539050.

- Nicholls J, Goldizen A. 2006. Habitat type and density influence vocal signal design in satin bowerbirds. *Journal of Animal Ecology*. 75(2):549–558. doi:10.1111/j.1365-2656.2006.01075.x.
- Nolan PM, Hill GE. 2004. Female choice for song characteristics in the house finch. *Anim Behav*. 67(3):403–410. doi:10.1016/j.anbehav.2003.03.018.
- Nottebohm F. 1969. The song of the chingolo, *Zonotrichia capensis*, in Argentina: description and evaluation of a system of dialects. *Condor*. 71(3):299–315. doi:DOI: 10.2307/1366306.
- Nottebohm F. 1975. Continental patterns of song variability in *Zonotrichia capensis*: some possible ecological correlates. *Am Nat*. 109(970):605–624. doi:10.1086/283033.
- Odom KJ, Cain KE, Hall ML, Langmore NE, Mulder RA, Kleindorfer S, Karubian J, Brouwer L, Enbody ED, Jones JA, et al. 2021. Sex role similarity and sexual selection predict male and female song elaboration and dimorphism in fairy-wrens. *Ecol Evol*. 11(24):17901–17919. doi:10.1002/ece3.8378.
- Ortega-Alvarez R, MacGregor-Fors I. 2010. What matters most? Relative effect of urban habitat traits and hazards on urban park birds. *Ornitol Neotrop*. 21(4):519–533.
- Pereira PF, Godinho C, Vila-Viçosa MJ, Mota PG, Lourenço R. 2017. Competitive advantages of the red-billed leiothrix (*Leiothrix lutea*) invading a passerine community in Europe. *Biol Invasions*. 19(5):1421–1430. doi:10.1007/s10530-016-1364-2.
- Planqué R, Slabbekoorn H. 2008. Spectral overlap in songs and temporal avoidance in a peruvian bird assemblage. *Ethology*. 114(3):262–271. doi:10.1111/j.1439-0310.2007.01461.x.
- Popp W, Ficken W, Reinartz A. 1985. Short-term temporal avoidance of interspecific acoustic interference among forest birds. *Auk*. 102(October):744–748.
- Price MA, Attenborough K, Heap NW. 1988. Sound attenuation through trees: measurements and models. *J Acoust Soc Am* . 5:1836–1844. [accessed 2022 May 15]. <https://doi.org/10.1121/1.397150>.
- Pytte CL. 1997. Song organization of house finches at the edge of an expanding range. *Condor*. 99(4):942–954. doi:10.2307/1370145.

- Rheindt FE. 2003. The impact of roads on birds: Does Song frequency play a role in determining susceptibility to noise pollution? *J Ornithol.* 144:295–306.
doi:<https://doi.org/10.1007/BF02465629>.
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02465629#citeas>.
- Ríos-Chelén AA, Cuatianquiz-Lima C, Bautista A, Martínez-Gómez M. 2018. No reliable evidence for immediate noise-induced song flexibility in a suboscine. *Urban Ecosyst.* 21(1):15–25. doi:10.1007/s11252-017-0690-1.
- Ríos-Chelén AA, Salaberria C, Barbosa I, Macías Garcia C, Gil D. 2012. The learning advantage: bird species that learn their song show a tighter adjustment of song to noisy environments than those that do not learn. *J Evol Biol.* 25(11):2171–2180. doi:10.1111/j.1420-9101.2012.02597.x.
- Riyahi S. 2017. Local adaptation by birds to human-altered habitats: the great tit and the house sparrow as model species. Universidad de Barcelona.
- Shaw LM, Chamberlain D, Evans M. 2008. The house sparrow *Passer domesticus* in urban areas: Reviewing a possible link between post-decline distribution and human socioeconomic status. *J Ornithol.* 149(3):293–299. doi:10.1007/s10336-008-0285-y.
- Sheldon EL, Ironside JE, de Vere N, Marshall RC. 2020. Singing under glass: rapid effects of anthropogenic habitat modification on song and response behaviours in an isolated house sparrow *Passer domesticus* population. *J Avian Biol.* 51(3):1–8. doi:10.1111/jav.02248.
- Shy E. 1983. Behavioral ecology and sociobiology the relation of geographical variation in song to habitat characteristics and body size in north american tanagers (Thraupinae: *Piranga*). *Behav Ecol Sociobiol.* 12:71–76. [accessed 2022 May 15]. <https://www.jstor.org/stable/4599560>.
- Slabbekoorn H. 2004. Singing in the wild: the ecology of birdsong. In: Marler P, Slabbekoorn Hans, editors. *Bird calls: a cornucopia for communication*. California, USA: Elsevier. p. 178–205.
- Slabbekoorn H, den Boer-Visser A. 2006. Cities change the songs of birds. *Current Biology.* 16(23):2326–2331. doi:10.1016/j.cub.2006.10.008.

- Slabbekoorn H, Smith TB. 2002. Bird song, ecology and speciation. *Phil Trans R Soc Lond B* . 357:493–503. doi:10.1098/rstb.2001.1056.
- Slabbekoorn H, Yeh P, Hunt K. 2007. Sound transmission and song divergence: a comparison of urban and forest acoustics. *Condor*. 109(1):67–78. doi:10.1093/condor/109.1.67.
- Tennessen J, Parks SE, Snow RW, Langkilde TL. 2013. Impacts of acoustic competition between invasive Cuban treefrogs and native treefrogs in southern Florida. *Proceedings of Meetings on Acoustics*. 19(2013). doi:10.1121/1.4800972.
- The Cornell Lab. 2019. The Cornell Lab. House Sparrow Sounds. [accessed 2020 Oct 26]. https://www.allaboutbirds.org/guide/House_Sparrow/sounds.
- Todt D, Naguib M. 2000. Vocal interactions in birds: the use of song as a model in communication. *Adv Study Behav*. 29(C):259–263. doi:10.1016/S0065-3454(08)60107-2.
- Tubaro PL, Segura ET, Handford P. 1993. Geographic variation in the song of the rufous-collared sparrow in eastern Argentina. *Condor*. 95(3):588–595. doi:10.2307/1369603.
- Vallet E, Kreutzer M. 1995. Female canaries are sexually responsive to special song phrases. *Anim Behav* . 49:1603–1610.
- Verboom W, Heij C. 2018. Bird vocalizations: the House sparrow (*Passer domesticus*). https://www.researchgate.net/publication/326234889_Bird_vocalizations_the_House_sparrow_Passer_domesticus.
- Wootton JT. 1987. Interspecific competition between introduced house finch populations and two associated passerine species. *Oecologia*. 71:325–331. doi:https://doi.org/10.1007/BF00378703.
- Yamaguchi A, Kelley D. 2003. Hormonal mechanisms in acoustic communication. In: Simmons A, Popper A, Fay R, editors. *Acoustic Communication*. New York, USA.: Springer. p. 275–323.