

Universidad de La Habana  
Facultad de Matemática y Computación



## **Título de la tesis**

**Autor: Daniel Machado Pérez**

**Tutores:**

**Dr. Roberto Mulet Genicio**

**Dr. Milton García Borroto**

Trabajo de Diploma  
presentado en opción al título de  
Licenciado en Ciencia de la Computación



La Habana,  
mayo 2025

[github.com/DanielMPMatCom/Thesis.git](https://github.com/DanielMPMatCom/Thesis.git)

*"La utopía está en el horizonte  
Camino dos pasos y se aleja dos pasos.  
Camino diez y el horizonte se corre diez pasos más allá.  
Entonces, ¿para qué sirve la utopía?  
Para eso, sirve para caminar."*

**Fernando Birri**

# Agradecimientos

# Resumen

# **Abstract**

# Índice general

<b>Introducción</b>	<b>8</b>
0.1. Motivación y justificación . . . . .	9
0.2. Formulación del problema . . . . .	10
0.3. Hipótesis de partida . . . . .	12
0.4. Objetivos . . . . .	12
0.5. Propuesta de solución . . . . .	13
<b>1. Detección de Individuos a Partir de Señales de Audio</b>	<b>15</b>
<b>2. Métodos y Metodologías</b>	<b>16</b>
<b>3. Resultados e Interpretación</b>	<b>17</b>
<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>18</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>19</b>

# Índice de figuras

1.	Ejemplar de <i>Eleutherodactylus eileenae</i> . . . . .	9
2.	Distribución Geográfica de los Micrófonos. . . . .	11

# Introducción

Las técnicas de monitorización acústica automatizada se han convertido en una herramienta esencial para el estudio de comunidades animales en su medio natural. En particular, el análisis del canto de los anuros ofrece información valiosa sobre sus estrategias de apareamiento, la dinámica de sus poblaciones y la salud de los ecosistemas en los que habitan. La rana cubana *Eleutherodactylus eileenae* (Dunn, 1929), endémica de Cuba, constituye un modelo idóneo para investigar estos procesos, pues sus machos forman coros nocturnos cuyos patrones de interacción pueden reflejar aspectos tanto ecológicos como de comportamiento social [4].

*E. eileenae*, conocido comúnmente como “Colín”, es una especie perteneciente a la familia *Eleutherodactylidae*. Su distribución abarca desde la península de Guanahacabibes, en Pinar del Río, hasta la Sierra de Najasa, en Camagüey, ocupando diversos hábitats como bosques semidecíduos, pinares y cafetales, hasta altitudes de aproximadamente 900 metros sobre el nivel del mar [4, 18, 10]. Durante el día, estos anuros se refugian en oquedades de rocas, troncos, hojarasca y bromelias; al anochecer, los machos ascienden a ramas y hojas, hasta alturas de 3 metros, para emitir sus vocalizaciones.

El canto característico de *E. eileenae* consta de dos notas diferenciadas: una primera “Co”, breve y de frecuencia menor, seguida de una segunda “Lin”, más prolongada y de frecuencia ligeramente superior. Esta estructura ha motivado el uso del término “Colín” para referirse tanto a cada canto individual como, coloquialmente, a la especie misma. Estas llamadas desempeñan un papel crucial en la comunicación intraespecífica, mediando aspectos relacionados con el estado fisiológico y la competencia territorial. Además, se ha observado que los machos forman agrupaciones o “coros”, sincronizando sus cantos para aumentar la eficacia en la atracción de hembras y reducir el riesgo de depredación.

La presente investigación desarrolla un flujo computacional automatizado para procesar grabaciones de los cantos de los Colines y, a partir de él,



analizar detalladamente la dinámica de estos coros y las interacciones acústicas asociadas. El objetivo es comprender los patrones de apareamiento de *E. eileenae* y las estrategias de comunicación que emplea en su entorno natural. En la Figura 1 se muestra un ejemplar de esta especie, y en la Guía sonora de los anfibios de Cuba <sup>1</sup> se puede encontrar una breve grabación de su canto y otros datos relevantes.



Figura 1: Ejemplar de *Eleutherodactylus eileenae*.

## 0.1. Motivación y justificación

La ecoacústica ha evolucionado desde la grabación pasiva hasta flujos computacionales que automatizan la detección de llamadas en ambientes ruidosos [1, 6, 19]. Sin embargo, en Cuba pocos estudios han integrado estas técnicas con modelos de interacción estadística.

<sup>1</sup>Grabación disponible en: [https://www.fonozoo.com/fnz\\_detalle\\_registro\\_amphibia.php?id=97953&tipo\\_registro=1](https://www.fonozoo.com/fnz_detalle_registro_amphibia.php?id=97953&tipo_registro=1)

El análisis manual de grabaciones de campo resulta lento, costoso y propenso a errores humanos, lo que limita la escala y reproducibilidad de los estudios bioacústicos. En trabajos previos sobre *E. eileenae*, los investigadores describieron manualmente las etapas de vocalización y realizaron muestreos puntuales de la actividad acústica y trófica de los machos en la Sierra del Rosario [4]. Sin embargo, no se abordó la sincronización automática de múltiples micrófonos ni la clasificación sistemática de cada llamado, pasos indispensables para escalar el análisis a largas series temporales y diferentes localidades.

Además, los coros de machos implican interacciones acústicas cuya dinámica no se comprende completamente: ¿cómo influyen la densidad de individuos, la configuración espacial de los micrófonos y el ruido ambiental en la estructura del coro? ¿Qué reglas simples de interacción subyacen en la sincronización de los “Colines”? Un enfoque computacional reproducible, basado en algoritmos heurísticos, permite procesar de manera eficiente decenas de horas de grabaciones, discriminando eventos de interés (cantos de Colines) de otros sonidos (otra fauna, viento, tráfico) y garantizando resultados comparables entre campañas de muestreo.

Por tanto, la presente tesis justifica el desarrollo de un flujo completo que abarque desde la adquisición y sincronización de señales hasta la clasificación automática de cantos y el modelado de interacciones acústicas, a fin de superar las limitaciones de los métodos manuales y aportar herramientas robustas para la ecoacústica de anfibios en Cuba y regiones semejantes.

## 0.2. Formulación del problema

El presente trabajo se ocupa del procesamiento automático de un conjunto de grabaciones obtenidas en la Reserva de la Biosfera “Sierra del Rosario” con el objetivo de caracterizar los cantos de machos de *Eleutherodactylus eileenae* y reconstruir la dinámica de sus coros. Estas grabaciones, realizadas con nueve micrófonos omnidireccionales dispuestos en un área de aproximadamente 20 m de radio, abarcan ciclos de 58 minutos de registro seguidos de 2 minutos de descarga, durante tres noches consecutivas entre las 18:00 y las 06:00 horas. El entorno de captura se ve afectado por ruido de lluvia, viento, tráfico y la superposición de cantos de varios individuos, lo que plantea retos importantes tanto en la sincronización de señales como en la discriminación de los eventos acústicos relevantes frente a emisiones no deseadas. En la Figura 2 se muestra la distribución geográfica de

los micrófonos en el área de estudio.

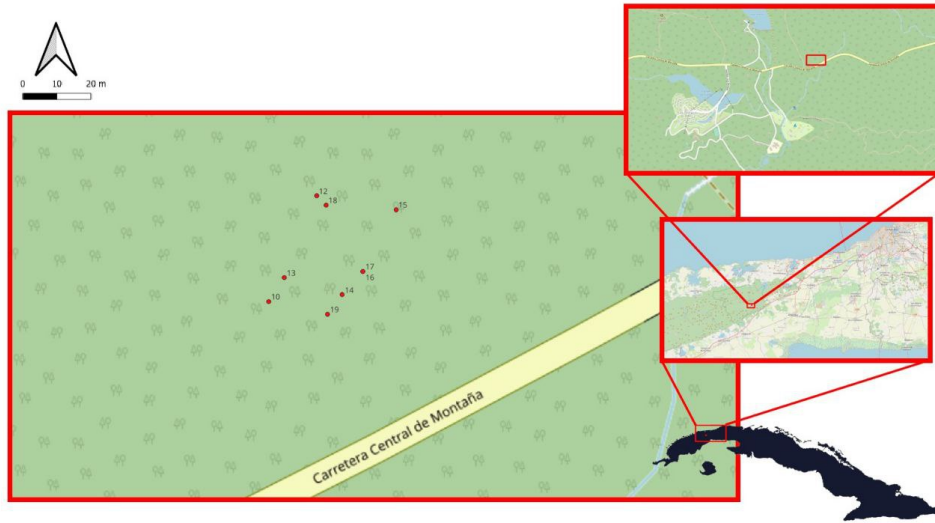


Figura 2: Distribución Geográfica de los Micrófonos.

En este ámbito, el problema central consiste en diseñar un flujo heurístico que permita sincronizar con precisión milimétrica las nueve pistas de audio, detectar de forma fiable los instantes en que cada macho emite su canto (denominado “Colín”) y asignar cada evento al micrófono, y por ende al individuo, correspondiente. A partir de esta información, se busca extraer parámetros temporales y espectrales de cada llamado, generando un registro estructurado que sirva de base para el análisis de las interacciones acústicas entre machos. Finalmente, dichos registros se emplearán para inferir un modelo de red de interacción inspirado en el modelo de Ising, con el fin de describir y cuantificar la sincronización y causalidad presentes en el coro.

La complejidad del problema reside en la superposición de señales y en la variabilidad del nivel de ruido ambiental, lo cual exige emplear técnicas robustas de filtrado. Este trabajo opta por heurísticas de intensidad relativa y correlación espectral para asignar cada “Colín” al micrófono y al individuo correspondiente, garantizando la reproducibilidad de los resultados y la comparabilidad con futuros estudios bioacústicos. Este estudio es el primero en Cuba en aplicar el modelo de Ising para describir interacciones acústicas en coros de anuros, siguiendo aproximaciones similares en redes

de antenas y colonias de insectos [17, 14, 5, 15].

### 0.3. Hipótesis de partida

Se plantea como hipótesis principal que un flujo computacional basado en algoritmos heurísticos para la sincronización, detección y clasificación de cantos de Colines podrá reproducir con un alto grado de fidelidad las secuencias de emisión de cada individuo y, a partir de ellas, inferir las interacciones acústicas subyacentes a la formación de coros. En concreto, se espera que el proceso de sincronización automática de las nueve pistas de audio alcance una precisión temporal suficiente para diferenciar llamadas superpuestas de individuos vecinos. Además se supone que la asignación de cada evento acústico al micrófono más próximo, combinada con criterios de similitud espectral, permitirá etiquetar con un alto grado de exactitud los cantos de cada macho, validado mediante muestreo manual de subconjuntos de datos. También que una vez extraídas las secuencias temporales de cantos para cada individuo, la inferencia de los parámetros de interacción  $J_{ij}$  en un modelo de Ising estimará la probabilidad de co-emisión con una precisión suficiente para reproducir las correlaciones observadas en la red real de coros.

En conjunto, estas hipótesis de partida fundamentan la viabilidad de un enfoque computacional replicable y escalable que, aplicado a los cantos de Colines, aporte nuevas perspectivas cuantitativas sobre la dinámica de los coros y sirva como base para futuros estudios comparativos en ecoacústica.

### 0.4. Objetivos

El objetivo general de esta tesis es diseñar, implementar y validar un flujo computacional heurístico para la detección, clasificación y modelado de las interacciones acústicas en coros de machos de *Eleutherodactylus eileinae*, de modo que se pueda reconstruir la dinámica de sus cantos y describir cuantitativamente la sincronización y causalidad presentes en el conjunto. Para ello se plantean los siguientes objetivos específicos:

#### 1. Construir un *dataset* limpio y sincronizado:

- Sincronizar las nueve pistas de audio utilizando referencias comunes (picos de energía) y correlación cruzada. [9]

- Eliminar ruidos de fondo (lluvia, viento, tráfico) e interferencias no deseadas.

## 2. Detectar y asignar cada canto a su emisor:

- Desarrollar heurísticas de proximidad basadas en la intensidad relativa en cada micrófono.
- Validar la asignación mediante muestreo manual de segmentos y cálculo de exactitud.
- Evaluar la consistencia de los algoritmos de detección y asignación.
- Comparar el rendimiento de los algoritmos diseñados.

## 3. Inferir modelo de interacciones acústicas:

- Formular la red de interacciones como un modelo de Ising con parámetros  $J_{ij}$  que cuantifiquen la co-emisión.
- Estimar los  $J_{ij}$  mediante el Principio de Máxima Verosimilitud y algoritmos de descenso por gradiente.
- Evaluar la idoneidad del modelo de Ising mediante una comparación con el modelo Independiente en cuanto a su capacidad para predecir los patrones de cantos.

# 0.5. Propuesta de solución

Para dar respuesta al problema planteado, se propone un flujo de trabajo modular que integre cuatro etapas principales: sincronización, filtrado, asignación de emisores y modelado de interacciones. En primer lugar, la sincronización de las nueve pistas de audio se realizará mediante la aplicación de correlación cruzada sobre los histogramas de distribución de distancias temporales entre los picos de energía de los audios y un punto de referencia. A continuación, se aplicará un filtro que consiste en una poda espectral basada en el percentil 99.9 de la amplitud por frecuencia. Con ello se busca atenuar ruido de baja (viento, tráfico) y alta frecuencia (insectos).

En la tercera fase se asignará cada llamado al micrófono más adecuado mediante heurísticas de intensidad relativa. Finalmente, la información temporal y espectral extraída de cada evento servirá para construir un grafo de interacciones, modelado con un enfoque de máxima verosimilitud en un sistema análogo al modelo de Ising. El ajuste de los parámetros  $J_{ij}$  se

llevará a cabo mediante un algoritmo de descenso por gradiente, incorporando regularización para evitar sobreajuste.

Este flujo, además de automatizar completamente la extracción de datos, permitirá validar la hipótesis de partida mediante métricas objetivas de precisión y reproducibilidad, y ofrecerá una herramienta extensible a otros sistemas de ecoacústica con configuraciones similares.

Para explicar la solución propuesta y el flujo de trabajo, se diseñó la siguiente estructura del presente documento. En el Capítulo 1 se revisan los antecedentes y actualidad en cuanto a detección y clasificación de llamadas bioacústicas, con especial énfasis en métodos de sincronización y filtrado de señales. El Capítulo 2 detalla la metodología empleada: adquisición y preprocesamiento de las grabaciones, algoritmos heurísticos para la detección de los “Colines” y la asignación de cada canto a su emisor, y la formulación del modelo de interacciones basado en Ising con inferencia por máxima verosimilitud y descenso por gradiente. En el Capítulo 3 se presentan los resultados obtenidos: evaluación de la precisión de sincronización, rendimiento de los detectores de canto, exactitud de la asignación micrófono-Colín y análisis de las interacciones inferidas  $\{J_{ij}\}$ . Finalmente, en las Conclusiones se discuten las aportaciones principales, las implicaciones ecológicas y computacionales, las limitaciones del estudio y las líneas de investigación futura.

## **Capítulo 1**

# **Detección de Individuos a Partir de Señales de Audio**

## **Capítulo 2**

# **Métodos y Metodologías**



## **Capítulo 3**

# **Resultados e Interpretación**

## **Conclusiones y Recomendaciones**

# Bibliografía

- [1] Miguel A Acevedo, Carlos J Corrada-Bravo, Héctor Corrada-Bravo, Luis J Villanueva-Rivera, and T Mitchell Aide. Automated classification of bird and amphibian calls using machine learning: A comparison of methods. *Ecological Informatics*, 4(4):206–214, 2009. (Citado en la página 9).
- [2] Mauricio S Akmentins. Vocal repertoire of two species of oreobates jiménez de la espada, 1872 (anura: Strabomantidae) of the yungas andean forest, nw argentina. *Journal of Natural History*, 45(29-30):1789–1799, 2011.
- [3] Mauricio Sebastián Akmentins, Laura Cecilia Pereyra, Eduardo Alfredo Sanabria, and Marcos Vaira. Patterns of daily and seasonal calling activity of a direct-developing frog of the subtropical andean forests of argentina. *Bioacoustics*, 24(2):89–99, 2015.
- [4] Roberto Alonso, Ariel Rodríguez-Gómez, and Alberto R Estrada. Patrones de actividad acústica y trófica de machos cantores de *eleutherodactylus eileenae* (anura: Leptodactylidae). *Revista española de herpetología*, 15(2001):45–52, 2001. (Citado en las páginas 8 y 10).
- [5] William Bialek. *Biophysics: searching for principles*. Princeton University Press, 2012. (Citado en la página 12).
- [6] Daniel T Blumstein, Daniel J Mennill, Patrick Clemens, Lewis Girod, Kung Yao, Gail Patricelli, Jill L Deppe, Alan H Krakauer, Christopher Clark, Kathryn A Cortopassi, et al. Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus. *Journal of Applied Ecology*, 48(3):758–767, 2011. (Citado en la página 9).

- [7] Ryan Calsbeek, Francisco Javier Zamora-Camacho, and Laurel B Symes. Individual contributions to group chorus dynamics influence access to mating opportunities in wood frogs. *Ecology Letters*, 25(6):1401–1409, 2022.
- [8] H Chau Nguyen, Riccardo Zecchina, and Johannes Berg. Inverse statistical problems: from the inverse ising problem to data science. *Advances in Physics*, 66(3):197–261, 2017.
- [9] Luciano da F Costa. Comparing cross correlation-based similarities. *arXiv preprint arXiv:2111.08513*, 2021. (Citado en la página 12).
- [10] AR Estrada. Herpetofauna de la cuenca banao-higuanojo, sancti spiritus, cuba. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, 19:353–360, 1994. (Citado en la página 8).
- [11] Almo Farina. Ecoacoustics: A quantitative approach to investigate the ecological role of environmental sounds. *Mathematics*, 7(1):21, 2018.
- [12] Hongxiao Gan, Jinglan Zhang, Michael Towsey, Anthony Truskinger, Debra Stark, Berndt J van Rensburg, Yuefeng Li, and Paul Roe. Data selection in frog chorusing recognition with acoustic indices. *Ecological Informatics*, 60:101160, 2020.
- [13] Daniel Jurafsky and James H Martin. Speech and language processing: An introduction to natural language processing, computational linguistics, and speech recognition.
- [14] Thierry Mora and William Bialek. Are biological systems poised at criticality? *Journal of Statistical Physics*, 144:268–302, 2011. (Citado en la página 12).
- [15] A Reyes, M Curbelo, F Tejera, A Rivera, G Simon, O Ramos, MS Turner, and E Altshuler. Transmission of danger information past physical barriers by ants. *arXiv preprint arXiv:1904.03236*, 2019. (Citado en la página 12).
- [16] Ignacio Sánchez-Gendríz and Linilson Rodrigues Padovese. A methodology for analyzing biological choruses from long-term passive acoustic monitoring in natural areas. *Ecological Informatics*, 41:1–10, 2017.

- [17] Elad Schneidman, Michael J Berry, Ronen Segev, and William Bialek. Weak pairwise correlations imply strongly correlated network states in a neural population. *Nature*, 440(7087):1007–1012, 2006. (Citado en la página 12).
- [18] Albert Schwartz. A new frog of the auriculatus group of the genus eleutherodactylus from western cuba. *Herpetologica*, 14(2):69–77, 1958. (Citado en la página 8).
- [19] Michael Towsey, Jason Wimmer, Ian Williamson, and Paul Roe. The use of acoustic indices to determine avian species richness in audio-recordings of the environment. *Ecological Informatics*, 21:110–119, 2014. (Citado en la página 9).
- [20] Lawrence L Woolbright. Patterns of nocturnal movement and calling by the tropical frog eleutherodactylus coqui. *Herpetologica*, pages 1–9, 1985.
- [21] Jie Xie, Mingying Zhu, Kai Hu, Jinglan Zhang, Harry Hines, and Ya Guo. Frog calling activity detection using lightweight cnn with multi-view spectrogram: A case study on kroombit tinkler frog. *Machine Learning with Applications*, 7:100202, 2022.
- [22] Hong-Li Zeng, Mikko Alava, Erik Aurell, John Hertz, and Yasser Rou-di. Maximum likelihood reconstruction for ising models with asynchronous updates. *Physical review letters*, 110(21):210601, 2013.
- [23] Tao Zhang, Guoqing Feng, Jinhua Liang, and Tong An. Acoustic scene classification based on mel spectrogram decomposition and model merging. *Applied Acoustics*, 182:108258, 2021.