



Universidad Autónoma de Chihuahua

Facultad de Ingeniería

Detección de la Abeja Reina en una Colmena por Medio del Aprendizaje Profundo

Análisis de Frecuencias Emitidas por el Panal

Student: Leonardo Rafael León Mora.

Thesis director: Dr. Daniel Espinobarro Velázquez.

Advisors:

- M.C. Carlos Hugo Larrinúa Pacheco.
- M.I. Joseph Isaac Ramírez Hernández.

Chihuahua, Chih., 27 de diciembre de 2025.

Índice general

RESUMEN	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Planteamiento del Problema	3
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. Hipótesis de Trabajo	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Conceptos Clave	5
3. METODOLOGÍA	6
3.1. Procedimiento	6
3.1.1. 1er Programa	7
3.2. Instrumentos	7
3.3. Base de Datos	7
4. RESULTADOS	9
5. DISCUSIÓN	10
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	11
6.1. Conclusiones	11
BIBLIOGRAFÍA	12
APÉNDICES	13

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN

Las abejas melíferas han sido ampliamente estudiadas por su destacada contribución al medio ambiente, proporcionando recursos que son vitales para animales, plantas y seres humanos. Su papel en la polinización es crucial para la biodiversidad y la producción agrícola[1]. Además, la miel, el polen, la jalea real y la cera de abejas son productos altamente valorados por sus propiedades nutricionales y medicinales[2].

Durante las temporadas de mayor producción de miel, como en primavera y verano, las abejas melíferas pueden recorrer distancias de hasta 6 km[3], viajando aproximadamente 3 km de ida y vuelta entre la colmena y las fuentes de alimento, como flores, para recolectar polen, néctar o agua. Pero, ¿por qué surge este comportamiento? ¿Cuál es la motivación de las abejas para regresar a la colmena y abastecerla? La comunicación dentro de la colmena es esencial para la supervivencia de la colonia. Las abejas utilizan una variedad de señales, incluyendo feromonas y sonidos, para coordinar sus actividades y mantener el orden social[2]. La presencia de una abeja reina es fundamental para la cohesión del grupo, ya que su ausencia puede conducir a un comportamiento caótico y al eventual colapso de la colonia[4]. Otra forma de comunicación es el *waggle dance*, mediante el cual las abejas pueden informar sobre la ubicación de fuentes de alimento, tomando como referencia los puntos cardinales y trazando un vector en la dirección requerida[5], lo que permite notificar a las demás abejas recolectoras.

Según Ruvinga[4], “*La colonia está formada por la reina, miles de abejas obreras estériles, unos pocos cientos de zánganos, huevos, larvas y pupas*”. Las abejas trabajan a diario, realizando tareas que se dividen no solo entre ma-

chos y hembras, sino también entre abejas jóvenes y adultas[6]. Un panal puede albergar entre 30,000 y 50,000 abejas, aunque este número puede reducirse hasta 5,000 durante el invierno. Este comportamiento de abastecimiento constante está estrechamente vinculado a la estructura social de la colmena y, en particular, al papel de la abeja reina, que es la única capaz de procrear[4].

1.1. Planteamiento del Problema

La reina puede poner en promedio hasta 2,000 huevos al día. Las obreras se encargan de construir, defender y abastecer la colmena con recursos esenciales como agua, polen y néctar[2]. Los zánganos cumplen funciones reproductivas y también se cree que ayudan a regular la temperatura del panal, mientras que las abejas más jóvenes se limitan a tareas dentro de la colmena[6]. La pérdida de la abeja reina puede comprometer seriamente la supervivencia de la colonia.

Las colmenas están expuestas a múltiples amenazas: insectos invasores, pesticidas, condiciones climáticas e inclusive seres humanos. En sistemas apícolas tradicionales donde se utilizan cajas de madera, cada inspección física implica abrir la colmena y romper el sello de propóleo que las abejas han construido para mantener un ambiente limpio y controlado. Esta intervención frecuente no solo representa una pérdida energética para la colonia, que debe reconstruir el sello de propóleo y reabastecer el panal con respecto a las abejas que mueren en este proceso; sino que además incrementa el riesgo de aplastar accidentalmente a la reina durante la manipulación interna de la colmena, lo que puede conducir al colapso de toda la co-

lonia si no se toma acción inmediata.

Una abeja reina puede ser reemplazada por la colonia mediante la crianza de una nueva reina a partir de larvas seleccionadas, siempre y cuando existan suficientes recursos y tiempo para que la nueva reina se desarrolle completamente. Este proceso puede tardar entre 16 y 24 días, dependiendo de las condiciones ambientales y la disponibilidad de alimento[2]. Durante este período, la colonia puede volverse vulnerable a enfermedades, depredadores y otros factores estresantes que pueden afectar su supervivencia. Como una alternativa, los apicultores pueden introducir una reina comprada o criada en otro lugar para restablecer la estabilidad de la colonia. Sin embargo, la aceptación de una nueva reina por parte de las obreras no está garantizada y puede variar según el comportamiento de la colonia y las condiciones ambientales[4].

1.2. Justificación

Contar con herramientas que permitan identificar la presencia o ausencia de la abeja reina de manera no invasiva resulta de gran utilidad para garantizar la continuidad y productividad de la colmena. Esta investigación propone un enfoque basado en el análisis acústico del panal, aprovechando técnicas de aprendizaje automático para detectar el estado de la reina. Dado que estudios recientes han demostrado que el sonido dentro de la colmena varía según la presencia o ausencia de la reina[4, 7, 8, 9], se busca validar un sistema que, a partir de grabaciones de audio, identifique estas variaciones de forma automática y eficiente.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de detección automática con respecto a la presencia de la abeja reina

en una colmena, a partir del cual se permita la recolección de datos, el análisis de audio y la implementación de técnicas de aprendizaje automático. Se pretende obtener un modelo capaz de clasificar el estado de la reina en función de las características acústicas extraídas de grabaciones de audio. Este enfoque no invasivo busca minimizar la perturbación de la colonia durante las inspecciones recurrentes que suele hacer un apicultor, preservando así el bienestar de las abejas y la integridad del panal.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre la estructura de las colonias de abejas melíferas y los efectos de la ausencia de la reina.
- Procesar y organizar un conjunto de datos de audio de colmenas etiquetado con el estado de la reina.
- Extraer características acústicas relevantes, como los coeficientes cepstrales en la escala Mel (MFCC), a partir de las grabaciones.
- Entrenar y evaluar modelos de aprendizaje automático para clasificar el estado de la reina basado en características extraídas.
- Validar la efectividad del sistema en términos de precisión, sensibilidad y especificidad.

1.4. Hipótesis de Trabajo

Dado que el comportamiento sonoro de una colmena varía según el estado de su reina, se espera que un sistema basado en el análisis de características acústicas sea capaz de detectar, con un grado aceptable de precisión, si la reina está presente, ausente, rechazada o recién aceptada en la colonia.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos Clave

- ☞ **Colmena:** estructura donde viven las abejas melíferas, compuesta por una reina, obreras y zánganos.
- ☞ **Reina:** abeja hembra fértil encargada de la reproducción en la colmena.
- ☞ **Propóleo:** resina proveniente de árboles y plantas, utilizada por las abejas para sellar y proteger la colmena.
- ☞ **Zángano:** abeja macho cuya función principal es la reproducción con la reina.
- ☞ **Obrera:** abeja hembra estéril que realiza diversas tareas dentro y fuera de la colmena.
- ☞ **Larva:** etapa de desarrollo de las abejas entre el huevo y la pupa.
- ☞ **Pupa:** etapa de desarrollo de las abejas entre la larva y el adulto.
- ☞ **Panal:** estructura de celdas hexagonales construida por las abejas para almacenar miel, polen y criar a las larvas.
- ☞ **Feromonas:** sustancias químicas producidas por las abejas para comunicarse y regular el comportamiento dentro de la colmena.

3. METODOLOGÍA

3.1. Procedimiento

En este estudio, se trabajó con audio monofónico (1 canal), formato PCM de 16 bits y una razón de muestreo de 22050 Hz, lo cual se determinó por medio del programa 6.1. Posteriormente, se crearon diversos archivos *.ipynb a partir de los cuales se desarrolló el código que corresponde a cada paso del programa final. Los resultados fueron el determinante para realizar modificaciones en las líneas de código, con el objetivo de aumentar la precisión en cada corrida. Es decir, si los resultados no eran los esperados, con una precisión de al menos el 90 %; se alteraban cualesquiera de los archivos de código en función de mejorar los mismos.

Inicialmente se ejecutó una prueba de extracción de características acústicas, específicamente los coeficientes cepstrales en la escala Mel

(MFCC), con apoyo de la librería librosa (6.2). De modo que si llegase a existir un error en la conversión del archivo de audio a un *.csv o *.npy, se pudiese detectar y corregir a tiempo.

En este programa de prueba se utilizó un archivo de audio (2022-06-05--19-39-14_2_segment2.wav), a partir del cual se obtuvo una matriz tiempo-frecuencia:

$$[\text{Time Frames}] \times [13 \text{ MFCC Coefficients}] ,$$

correspondiente a 13 coeficientes calculados por cada 25 milisegundos de audio, con un solapamiento del 50 % entre ventanas. A partir del cual se determinaron los parámetros para poder analizar los audios (*audio monofónico (1 canal), formato PCM de 16 bits y una razón de muestreo de 22050 Hz*, ver la Figura 3.1).

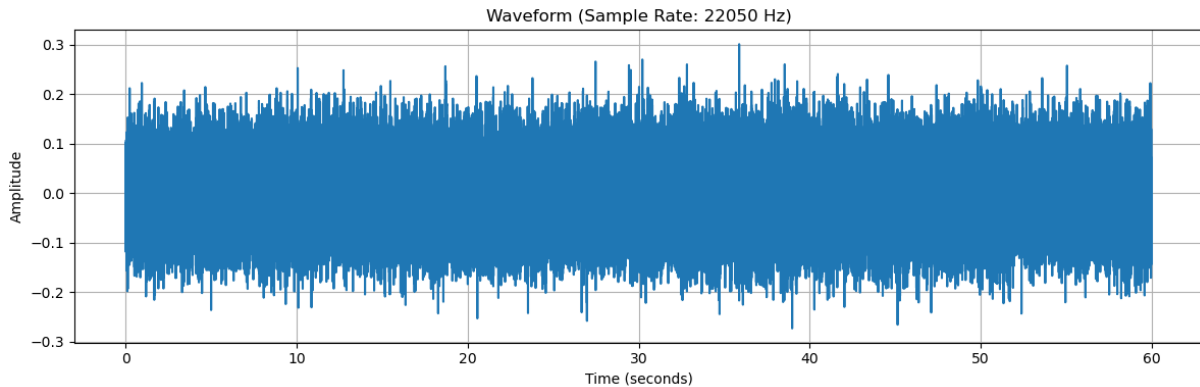


Figura 3.1: Forma de onda del archivo de audio 2022-06-05--19-39-14_2_segment2.wav.

Visto de otra forma, una frecuencia de muestreo de 22050 Hz indica que el audio se representó de forma discreta mediante 22050 muestras por segundo. A partir del análisis en Python, se observó que el archivo contiene un vector unidimensional (1D) de $N = 1,323,000$ muestras, por

lo que su duración aproximada es

$$N/f_s = 1323000/22050 \approx 60 \text{ segundos.}$$

Cada muestra corresponde a un valor numérico (en este caso almacenado como float32) que representa la amplitud instantánea de la señal

en ese instante de tiempo. En consecuencia, un archivo de audio puede interpretarse como una secuencia de valores que describe cómo varía la presión del aire (sonido) a lo largo del tiempo. Desde un enfoque matemático, la señal de audio discreta puede representarse como $x[n]$, definida como:

$$x[n] = \{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}, \quad n = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (3.1)$$

donde $x[n]$ representa la amplitud de la señal en el instante discreto n y N es el número total de muestras.

No obstante, para el entrenamiento de un modelo de aprendizaje profundo, esta representación temporal no siempre es la más conveniente, ya que dificulta capturar patrones espectro-temporales relevantes de forma eficiente. Por ello, se transforma la señal al dominio tiempo-frecuencia mediante el cálculo de espectros por ventanas (STFT), se proyecta su energía a bandas en escala Mel y se aplica una compresión logarítmica; posteriormente, se obtiene un conjunto compacto de descriptores mediante la Transformada Discreta del Coseno (DCT), resultando en los coeficientes cepstrales en escala Mel (MFCC). Estos coeficientes resumen la envolvente espectral y son ampliamente utilizados en el procesamiento de señales de audio. La secuencia de MFCC a lo largo del tiempo puede representarse como una matriz (análoga a una imagen) que preserva información espectral temporal, lo cual facilita el uso de redes neuronales convolucionales (CNN) para la tarea de clasificación.

3.1.1. 1er Programa

Bla bla bla

Estó porporcionó archivos que fueron exportados en formatos `.csv` y `.npz` para su posterior análisis.

3.2. Instrumentos

Para el proceso de recolección de datos, se empleó un dispositivo IoT diseñado a medida, que incluía un módulo Wi-Fi ESP32, un micrófono digital INMP441, y un sensor de temperatura y humedad BME280. Estos sensores se instalaron dentro de la cubierta telescópica de la colmena —por encima de los cuadros pero por debajo de la cubierta exterior—, y se protegieron con una malla metálica para evitar la interferencia de las abejas con los componentes electrónicos, especialmente el micrófono.

3.3. Base de Datos

El conjunto de datos utilizado en esta investigación fue grabado y publicado por Anna Yang[10]. Contiene datos de audio recolectados de colmenas de abejas melíferas europeas ubicadas en California. Las grabaciones fueron segmentadas en clips de 60 segundos, resultando en un total de 7,100 muestras recolectadas durante un período de cinco semanas, desde el 8 de junio de 2022 (14:52:28) hasta el 15 de julio de 2022 (15:28:21). Cada día contiene aproximadamente entre 23 y 24 muestras.

El conjunto de datos incluye múltiples variables de metadatos que describen el entorno de la colmena y la condición de la colonia. De particular relevancia para este trabajo se encuentran las siguientes etiquetas:

- 🔊 **queen acceptance:** indica si la reina es aceptada por la colonia. Valores: 0 (sin reina), 1 (presente pero no aceptada), 2 (aceptada).
- 🔊 **queen presence:** indica si la reina está físicamente presente en la colmena.
- 🔊 **queen status:** una etiqueta combinada derivada de las dos anteriores, con los siguientes valores: 0 (original/con reina funcional), 1 (no presente), 2 (presente y rechazada), 3 (presente y recién aceptada). Esta es la etiqueta principal utilizada para la clasificación.

⌚ **time:** hora del día, escalada entre 0 y 1 para representar un ciclo de 24 horas.

El proceso de etiquetado se basó en inspecciones manuales diarias de las colmenas, durante las cuales se observó el comportamiento de las abejas hacia la reina (por ejemplo, formación

de enjambre o conducta tranquila). En aquellos casos en los que el estado de la reina cambió entre inspecciones, generando ambigüedad sobre el momento exacto de aceptación, las muestras correspondientes fueron descartadas para mantener la integridad del etiquetado.

4. RESULTADOS

5. DISCUSIÓN

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

La abjea reina es un elemento crucial para la supervivencia de la colonia, y su presencia o ausencia puede influir significativamente en el comportamiento de las abejas, siendo una posibilidad el extinguir la existencia de la colmena.

Bibliografía

- [1] Sofía de León Guedes, Estela Santos, Arnaldo Moreni et al. «Calidad nutricional del polen de colza (*Brassica napus*) y determinación de la flora apícola acompañante para las abejas melíferas». En: (2023).
- [2] ML Winston. *Temperate and Tropical Honey Bees in The Biology of the Honey Bee*. 214–224. 1987.
- [3] M. Beekman y F. L. W. Ratnieks. «Long-range foraging by the honey-bee, *Apis mellifera* L». En: *Functional Ecology* 14 (2000), págs. 490-496. DOI: [10.1046/j.1365-2435.2000.00443.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2000.00443.x).
- [4] Stenford Ruvinga et al. «Use of LSTM networks to identify “queenlessness” in honeybee hives from audio signals». En: *2021 17th International Conference on Intelligent Environments (IE)*. IEEE. 2021, págs. 1-4.
- [5] Zhengwei Wang et al. «Encoding and decoding of the information in the honeybee waggle dance». En: *Behavioral Ecology and Sociobiology* 79.5 (2025), pág. 53.
- [6] Brian R Johnson. «Division of labor in honeybees: form, function, and proximate mechanisms». En: *Behavioral ecology and sociobiology* 64 (2010), págs. 305-316.
- [7] Hichem Maaref y Dominique Fourer. «Remote Beehive Health Analysis using Embedded System and Relevant Audio Features». En: ().
- [8] D Hunter y K Stebel. «Signal processing the acoustics of honeybees (*Apis Mellifera*) to identify the ‘Queenless’ state in hives». En: *Proceedings of the Institute of Acoustics* 35.1 (2013), pág. 290.
- [9] Stenford Ruvinga et al. «Identifying queenlessness in honeybee hives from audio signals using machine learning». En: *Electronics* 12.7 (2023), pág. 1627.
- [10] Anna Yang. *Smart Bee Colony Monitor: Clips of Beehive Sounds*. <https://www.kaggle.com/datasets/annajyang/beehive-sounds>. [Online; accessed 29-April-2025]. 2023.

APÉNDICE A

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from scipy.io import wavfile
4
5 # cargar archivo de audio
6 sr, audio = wavfile.read('2022-06-08--14-52-28_1__segment3.wav')
7
8 # normalizar si es int16
9 if audio.dtype == np.int16:
10     audio = audio.astype(np.float32) / np.iinfo(np.int16).max
11
12 # crear eje de tiempo
13 duration_sec = len(audio) / sr
14 time_axis = np.linspace(0, duration_sec, num=len(audio))
15
16 # graficar la onda
17 plt.figure(figsize=(12, 4))
18 plt.plot(time_axis, audio)
19 plt.title(f'Onda (Sample Rate: {sr} Hz)')
20 plt.xlabel('Tiempo (segundos)')
21 plt.ylabel('Amplitud')
22 plt.grid(True)
23 plt.tight_layout()
24 plt.show()
```

Listing 6.1: Visualización de la forma de onda de un archivo de audio.

APÉNDICE A (continuación)

```
1 import librosa
2 import numpy as np
3 import pandas as pd
4 import os
5
6 # CONFIG
7 audio_path = '<<archivo>>'
8 sample_rate = 22050
9 n_mfcc = 13
10
11 # CARGAR ARCHIVO
12 y, sr = librosa.load(audio_path, sr=sample_rate)
13
14 # EXTRAER MFCCs
15 mfccs = librosa.feature.mfcc(y=y, sr=sr, n_mfcc=n_mfcc)
16
17 # Transponer de modo que la forma resultante es: [frames x coefficients]
18 mfccs = mfccs.T
19
20 # Guardar en CSV
21 base_name = os.path.splitext(os.path.basename(audio_path))[0]
22 csv_output_path = f'{base_name}_mfcc.csv'
23 np_output_path = f'{base_name}_mfcc.npy'
24
25 pd.DataFrame(mfccs).to_csv(csv_output_path, index=False)
26
27 # 0, guardar como un archivo binario de numpy
28 np.save(np_output_path, mfccs)
29
30 print(f'MFCCs en:\n- CSV: {csv_output_path}\n- NPY: {np_output_path}')
31 print(f'MFCCs forma: {mfccs.shape} to [frames x {n_mfcc}']')
```

Listing 6.2: Prueba para extracción de características.

APÉNDICE A (continuación)

```
1 import os
2 import librosa
3 import numpy as np
4 import pandas as pd
5
6 # CONFIG
7 audio_folder = '<<arch. *.wav>>'
8 output_folder = '<<dir. guardar archs. npy>>'
9 csv_path = '<<arch. *.csv>>'
10 sample_rate = 22050
11 n_mfcc = 13
12
13 # Crear una carpeta de salida en caso de que no exista
14 os.makedirs(output_folder, exist_ok=True)
15
16 # Cargar info de etiquetas
17 labels_df = pd.read_csv(csv_path)
18 labels_df['file name'] = labels_df['file name'].str.strip()
19 labels_df.set_index('file name', inplace=True)
20
21 # Guardar el enlace con las etiquetas
22 metadata = []
23
24 # Procesando cada archivo de audio
25 for filename in os.listdir(audio_folder):
26     if filename.endswith('.wav'):
27         try:
28             file_path = os.path.join(audio_folder, filename)
29             y, sr = librosa.load(file_path, sr=sample_rate)
30             mfcc = librosa.feature.mfcc(y=y, sr=sr, n_mfcc=n_mfcc)
31             mfcc = mfcc.T # Shape: [frames, 13]
32
33             # Guardar matriz MFCC como .npy
34             npy_name = filename.replace('.wav', '_mfcc.npy')
35             np.save(os.path.join(output_folder, npy_name), mfcc)
36
37             # Vincular con la etiqueta usando el nombre del archivo sin el segmento
38             raw_key = filename.split('__')[0] + '.raw'
39             label = labels_df.loc[raw_key]['queen status'] if raw_key in labels_df.index else None
40
41             metadata.append({'file_name': filename, 'mfcc_file': npy_name, '

```



```
    queen_status': label}}
42
    except Exception as e:
43        print(f'Error processing {filename}: {e}')
44
45
46 # Guardar archivo de metadatos
47 pd.DataFrame(metadata).to_csv('mfcc_metadata.csv', index=False)
48
49 print(f'{len(metadata)} archivos han sido procesados. MFCCs guardados en '{
    output_folder}')
```

Listing 6.3: Extracción de características.