



## **Análisis de frecuencias de resonancia en jitomates para determinar su estado de maduración**

### **Resonance frequency analysis to determine the ripening stage of tomatoes**

Erick Rojas Mancera<sup>1</sup>  
erick.rm@purisima.tecnm.mx  
ORCID 0000-0002-5965-912

José Ruiz Tamayo<sup>2</sup>  
jose.rt@purisima.tecnm.mx  
ORCID 0000-0002-4837-369

Rosa Jazmín Trasviña Osorio<sup>3</sup>  
rosa.to@purisima.tecnm.mx  
ORCID 0000-0003-0895-2009

Antonio de Jesús Balvantín García<sup>4</sup>  
antonio.balvantin@ugto.mx  
ORCID 0000-0002-0781-1549

Recibido: 10/9/2024; Aceptado: 4/1/2025

#### **Resumen**

Recientemente se ha estudiado los beneficios de consumir frutas y vegetales frescos que no estén en estado de descomposición (estado de maduración). Los análisis de frecuencias se han aplicado ampliamente en diferentes áreas de investigación, como acústica, vibraciones mecánicas, señales electrónicas, entre otros, con resultados satisfactorios. Este trabajo se basa en implementar un método de evaluación no destructiva basada en vibraciones (sonido)

<sup>1</sup> Doctorado en Ciencias en Robótica y Manufactura Avanzada, Tecnológico Nacional de México/ITS de Purísima del Rincón, México

<sup>2</sup> Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México/ITS de Purísima del Rincón, México.

<sup>3</sup> Maestría en Ciencias y Tecnología en Ingeniería Industrial, Tecnológico Nacional de México/ITS de Purísima del Rincón, México.

<sup>4</sup> Doctorado en Ciencias en Robótica y Manufactura Avanzada, Universidad de Guanajuato, México.

identificando las frecuencias naturales de resonancia de los jitomates o tomate rojo para estimar su dureza. Con el análisis de dureza se identifica la pertinencia del consumo (maduración) de jitomates o tomate rojo. Además de desarrollar un dispositivo basado en Arduino para obtener datos de las frecuencias de resonancia de los jitomates.

**Palabras clave:** Frecuencia de resonancia, evaluación no destructiva, jitomate o tomate.

### **Abstract**

Recent research has proved the benefits of eating fresh fruit and vegetables, avoiding its breakdown stage. Frequency analysis has been used in different research areas, acoustic, vibrations, electronic signals, among others, with satisfactory results. The implementation of a nondestructive method based on acoustic vibrations, to identify natural resonance frequency and estimate tomato stiffness is proposed. Using the stiffness analysis can be determined if the tomato can be consumed. Additionally, an acquisition data system is developed based on Arduino to obtain measurements from tomato.

**Keywords:** resonance frequency, non-destructive evaluations, tomato.

---

### **▪ Introducción**

El sonido está compuesto por vibraciones que se propagan en forma de ondas a través de diferentes medios.

El sonido puede ser generado de diferentes maneras, por ejemplo, en una guitarra se hacen vibrar las cuerdas para genere un sonido, y que nosotros escuchamos debido a que se propagan en el aire y hacen que el tímpano vibre y transmite estas vibraciones a tres huesecillos diminutos del oído (martillo, yunque y estribo), y se convierten en señales eléctricas que van a cerebro y que las convierte en información que podemos reconocer y entender.

### **Frecuencia de resonancia y su análisis**

Los objetos con propiedades mecánicas elásticas, al momento de ser golpeados con una fuerza específica generan desplazamientos, que pueden generar un sonido que puede ser medido con un micrófono y convierten el sonido en señales eléctricas que podemos cuantificar y analizar. La frecuencia de resonancia es la

vibración natural de los objetos al ser golpeados. Esta vibración es particular de cada objeto que depende de las propiedades mecánicas del objeto (Zhang, Wang, Zheng, Guo, &

Shan, 2021), (Adedeji, et al., 2020), (Hiruta, et al., 2021). Con el procesamiento de la señal digitalizada utilizando métodos estadísticos y matemáticos se pueden encontrar patrones o características especiales de los objetos (Mesaros, Heittola, Virtanen, & Plumbley, 2021), (Steiglitz, 2020).

La frecuencia de resonancia ha sido usada para identificar propiedades mecánicas de diferentes materiales. Por ejemplo, para identificar cuando es prudente recolectar ciertos tipos de frutas (Xuan, Xu, Liu, & Zhou, 2020), (Ding, Feng, Wnag, Cui, & Li, 2021), (He, et al., 2022).

Los análisis de frecuencias se han aplicado ampliamente en diferentes ámbitos, desde el sonido, señales eléctricas, análisis de vibraciones, entre otros, con resultados satisfactorios. Existen diferentes técnicas para procesamiento de señales digitalizadas del sonido. Una de las más usadas es la transformada de Fourier (Wang, Chen, Shen, Zhong, & Li, 2022), (Hwang, Kuo, Baskota, & Lal, 2024), (Konno, Dobroiu, Suzuki, Asada, & Ito, 2021), (Zhou & Lu, 2021). Bobadilla, J., Gómez, P., y Bernal, J. (1999) emplearon la Transformada de Fourier para convertir señales del dominio temporal al dominio de la frecuencia, permitiendo el estudio de las voces de acuerdo con los patrones que presentan los sonogramas, y proporcionaron una demostración matemática útil para quienes se interesan en el formalismo de la transformada de Fourier (Bernal, Gómez, & Bobadilla, 1999).

Pinares, R., Machaca, V., Lozano, F., Quispe, A., Ccopa, R., y Calsin, B. (2023) usaron espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para comparar la fibra de vicuña de Puno y Apurímac, descubriendo que, aunque las fibras químicamente similares, presentaban diferencias en intensidad de color, intensidad de fibra y modulación (Pinares, et al., 2023). Jaramillo Chamba, D., y Chuquimarca Jiménez, L. (2022) desarrollaron una técnica computacional para el análisis de una senoide, la identificación de un sistema Filtro de respuesta al Impulso (FIR, por sus siglas en inglés) y el análisis espectral de señales de

audio, validando los algoritmos desarrollados para el análisis de señales digitales (Jaramillo Chamba & Chuquimarca Jiménez, 2022).

### **Importancia del tomate rojo o jitomate**

El tomate rojo, también llamado jitomate, desempeña un papel significativo en el país, siendo de los frutos más ampliamente cultivados en todo el territorio nacional. Su producción ha experimentado un incremento constante en la última década, atribuido a diversos factores como la introducción de nuevos tipos y variedades, avances tecnológicos en los métodos de cultivo y un aumento general en la demanda de hortalizas, entre otros aspectos. Además, México es de los principales exportadores a nivel mundial de tomate fresco, lo cual subraya la relevancia de este cultivo en el ámbito agrícola.

En 2017, México exportó casi 1,600,000 toneladas de jitomate (SAGARPA, 2018). Estados Unidos es el principal consumidor del jitomate mexicano, otros consumidores son Canadá y Europa.

En 2020, México se posicionó como el 10° productor de alimentos a nivel mundial, siendo como principales productos el tomate (jitomate), aguacate, limón, chile verde, entre otros (SDAyR, 2021).

En Guanajuato, el 75.1 % del sector primario se dedica a la agricultura (SDAyR, 2021), esto muestra la importancia que tiene en la economía del estado. Otro dato importante para considerar es la ubicación agro-logística con la cuenta el estado de Guanajuato, esto impulsa el desarrollo y la exportación de productos agrícolas.

Por otro lado, el desperdicio de alimentos en México es un problema que ha crecido en los últimos años. En un estudio realizado por el Banco Mundial y la SEMARNAT publicado en diciembre de 2017, se mostró que 20 millones 400 mil toneladas de alimentos se desperdician, lo cual representa una gran pérdida monetaria. En este estudio se mostró que en México se pierde en el 25% y 30% del jitomate y cuando el precio cae por cuestiones internacionales y nacionales, se desperdicia hasta un 50% (SEMARNAT, 2017) (Becerril & Ballinas, 2017).

## **Análisis de frecuencia de resonancia del jitomate**

El procesamiento de la frecuencia de resonancia golpeando en diferentes partes del jitomate y determinar si genera una frecuencia similar en cada punto que es golpeado (De Ketelaere & De Baerdemaeker, 2001). Diferentes condiciones física y biomecánicas se han estudiado del jitomate, en diferentes condiciones ambientales, y con la aplicación de compuestos orgánicos como el Jasmonato de metilo (MeJa), y analizar los afectos de jitomates tratados y sin tratar con este componente, usando la frecuencia de resonancia (Baltazar, Espina-Lucero, Ramos-Torres, & Gonzá 'lez- Aguilar, 2007). Implementación de clasificadores Bayesianos, basados en el análisis de la rigidez de los jitomates usando la frecuencia de resonancia han sido estudiados (Aranda-Sanchez, Baltazar, & González-Aguilar, 2009).

En este trabajo, se calculó la rigidez de los jitomates usando su masa y el análisis de frecuencias de resonancia de los jitomates utilizando la transformada de Fourier. Además, desarrolló la adquisición de datos utilizando Arduino UNO y un micrófono KY-037, presentando los resultados en un espectro de frecuencias.

---

### **Metodología**

#### **▪ Transformada de Fourier**

Para el análisis de los datos se usó la transformada de Fourier. La transformada de Fourier es una operación matemática que sirve para identificar las frecuencias contenidas en una señal. Convierte señales en el dominio del tiempo o espacio, al dominio de la frecuencia (Cordero & Rodino, 2020) (Salah, Amine, Redouane, & Fares, 2021).

Si  $x(t)$  es la función original, su transformada  $X(f)$  será como se muestra en la Ec. (1):

(1)

donde  $f$  es la frecuencia.

#### **Rigidez del jitomate**

El análisis de la frecuencia de resonancia se ha utilizado como método de evaluación no destructiva mostrando ser una herramienta útil para analizar vibraciones, por ejemplo, en el área automotriz para analizar las fuentes de vibraciones e identificar la frecuencia de resonancia natural de partes en los vehículos (SHI & WU, 2016) (Tian & Xu, 2023).

Este análisis se puede extender a cualquier otro objeto que tenga las propiedades físicas para que al ser golpeado con una fuerza similar a la función delta de Dirac, pueda generar una frecuencia de resonancia.

En el caso de los jitomates, se han realizado diferentes investigaciones analizando la frecuencia de resonancia al golpear un jitomate, se ha analizado cómo afecta la forma del jitomate en la frecuencia de resonancia y además su rigidez que está correlacionada con la maduración del jitomate.

La rigidez puede ser calculada de la siguiente manera usando la frecuencia más alta de resonancia de los jitomates analizados:

(2)

donde  $m$  es la masa del jitomate y  $f$  es la frecuencia de resonancia (Langenakens, Vandewalle, & De Baerdemaeker, 1997) (Hiruta, Hosoya, Maeda, & Kajiwara, 2021).

### **Adquisición de datos**

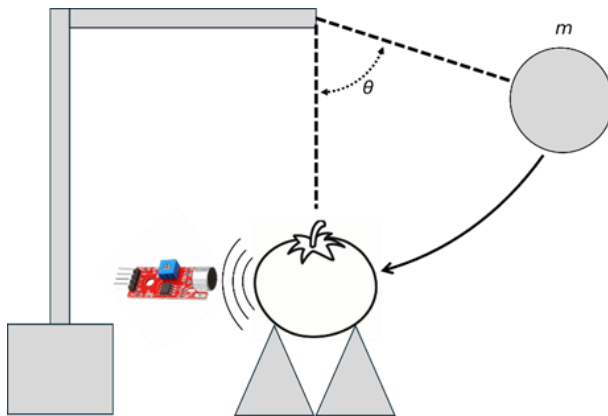
Para la adquisición de datos se utilizó un Arduino UNO (Yu, Wang, & Dong, 2020), (Tupac-Yupanqui, et al., 2022) y el sensor KY-037 (Pramudya, 2024).

La metodología que se siguió para la adquisición de datos es la siguiente:

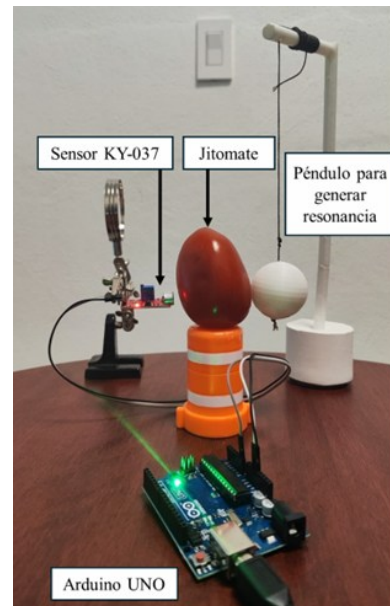
1. Conectar el sensor KY-037 en la entrada analógica del Arduino UNO.
2. Conectar el Arduino UNO a la computadora y cargar el código para la adquisición de datos.
3. Golpear los jitomates como se muestra en la Figura 1a para adquirir los datos con el sensor KY-037.

4. Procesar los datos y obtener su máxima frecuencia de resonancia para multiplicarla por su masa y obtener la rigidez del jitomate.

La Figura 1b, muestra el sistema experimental real para la adquisición de datos usando el sensor KY-037 y el Arduino UNO. El jitomate es golpeado con la esfera impresa con PLA.



a)



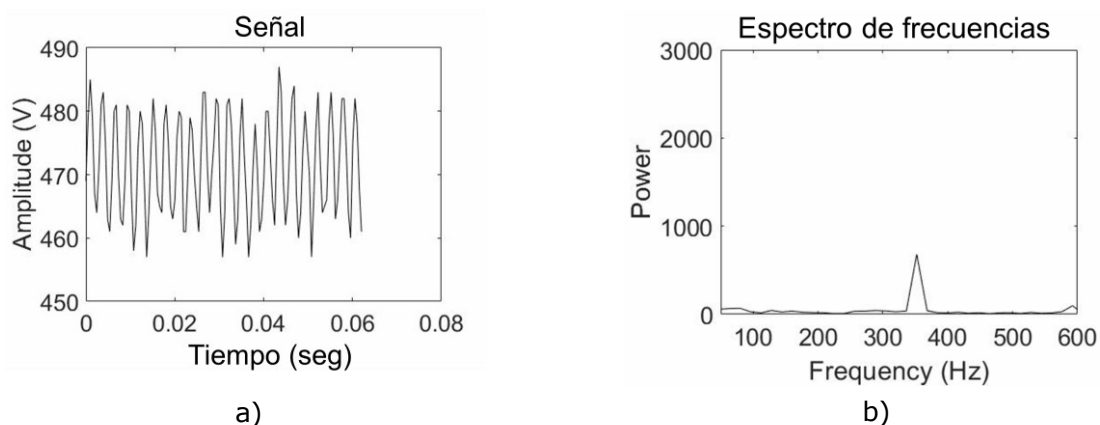
b)

**1 Figura 1: Sistema experimental a) esquema y b) foto.**

## Resultados y Discusión

Para probar el sistema experimental de adquisición de datos se realizaron varias pruebas con sonidos a frecuencias específicas. Esto se realizó para caracterizar el sensor KY-037 y el Arduino UNO. En la Figura 2 a) y b) se muestra la señal digitalizada de un sonido generado a 350 Hz, y su espectro de frecuencias obtenido de procesar la señal con la transformada de Fourier, respectivamente. Como se puede observar el espectro de frecuencias corresponde a la frecuencia del sonido generado con dicha frecuencia.

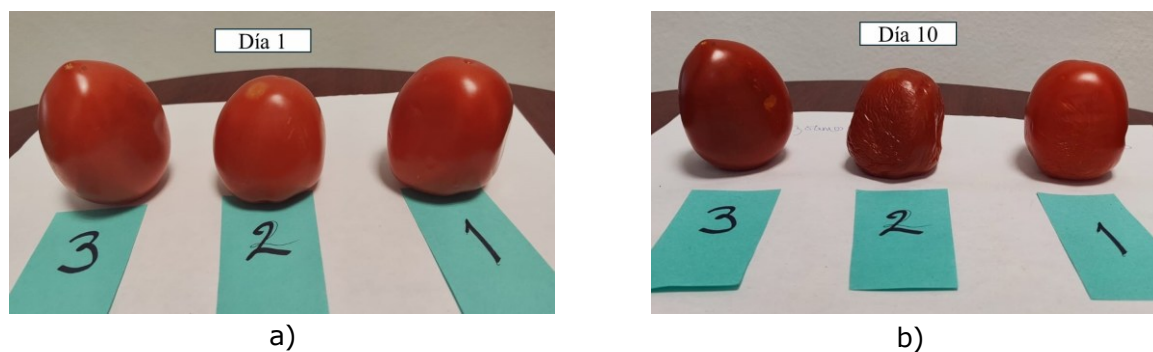
Fuente: elaboración propia



**Figura 2: a) Señal digitalizada de sonido a 350 Hz, b) Espectro de frecuencias de la señal.**

Para obtener las frecuencias de resonancia se usaron tres jitomates de la variedad Saladette. En la Figura 3 a) y b), se muestran los jitomates en el día 1 y 10, respectivamente. Tres veces se tomaron datos golpeando los jitomates, en los días 1, 5 y 10.

Fuente: elaboración propia



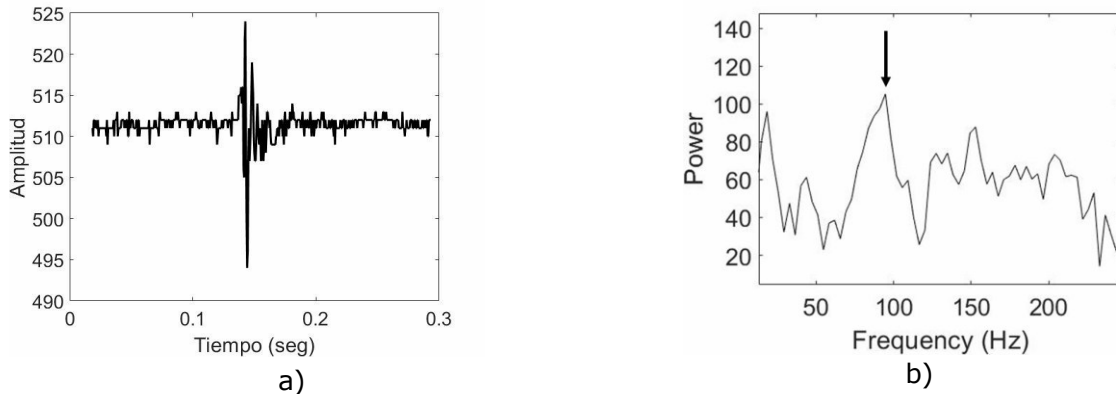
**Figura 3: a) Día 1 de las pruebas de los jitomates, b) Día 10 de la última prueba.**

En la Figura 4 a) y b) se muestra una señal digitalizada del sonido generado al golpear el jitomate, y su espectro de frecuencias generado a partir de implementar la transformada de Fourier, respectivamente. Como se



puede observar la frecuencia más alta en la Figura 4 b), está marcada con una flecha, esta frecuencia y la masa del jitomate es usada en la ecuación 2, para obtener la rigidez del jitomate que es asociada a la madurez del jitomate.

Fuente: elaboración propia



**Figura 4: a) señal digitalizada del sonido generado al golpear el jitomate, b) espectro de frecuencias de la señal digitalizada en a).**

En la Figura 5 se muestra el coeficiente de rigidez de los tres jitomates. Se puede observar que conforme el tiempo en días transcurre, el coeficiente de rigidez de los jitomates disminuye. Y la rigidez disminuye debido su estado de descomposición natural. Esto es directamente proporcional a su frecuencia de resonancia natural. Al ir perdiendo rigidez, su frecuencia natural de resonancia se va modificando.

Fuente: elaboración propia

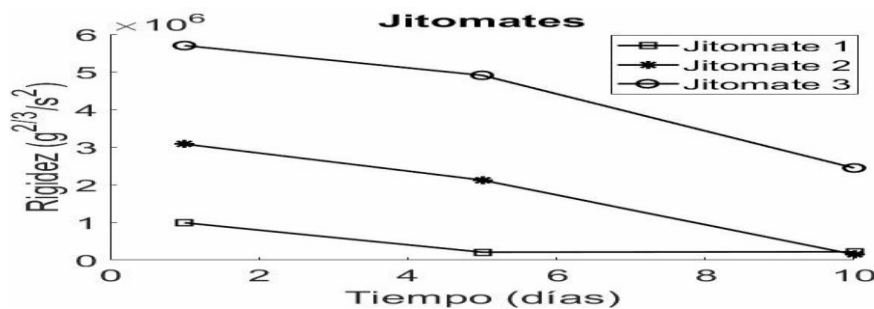


Figura 5: Coeficiente de rigidez de los tres jitomates.

---

## Conclusiones

La implementación de un sistema de evaluación no destructiva para determinar la madurez de los jitomates basado en su frecuencia natural de resonancia puede ayudar a tener de manera cuantificable su estado de maduración. Además, de ser un método sencillo y económico al usar elementos como el Arduino UNO y sensores para la adquisición de datos. Como trabajo futuro, se puede mejorar el sistema de adquisición de datos, así como el de evaluar nuevas variedades de vegetales o frutas. Otra línea de investigación sería evaluar la capacidad que tienen las películas para recubrimientos de los vegetales o frutos para evitar su degradación. Basado en la frecuencia de resonancia natural.

---

## Referencias bibliográficas

- Adedeji, A., Ekramirad, N., Rady, A., Hamidisepehr, A., Donohue, K., Villanueva, R., & Li, M. (2020). Non-destructive technologies for detecting insect infestation in fruits and vegetables under postharvest conditions: A critical review. *Foods*, 9(7), 927.
- Aranda-Sanchez, J., Baltazar, A., & González-Aguilar, G. (2009). Implementation of a Bayesian classifier using repeated measurements for discrimination of tomato fruit ripening stages. *Biosystems engineering*, 102(3), 274-284.
- Baltazar, A., Espina-Lucero, J., Ramos-Torres, I., & González-Aguilar, G. (2007). Effect of methyl jasmonate on properties of intact tomato. *fruit monitored with destructive and nondestructive tests*, 80(4), 1086-1095.
- Becerril, A., & Ballinas, V. (2017, 12 17). *En México se desperdician al año 20.4 millones de toneladas de alimentos*. Retrieved from La Jornada: <https://www.jornada.com.mx/2017/11/17/sociedad/043n1soc>
- Bernal, J., Gómez, P., & Bobadilla, J. (1999). Una visión práctica en el uso de la Transformada de Fourier como herramienta para el análisis espectral de la voz. *Estudios de fonética experimental*, 10, 75-105.
- Cordero, E., & Rodino, L. (2020). *Time-frequency analysis of operators* (Vol. 75). Torino: Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- De Ketelaere, B., & De Baerdemaeker, J. (2001). Tomato firmness estimation using vibration measurements. *Mathematics and Computers in Simulation*, 56(4-5), 385-394.
- Ding, C., Feng, Z., Wnag, D., Cui, D., & Li, W. (2021). Acoustic vibration technology: Toward a promising fruit quality detection method. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(2), 1655-1680.
- He, Y., Xiao, Q., Bai, X., Zhou, L., Liu, F., & Zhang, C. (2022). Recent progress of nondestructive techniques for fruits damage inspection: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(20), 5476-5494.

- Hiruta, T., Hosoya, N., Maeda, S., & Kajiwara, I. (2021). Experimental evaluation of frequency response and firmness of apples based on an excitation technique using a dielectric elastomer actuator. *Sensors and Actuators A: Physical*, *330*, 112830.
- Hiruta, T., Sasaki, K., Hosoya, N., Maeda, S., Kajiwara, & I. (2021). Firmness evaluation of postharvest pear fruit during storage based on a vibration experiment technique using a dielectric elastomer actuator. *Postharvest Biology and Technology*, *182*, 111697.
- Hwang, J., Kuo, J., Baskota, A., & Lal, A. (2024). Sonic Fourier Transform Imaging Using GHz Ultrasonic Transducer Array. In *2024 IEEE 37th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* (pp. 128-131). IEEE.
- Jaramillo Chamba, D., & Chuquimarca Jiménez, L. (2022). Estudio comprensivo de la Transformada de Fourier Discreta para el análisis de señales digitales. *Revista Científica y Tecnológica UPSE (RCTU)*, *9*(1), 75-84.
- Konno, H., Dobroi, A., Suzuki, S., Asada, M., & Ito, H. (2021). Discrete fourier transform radar in the terahertz-wave range based on a resonant-tunneling-diode oscillator. *Sensors*, *21*(13), 4367.
- Langenakens, J., Vandewalle, X., & De Baerdemaeker, J. (1997). Influence of global shape and internal structure of tomatoes on the resonant frequency. *Journal of agricultural engineering research*, *66*(1), 41-49.
- Mesaros, A., Heittola, T., Virtanen, T., & Plumbley, M. (2021). Sound event detection: A tutorial. *IEEE Signal Processing Magazine*, *38*(5), 67-83.
- Pinares, R., Machaca, V., Lozano, F., Quispe, A., Ccopa, R., & Calsin, B. (2023). Comparaciones de la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), parámetros colorimétricos y porcentaje de modulación en fibra de vicuña. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, *34*(4).
- Pramudya, Y. (2024). A Comparative Study of Sound Resonance Using Arduino-Based Ultrasonic Sensors and Visualization Analysis with Python. *Jurnal Materi dan Pembelajaran Fisika*, *14*(2), 72-80.
- SAGARPA. (2018, 01 15). SIAP. Retrieved from Gobierno de México: <https://www.gob.mx/siap>
- Salah, E., Amine, K., Redouane, K., & Fares, K. (2021). Fourier transform based audio watermarking algorithm. *Applied Acoustics*, *172*, 107652.
- SDAyR. (2021). *Diagnóstico Agrologístico del Estado de Guanajuato*. Guanajuato: Gobierno del Estado de Guanajuato. SEMARNAT. (2017, 12 07). *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Retrieved from Gobierno de México: <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/impulsa-semarnat-estrategia-nacional-para-evitar-desperdicio-de-alimentos?idiom=es>
- SHI, H., & WU, P. (2016). Flexible vibration analysis for car body of high-speed EMU. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *30*, 55-66.
- Steiglitz, K. (2020). *Digital Signal Processing Primer*. New York: Dover Publications, Inc.
- Tian, S., & Xu, H. (2023). Mechanical-based and optical-based methods for nondestructive evaluation of fruit firmness. *Food Reviews International*, *7*, 4009-4039.
- Tupac-Yupanqui, M., Vidal-Silva, C., Pavesi-Farriol, L., Ortiz, A., Cardenas-Cobo, J., & Pereira, F. (2022). Exploiting Arduino features to develop programming competencies. *IEEE Access*, *10*, 20602-20615.
- Wang, D., Chen, Y., Shen, C., Zhong, J., & Li, C. (2022). Fully interpretable neural network for locating resonance frequency bands for machine condition monitoring. *Systems and Signal Processing*, *168*, 108673.

- Xuan, Y., Xu, L., Liu, G., & Zhou, J. (2020). The vibrational response of simulated Ginkgo biloba fruit based on their frequency spectrum characteristics. *PLoS One*, *15*(7), e0235494.
- Yu, S., Wang, B., & Dong, L. (2020). Study on micro force sensor and its signal acquisition system based on Android and Arduino. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, *15*(9), 1384-1389.
- Zhang, J., Wang, J., Zheng, C., Guo, H., & Shan, F. (2021). Nondestructive evaluation of Chinese cabbage quality using mechanical vibration response. *Computers and Electronics in Agriculture*, *188*, 106317.
- Zhou, J., & Lu, W. (2021). Numerical analysis of resonances by a slab of subwavelength slits by Fourier-matching method. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, *59*(4), 2106-2137.