

ENSAYO NO DESTRUCTIVO PARA LA DETECCIÓN DE DEFECTOS INTERNOS EN SANDÍAS

PACS: 46.40.-f.

Simón-Portillo, Francisco J.¹; Abellán López, David²; Fabra Rodríguez, Miguel³; Peral-Orts, Ramón⁴; Sánchez Lozano, Miguel⁵;

¹Universidad Miguel Hernández, Avda. Universitat sn., 03203, Elche, España, 966652193, f.simon@umh.es.

²Universidad Miguel Hernández, Avda. Universitat sn., 03203, Elche, España, 966658991, dabellan@umh.es.

³Universidad Miguel Hernández, Avda. Universitat sn., 03203, Elche, España, 966658861, mfabra@umh.es.

⁴Universidad Miguel Hernández, Avda. Universitat sn., 03203, Elche, España, 966658579, ramon.peral@umh.es.

⁵Universidad Miguel Hernández, Avda. Universitat sn., 03203, Elche, España, 966652194, msanchez@umh.es.

Palabras Clave: sandía, detección de defectos, ensayo no destructivo, vibraciones, huecos.

ABSTRACT.

Internal hollows in watermelons affect the quality and taste of the pulp. The detection of fruit internal defects should be carried out before the fruit reaches the consumer. Currently, there isn't reliable automated internal defect detection methods. The objective of this research is to develop an automatable and reliable test procedure for the detection of internal hollows in watermelons. The first step is to study which vibrational parameters of watermelon, when subjected to a slight impact, can be used as predictors of internal defects. The relationship between these parameters and the existence of internal defects has been analysed.

RESUMEN.

Los huecos internos en las sandías afectan la calidad y el sabor de la pulpa. La detección de los defectos internos debe realizarse antes de que la fruta llegue al consumidor. Actualmente, no existen métodos automatizados confiables de detección de defectos internos. El objetivo de esta investigación es desarrollar un procedimiento de ensayo automatizable para la detección de huecos en sandías. El primer paso es estudiar qué parámetros vibratorios de la sandía, cuando se someten a un ligero impacto, pueden utilizarse como predictores de defectos internos. Se ha analizado la relación entre estos parámetros y la existencia de defectos internos.

1. INTRODUCCIÓN

La presencia de huecos en las sandías afecta a la textura interna de la sandía, a su "frescura" y a su sabor. Estas sandías defectuosas son devueltas y no cobradas generando costes, reclamaciones y pérdida de confianza del cliente. Los huecos en el centro de la sandía llegan en algunos casos al 50% del volumen interior de la sandía y puede ocasionarse por un crecimiento irregular de la sandía entre el centro y el exterior. Esto puede producirse cuando las condiciones durante el crecimiento alternan de húmedo a seco o cuando hay grandes cambios de temperatura. Un riego o fertilización con nitrógeno excesivo también puede producir este tipo de defectos [1].

La puesta en el mercado de sandías huecas supone un coste adicional para los productores. Las sandías no pueden ser inspeccionadas de forma invasiva (o destructiva) por lo que múltiples proyectos de investigación han sido llevados a cabo con el objetivo de encontrar un método de inspección no destructivo. Algunos de estos métodos se basan en técnicas vibraciones y/o acústicas. En las líneas de envasado e incluso en el propio campo suele haber personas especialistas encargadas de hacer un primer cribado de sandías con defectos internos utilizando este mismo método manual.

Automatizar un método de detección de defectos internos basado en técnicas vibratoriales presenta ciertas dificultades. En primer lugar, la frecuencia y la magnitud con la que un objeto responde ante una excitación vibratoria depende de su elasticidad, densidad, tamaño y forma. Estas propiedades son muy variables dentro de un mismo lote de sandías y dependen de factores como tiempo de maduración, nivel de agua, espesor de la corteza, etc. De hecho, múltiples estudios intentan determinar en nivel de maduración de las sandías a partir de técnicas vibratorias, encontrando relación entre las propiedades de masa y frecuencias naturales de la sandía con el nivel de maduración [2] [3] [4].

En segundo lugar, sandías de una misma variedad cultivadas en una misma zona y temporada pueden presentar huecos internos de muy variadas geometrías y tamaños. En la Figura 1 se muestran varias sandías con distintos tipos de defecto internos. Cómo afectarán estos huecos a las características vibratoriales de la sandía en función de su forma y tamaño supone un reto que todavía no ha sido resuelto. No obstante, existen algunos trabajos que emplean técnicas numéricas como el Método de los elementos finitos para intentar predecir la esta relación [5] [6].

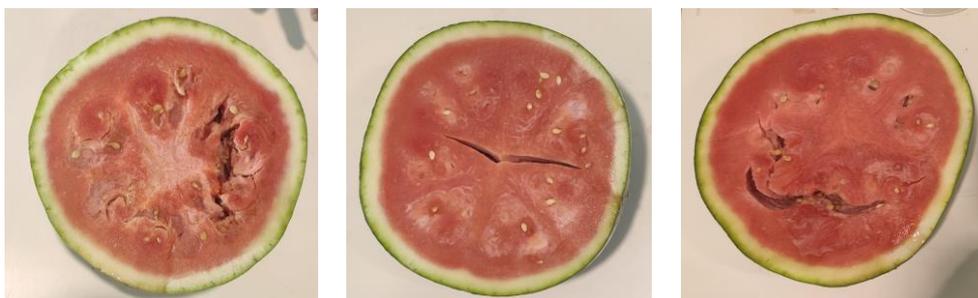


Figura 1 – Ejemplos de sandías con huecos internos.

En este trabajo se presenta un primer análisis de que parámetros vibratoriales y propiedades físicas de las sandías pueden utilizarse como predictores de la existencia de defecto interno en sandías. Se ha sometido las sandías a una serie de impactos de baja intensidad en el laboratorio y se han analizado estadísticamente los resultados de aceleración.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ensayos en laboratorio

Se analizaron un total de 55 sandías de las variedades rayada y negra, ambas sin pepitas, recolectadas entre mayo y junio de 2021. Parte de la muestra fue extraída del grupo de sandías que previamente habían sido clasificadas como huecas de forma manual por operarios en el almacén de la empresa Agrícola Navarro de Haro, S.L. para tener mayor número de sandías con defectos. Por este motivo en los resultados aparecerán una mayor proporción de sandías huecas que las que habitualmente son detectadas durante la recolección.

Las sandías fueron almacenadas en una sala acondicionada a 25° C durante un mínimo de 24 horas. Antes del ensayo vibratorio cada sandía fue pesada y medida. En concreto se realizaron

medidas de dos perímetros de la sandía para así poder estimar su volumen. Para dicha estimación se aproximó la forma de la sandía a un elipsoide de revolución.

Posteriormente cada sandía se suspendió en una malla de masa despreciable en relación a la de la sandía. La malla estaba colgada a su vez de un punto a 1.5 metros sobre la sandía. La pieza se posicionaba con el pedículo en posición horizontal y se colocó un acelerómetro uniaxial modelo PCB 601A01 en la parte superior de la fruta. La unión entre el acelerómetro y la piel de las sandías se lograba mediante uso de cinta adhesiva de doble cara. La zona de adhesión era previamente limpiada con alcohol. En la Figura 2 se muestra un ejemplo del posicionamiento de la sandía antes del ensayo.

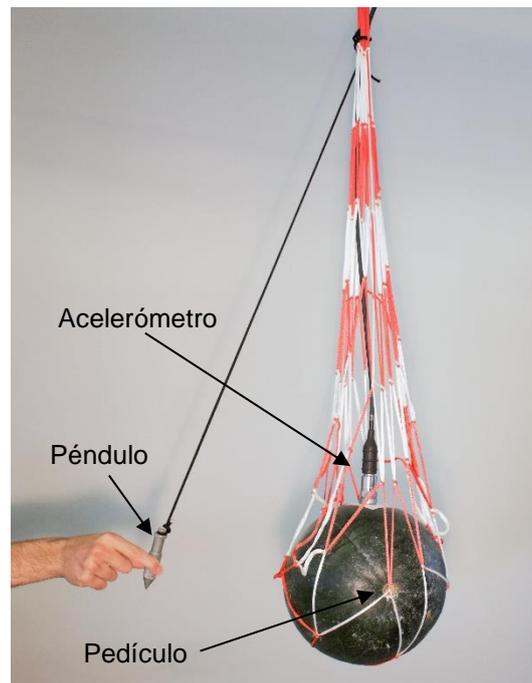


Figura 2 – Montaje del ensayo de impacto con péndulo.

A 1 m de altura por encima del centro aproximado de la sandía se suspendió un péndulo de 130 g de masa. El péndulo era separado 30° de la vertical y se soltaba de forma que la sandía sea golpeada en su ecuador. Tras el primer impacto se cogía el péndulo para evitar un segundo golpe sobre la sandía.

El ensayo se realizó 3 veces sobre cada sandía registrando la aceleración medida por el acelerómetro mediante el uso del equipo de adquisición modelo National Instrument cRIO-9233. Mediante un programa desarrollado en LabVIEW se almacenaba la señal muestreada a una frecuencia de 2000 Hz. La señal se inicializaba desde el instante del impacto gracias un *trigger* por software. Posteriormente se realizaba la FFT a la señal de 1 s de duración, tiempo suficiente para que la amplitud del acelerómetro decayese.

Tras los ensayos cada una de las sandías era abierta para verificar la existencia de huecos internos.

2.2. Tratamiento de los datos

Posteriormente se trataron las señales de aceleración en el dominio de la frecuencia usando el software Matlab con el fin de obtener los parámetros vibraciones que mejor predicen el estado interno de la sandía. En la Figura 3 se muestra la curva típica de aceleración en el dominio de la frecuencia para una sandía ensayada como se describió en el apartado anterior. Los picos en la señal de aceleración de frecuencias cercanas a cero pueden descartarse por deberse a movimientos asociados a sólido libre y no la transmisión de vibraciones en el interior de la fruta.

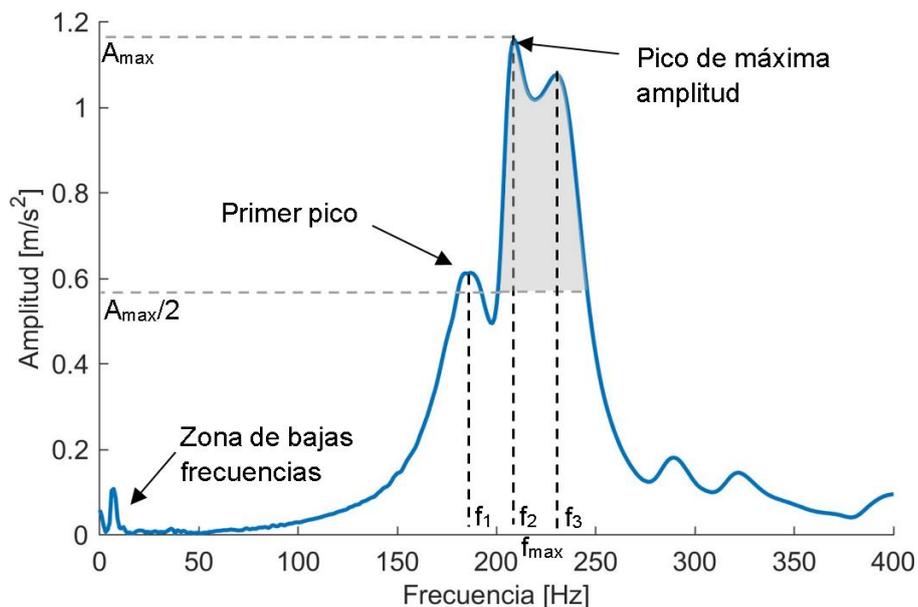


Figura 3 – Curva típica de aceleración medida en la sandía durante el ensayo de impacto en el dominio de la frecuencia.

A partir de los 250 Hz el nivel de aceleración decae a menos del 20% de la aceleración máxima, por lo que se descartan los picos de aceleración medidos en frecuencias superiores a 250 Hz, por considerarse que están relacionados con modos de deformación con poca energía.

De las señales de aceleración de cada impacto se obtiene, dentro del rango de 50 a 250 Hz, los tres primeros picos de aceleración, denominados f_1 , f_2 y f_3 respectivamente, y la frecuencia para la cual se obtiene el valor máximo de aceleración, llamado f_{max} . Las frecuencias para las cuales se producen los picos no se ven influenciadas por el punto de impacto. Como el impacto se realiza de forma manual, para descartar errores humanos y evitar utilizar información errónea en el análisis se ha obtenido para cada sandía el valor de cada parámetro vibracional como la mediana de los valores obtenidos en cada uno de los tres impactos. Se han analizado los resultados de todas las muestras descartando las sandías para las cuales se obtuvieron datos dudosos o anómalos. El error más común se debía a un rebote del péndulo o al despegue del acelerómetro. Tras el cribado de las sandías que mostraron datos dudosos se disponían de resultados para 43 sandías, resultando ser 6 de ellas huecas y 37 sin defectos internos.

A parte de las frecuencias a los que se producen los tres primeros picos en el espectro se ha calculado el área bajo la curva alrededor del máximo de aceleración, $A_{f_{max}}$. Esta área, representada en la Figura 3 en gris, ha sido calculada como el área bajo la curva alrededor del punto de amplitud máxima, desde que la curva supera el 50% de la amplitud máxima hasta que la curva toma valores por debajo del 50% de la amplitud máxima de forma definitiva. Este valor de área fue usado por C. Ding [5] para determinar su relación con la firmeza.

Varios autores han demostrado que las frecuencias naturales de la fruta dependen de su nivel de maduración. Se ha estudiado este parámetro conjuntamente con el resto de parámetros vibratoriales para tener en cuenta el nivel de firmeza en el análisis. Por ejemplo, J.A. Abbot [7] utiliza análisis de vibraciones para estimar el nivel de maduración de frutas y vegetales. Este autor propone la expresión de la Ecuación 1 para estimar el nivel de firmeza de la fruta.

$$\text{firmeza}_a = f^2 m \quad (1)$$

Donde f es la frecuencia resonante de la fruta y m su masa. Más tarde J.R. Cook [8] propone una modificación de esta expresión según la Ecuación 2.

$$\text{firmeza}_c = f^2 m^{2/3} \quad (2)$$

Estas expresiones han sido utilizadas extensamente por otros investigadores. Dependiendo el autor f se refiere a la primera, segunda o tercera frecuencia resonante. En este trabajo se ha utilizado la primera f_1 , ya que ha dado mejores resultados.

2.3. Análisis estadístico

En primer lugar, se ha realizado un análisis de los valores de masa, densidad, frecuencia del primer pico, frecuencia del pico máximo, firmeza estimada según J.A. Abbott y firmeza estimada según J.R. Cook. La densidad ha sido estimada a partir de la masa y el volumen de la sandía aproximando su forma a la de un elipsoide según la Ecuación 3.

$$\text{volumen} = 4 \frac{\pi}{3} a^2 b \quad (3)$$

Donde a y b son los semiejes del elipsoide los cuales se calculan a partir del perímetro ecuatorial p_1 y el perímetro medido pasando por el pedículo p_2 de acuerdo con las Ecuaciones 4 y 5.

$$a = \frac{p_1}{2\pi} \quad (4)$$

$$b = \sqrt{\left(\frac{p_2}{2\pi}\right)^2 - a^2} \quad (5)$$

No se ha incluido en el análisis estadístico el área bajo el espectro de aceleración mencionada anteriormente ya que no daba resultados repetitivos incluso para una misma sandía. En primer lugar, se ha estudiado la correlación entre dos distintos parámetros. Después, se analizaron las diferencias estadísticas entre los distintos parámetros físicos y vibratoriales en función de si la sandía tenía huecos internos o no. La comparación entre las medias se ha realizado mediante un ANOVA. Para los casos en los que se encontró correlación entre distintos factores se realizó además un análisis de la covarianza, ANCOVA, para contemplar el efecto del efecto combinado de ambas variables.

Tras el análisis estadístico se seleccionó el par de variables que presentaban mayores diferencias estadística entre los dos grupos de sandías para utilizarlas como predictores en un algoritmo clasificador. Como algoritmo clasificador de sandías con defectos y sin defectos internos a partir de dichas variables se eligió una regresión logística por su simplicidad.

3. RESULTADOS

Los coeficientes de correlación de Pearson se muestran en la Tabla 1. La masa muestra una fuerte correlación positiva con el radio, lo cual es lógico, y con la densidad, lo que indica que las sandías más grandes presentan una mayor densidad. También hay una fuerte correlación entre las dos medidas de firmeza ya que dependen de las mismas propiedades. La frecuencia del primer pico y la frecuencia a la que se produce el pico máximo tiene una correlación débil (coef. Pearson 0.7) ya que para algunas sandías estos dos picos coinciden. La correlación débil entre f_1 y la firmeza calculada según J.R. Cook se explica porque se utiliza dicha frecuencia para calcular la firmeza.

Tabla 1 – Coeficiente de correlación entre las variables estudiadas.

	Masas	Densidad	Radio (a)	f_{max}	f_1	$firmeza_a$	$firmeza_c$
Masas	1,00	0,98	0,94	-0,40	-0,44	0,54	0,26
Densidad	0,98	1,00	0,87	-0,32	-0,38	0,58	0,31
Radio (a)	0,94	0,87	1,00	-0,51	-0,53	0,39	0,11
f_{max}	-0,40	-0,32	-0,51	1,00	0,70	0,27	0,46
f_1	-0,44	-0,38	-0,53	0,70	1,00	0,51	0,75
$firmeza_a$	0,54	0,58	0,39	0,27	0,51	1,00	0,95
$firmeza_c$	0,26	0,31	0,11	0,46	0,75	0,95	1,00

Antes de realizar el análisis cabía esperar que una sandía hueca debe ser menos densa que una sandía sin defectos internos. Si se realiza una comparación, mediante ANOVA, de los valores medios de densidad de los dos grupos de sandías se obtiene que no hay diferencias significativas entre las sandías huecas y las sandías sin defectos ($p > 0,37$), siendo el valor medio de densidad para las sandías sin defectos de $0,4754 \text{ kg/m}^3$ y de $0,4508 \text{ kg/m}^3$ para las sandías con huecos. Sin embargo, la densidad está altamente correlacionada con la masa, a mayor masa mayor densidad. Al tener en cuenta la covarianza y utilizar un modelo de regresión lineal corrigiendo las posibles diferencias en función de la variable masa, mediante un ANCOVA, se obtiene que con una significancia del 95% no se puede asegurar que los valores de densidad sean iguales para ambos grupos ($p > 0.0056$). En la Figura 4 se muestran los valores de masa y densidad para las sandías estudiadas y se representa con línea de trazo la regresión lineal para cada grupo de sandías.

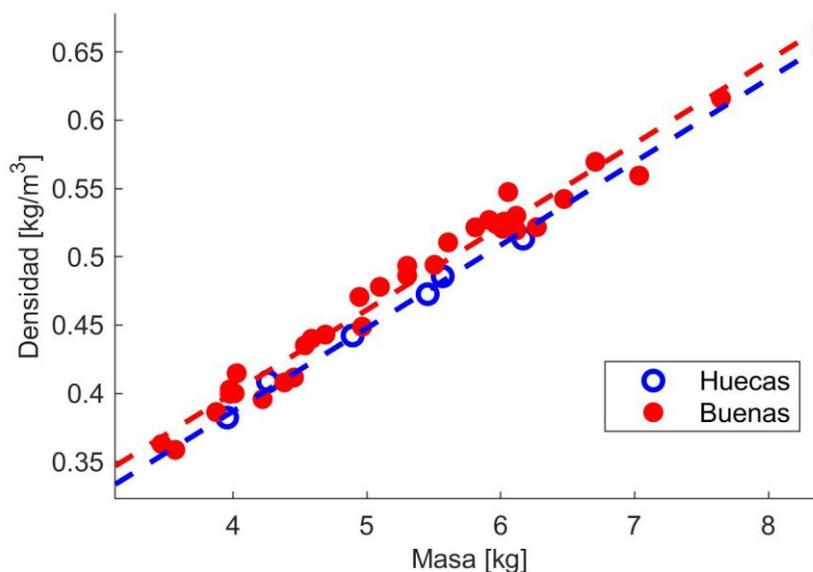


Figura 4 – Densidad y masa para las sandías estudiadas.

No existe una correlación entre la masa o la densidad con las frecuencias a las que ocurren el primer pico de aceleración o el pico de amplitud máxima. Se ha observado que para todas las sandías con defectos internos estudiadas el primer pico de aceleración corresponde, además, con el pico de amplitud máxima. Pero esto es algo que también sucede en sandías sin defectos, por lo que, a falta de más datos, no se tendrá en cuenta para la detección de defectos.

En la Figura 5 se muestran los resultados de frecuencias y firmeza en función de la masa. El análisis estadístico mediante análisis de la varianza revela que existen diferencias significativas en los valores medios de f_1 ($p < 0,0026$), f_{max} ($p < 0,0003$) $firmeza_a$ ($p < 0,0031$) y $firmeza_c$ ($p < 0,0008$). A la vista de los resultados la frecuencia a la que se produce el pico máximo en el espectro de aceleración es la que mayor probabilidad tiene de ser diferente entre sandías con defecto y sin defecto.

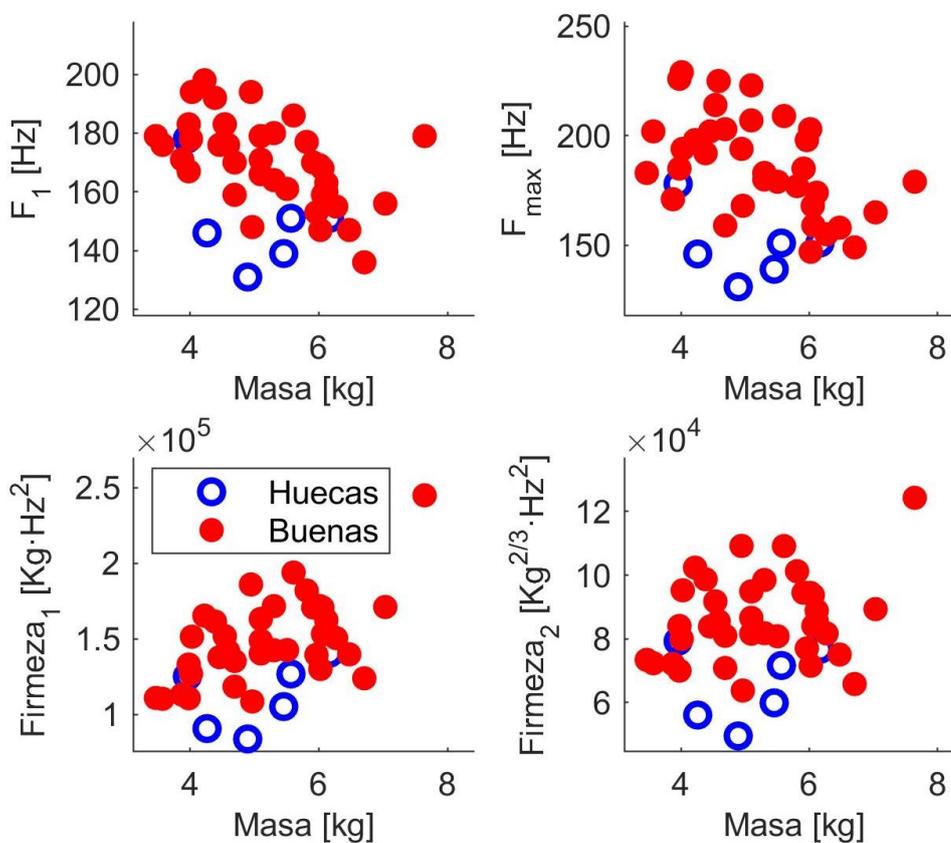


Figura 5 – Valores de frecuencias del espectro de aceleración y firmeza en función de la masa para las sandías estudiadas.

A continuación, se realizó una regresión logística con el fin de utilizarla como algoritmo clasificador. La variable categórica en la regresión logística es la existencia o no de defectos internos y las variables independientes o predictores son la frecuencia f_{max} y la densidad. El resultado se muestra en la Figura 6, donde con línea azul se representa la función límite para el algoritmo clasificador. Con los datos introducidos en la regresión logística se puede predecir la existencia de defecto con un 86 % de precisión.

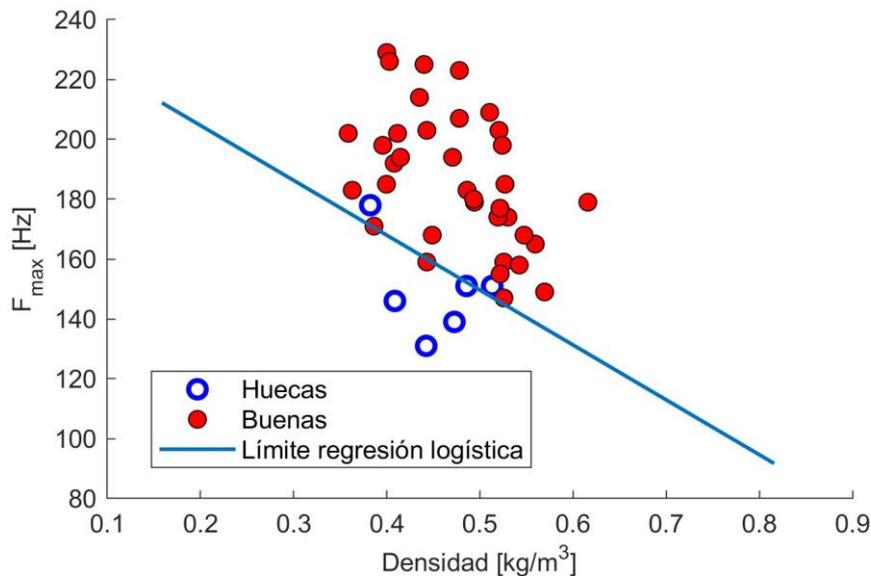


Figura 6 – Regresión logística utilizando como predictores la densidad y la frecuencia del pico máximo de aceleración.

4. CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio de los parámetros vibracionales de sandías sometidas a ensayos de impacto con el objetivo de evaluar si es posible utilizarlos como predictores de la existencia de huecos internos en las sandías. Las sandías se han sometido a un impacto leve con un péndulo durante el cual se ha registrado la aceleración en un punto de la superficie exterior.

El análisis estadístico de los resultados revela que existe una correlación entre la masa y la densidad de las sandías y que existe una relación entre la densidad y la existencia de huecos internos. Se han encontrado diferencias significativas en los valores medios de frecuencias a los cuales se producen los picos de aceleración. Los valores de firmeza estimada también muestran diferencias significativas, pero al depender estos de la masa y las frecuencias de los picos no se han encontrado motivos para utilizar los valores de firmeza como predictor en lugar de las frecuencias.

Con la aplicación de una regresión logística utilizando como variables independientes la densidad y la frecuencia del pico máximo de aceleración para la detección de huecos ha dado buenos resultados. Sin embargo, el número de muestras utilizadas en este estudio es muy reducido y se requiere de más datos para la toma de mejores conclusiones. Como líneas de trabajo futuro se plantea la aplicación de este análisis a más muestras, el uso de otros algoritmos clasificadores y la mejora del método de excitación con el objetivo de buscar la automatización del ensayo.

La detección de huecos internos en las sandías de forma automatizada antes de que estas lleguen al consumidor permitirá la reducción de costes en las empresas y una reducción del impacto ambiental derivado del transporte, tratamiento y refrigeración de sandías con defectos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren agradecer a la empresa Agrícola Navarro de Haro, S.L. su colaboración y la provisión de sandías para este estudio.

REFERENCIAS

- [1] Iglesias, B.D.; Altisent, M.R.; Jancsók, P. Vibrational analysis of seedless watermelons: use in the detection of internal hollows. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 3(1), 2005, pp 52–60.
- [2] Abbaszadeh, R.; Rajabipour, A.; Sadrnia, H.; Mahjoob, M.J.; Delshad, M., Ahmadi, H. (2014) Application of modal analysis to the watermelon through finite element modeling for use in ripeness assessment. *Journal of Food Engineering*, 127, 2014 pp 80–84.
- [3] Armstrong, P.R.; Stone, M.; Bruswitz, G.H. Nondestructive acoustic and compression measurements of watermelon for internal damage detection. *Applied Engineering in Agriculture*, 13, 1997, pp 641-645.
- [4] Yamamoto H.; Iwamoto M.; Haginuma S. Acoustic impulse response method for measuring natural frequency of intact fruits and preliminary applications to internal quality evaluation of apples and watermelons. *Journal of Texture Studies*, 11, 1980, pp 117-136.
- [5] Ding, C.; Wang, D.; Feng, Z.; Li, W.; Cui, D. Integration of vibration and optical techniques for watermelon firmness assessment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 2021, 106307.
- [6] Nourain, J.; Ying, Y.; Wang, J.; Rao, X.; Yu, C. Firmness evaluation of melon using its vibration characteristic and finite element analysis. *Journal of Zhejiang University*, 6(6), 2005, 483.
- [7] Abbott, J.A.; Bachman, G.S.; Childers, N.F.; Fitzgerald, J.V.; Matusik, F.J. Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables. *Food Technology*, 22(5), 1968, pp 101-112.
- [8] Cook, J. R. An interpretation of the resonance behaviour of intact fruit and vegetables. *Transactions of the ASAE, ASABE, St. Joseph*, 1972, pp 1075–1079.