



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



INSTITUTO DE INGENIERÍA DE  
ALIMENTOS PARA EL DESARROLLO

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

## USO DE ULTRASONIDOS PARA LA CARACTERIZACIÓN NO DESTRUCTIVA DE FRUTAS Y VERDURAS

TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN GESTIÓN DE  
LA SEGURIDAD Y CALIDAD ALIMENTARIA

ALUMNO: JAVIER MENGOD BAUTISTA

TUTOR ACADEMICO: JOSÉ VICENTE GARCÍA PÉREZ  
COTUTORA: VIRGINIA SÁNCHEZ JIMÉNEZ

*Curso Académico: 2019/2020*

**VALENCIA, JULIO 2020**

## USO DE ULTRASONIDOS PARA LA CARACTERIZACIÓN NO DESTRUCTIVA DE FRUTAS Y VERDURAS

Mengod Bautista, J.; Sánchez-Jiménez, V.; García Pérez, J.V.

### RESUMEN

Actualmente, no existen técnicas de control de calidad en línea que permitan determinar la calidad de frutas enteras y verduras mediante técnicas no destructivas. El incremento de la demanda de los consumidores por frutas de alta calidad, y que cumplan los requisitos de seguridad plantea la necesidad de métodos rápidos que permitan obtener información precisa y objetiva que permita medir y monitorizar la calidad del producto durante su paso por las distintas etapas de la cadena de producción. El uso de ultrasonidos de baja intensidad y alta frecuencia puede considerarse como una técnica no destructiva, rápida, de coste moderado y que ha demostrado su utilidad en la caracterización composicional y textural de frutas y verduras. Así, este trabajo presenta una revisión acerca del uso de ultrasonidos para la caracterización no destructiva de frutas y verduras.

Palabras clave: ultrasonidos; composición; textura; control de calidad; frutas; verduras

### RESUM

Actualment, no hi ha tècniques de control de qualitat en línia que permeten determinar la qualitat de fruites senceres i verdures per mitjà de tècniques no destructives. L'increment de la demanda dels consumidors per fruites d'alta qualitat, i que complisquen els requisits de seguretat planteja la necessitat de mètodes ràpids que permeten obtindre informació precisa i objectiva que permeti mesurar i monitoritzar la qualitat del producte durant el seu pas per les distintes etapes de la cadena de producció. L'ús d'ultrasons de baixa intensitat i alta freqüència pot considerar-se com una tècnica no destructiva, ràpida, de cost moderat i que ha demostrat la seua utilitat en la caracterització composicional i textural de fruites i verdures. Així, este treball presenta una revisió sobre l'ús d'ultrasons per a la caracterització no destructiva de fruites i verdures.

Paraules clau: ultrasons; composició; textura; control de qualitat; fruites; verdures

## **ABSTRACT**

At present, there are no online quality control techniques to determine the quality of whole fruits and vegetables using non-destructive techniques. Increasing consumer demand for high quality fruit and meeting safety requirements raises the need for rapid methods to obtain accurate and objective information to measure and monitor the quality of the product during its passage through the different stages of the production chain. The use of low-intensity, high-frequency ultrasounds can be considered a non-destructive, fast, moderately cost technique that has proven its usefulness in the compositional and textural characterization of fruits and vegetables. Thus, this paper presents a review about the use of ultrasound for the non-destructive characterization of fruits and vegetables.

Keywords: ultrasound; composition; texture; quality control; fruits; vegetables

## **1. ULTRASONIDOS Y APLICACIONES EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA**

La industria alimentaria ha venido experimentado un rápido crecimiento en todo el mundo. El crecimiento se ha visto facilitado por la integración de diversas tecnologías que han permitido mejorar los sistemas de fabricación y la preparación de productos alimenticios (MacAndrew y Harris, 1991). Estas tecnologías están destinadas a cumplir con los requisitos de calidad y seguridad demandados por los consumidores los cuales cada vez son más exigentes. En este contexto, se busca utilizar técnicas no destructivas y no invasivas que permitan medir y monitorizar la calidad del producto durante su paso por las distintas etapas de la cadena de producción. Las tecnologías ultrasónicas constituyen una de las técnicas de análisis no destructivo más relevantes de la actualidad (Ginel y Álvarez-Arenas, 2019).

Los ultrasonidos se definen como ondas acústicas que tienen una frecuencia superior al límite de audición humano (~ 20 kHz). Una frecuencia que no puede ser emitida por humanos, pero si por animales ya que en el mundo animal son utilizados para cazar (murciélagos) o para navegar (delfines) empleando la información contenida en las ondas (Knorr et al., 2011). Los ultrasonidos como cualquier onda, se caracterizan por una serie de variables: potencia, frecuencia, atenuación e impedancia acústica.

En función del rango de frecuencia y potencia aplicada, los ultrasonidos se pueden dividir en baja y alta intensidad teniendo aplicaciones distintas en el análisis, control de calidad y procesado de los alimentos. Los ultrasonidos de alta intensidad, también conocidos como de potencia emplean frecuencias entre 20 y 500 kHz e intensidades superiores a  $1 \text{ W}\cdot\text{cm}^2$  (Awad et al., 2012). Se utilizan para provocar cambios en los procesos o productos afectando a sus propiedades químicas, físicas o mecánicas, que en aplicaciones en alimentos pueden ser de utilidad en la conservación, procesado y seguridad de los alimentos. Esta tecnología ha surgido como alternativa a las operaciones convencionales de procesado de alimentos para mejorar la inactivación microbiana, la extracción y el secado entre otros procesos (Gallego-Juárez et al., 2010).

Los ultrasonidos de baja intensidad emplean intensidades inferiores a  $1 \text{ W}\cdot\text{cm}^2$  y frecuencias generalmente superiores a 100 kHz. Sus aplicaciones principalmente van destinadas al análisis no destructivo-no invasivo de los alimentos de forma rápida y fiable lo que permite determinar índices y características específicas de la calidad de los mismos. Su rango de aplicación en la industria alimentaria es muy amplio abarcando todo tipo de alimentos desde carne o pescado hasta frutas y verduras.

En la industria cárnica, los ultrasonidos han sido una tecnología útil para mejorar los programas de selección genética para el ganado (Crews y Kemp, 2002). Se han empleado para estimar el contenido de humedad y proteína de pescados (Ghaedian et al., 1997) y la composición y el contenido en grasa sólida de aves de corral (Chanamai y McClements, 1999). También se utilizaron para caracterizar y clasificar la grasa de jamones frescos (de Prados

et al., 2015) y la grasa de cerdo de animales de diferentes razas y regímenes de alimentación, comparando su contenido y perfil de ácidos grasos que influyen en la fusión de las grasas (Niñoles et al., 2007). Del mismo modo, en mezclas de carne cruda ha permitido determinar sus principales componentes: humedad, grasa y proteína (Benedito et al., 2001).

Dentro de la industria láctea los ultrasonidos han demostrado su capacidad para detectar la contaminación microbiana, ya que se cree que el crecimiento de microorganismos en el producto genera cambios en las características estructurales provocando cambios en los parámetros ultrasónicos (Mohammadi et al., 2016). También se han utilizado para monitorizar el proceso de cuajado de leche durante la fabricación ya que el cambio de fase de líquido a sólido provoca cambios relevantes en los parámetros ultrasónicos (Corredig et al., 2004). Se puede destacar también sus aplicaciones para la detección de cuerpos extraños (Hæggström y Luukkala, 2001) y la determinación de las propiedades texturales y la composición de quesos (Benedito et al., 2001).

En cereales, los ultrasonidos se han empleado para caracterizar la fase de fermentación durante la elaboración del pan (Skaf et al., 2009). Ross et al. (2004) examinaron la composición de tres tipos de masa de harina mediante ultrasonidos obteniendo una buena correlación entre los parámetros ultrasónicos y las propiedades reológicas de la masa. La textura es uno de los aspectos principales en productos cereales, tradicionalmente solo se podía medir mediante un análisis destructivo, sin embargo, el uso de ultrasonidos permitió analizar los productos sin necesidad de dañarlos (Juodeikiene y Basinskiene, 2004), Povey y Harden (1981) realizaron mediciones en galletas y encontraron una buena correlación entre la velocidad del ultrasonido y la nitidez sensorial.

Por último, en el sector en el que se va profundizar en este trabajo, el de las frutas y las verduras, el desarrollo de tecnologías ultrasónicas no ha sido tan rápido como en otros sectores de la industria alimentaria debido a diferentes limitaciones. Por un lado, el carácter delicado de los tejidos tanto de frutas como de verduras hace que el contacto entre el sensor ultrasónico y el alimento sea crítico ya que se pueden producir daños en la superficie del mismo. Al mismo tiempo, el alto contenido de aire, dificulta la propagación de la onda ultrasónica al aumentar las pérdidas por atenuación (Porteous et al., 1981, Mizrach et al., 1989).

En las últimas décadas, diferentes avances en el diseño de equipos y la disponibilidad de nuevos sensores e instrumentos, diseñados principalmente para uso industrial, ha estimulado el progreso y ha facilitado estudios y el desarrollo de métodos y técnicas ultrasónicas para el mercado de frutas y verduras frescas (Mizrach, 2008).

## **2. SISTEMAS ULTRASÓNICOS Y MODOS DE MEDIDA**

En todo el alcance de sus aplicaciones, los ultrasonidos se generan mediante un dispositivo conocido como transductor que contiene un cristal cerámico piezoeléctrico que es excitado por un pulso eléctrico corto. A través del efecto piezoeléctrico, esta energía eléctrica se convierte en una onda mecánica que se propaga por la muestra como un pulso a la frecuencia fundamental del transductor y es recogida por el transductor receptor que realiza la función inversa, es decir, convertir la vibración en una señal eléctrica proporcional a la misma, esta señal eléctrica es acondicionada y finalmente recogida por un osciloscopio que transfiere los datos a un ordenador. (Krautkramer y Krautkramer, 1990). Existen otro tipo de transductores no piezoeléctricos pero su uso está mucho menos extendido.

La propagación de la onda ultrasónica a través del alimento provoca cambios en la misma, tales como reflexiones, refracciones, atenuación y cambios de velocidad (Kuttruff, 1991).

Se han desarrollado diversos métodos y dispositivos de medida por ultrasonidos en función del tipo de fruta y/o vegetal a analizar y de los índices fisicoquímicos que se quieran determinar. Una de las principales modificaciones en los dispositivos radica en la posición y forma de los transductores que se han adaptado a la superficie de la fruta o verdura examinada (Mizrach, 2000).

### **2.1. Sistemas pulso-eco**

En estos sistemas se pueden utilizar tanto uno como dos transductores; uno cuando el mismo transductor actúa como emisor y receptor y dos cuando hay un transductor que actúa de emisor y otro de receptor (Figura 1) que se colocan ambos en la misma cara del producto (Awad, 2004)

El pulso ultrasónico que se genera se propaga a través de la muestra hasta que se refleja en la superficie opuesta del producto o de la celda de medida, y vuelve al mismo transductor en el caso de que solo se utilice uno o al otro que actúa únicamente como receptor en el caso de que se usen dos. Cada pulso se refleja y se transmite parcialmente por lo que el coeficiente de atenuación y la velocidad ultrasónica se pueden calcular mediante el análisis de los ecos recibidos (Awad, 2004). El producto a medir puede estar en contacto directo con el transductor o sumergido en un líquido, generalmente agua, dentro de una celda de medida. La longitud de la celda o de la muestra (L) es igual a la mitad de la distancia que el pulso de ultrasonido recorre.

La dificultad que presenta esta técnica a la hora de aplicarla en frutas y verduras es que la señal atraviesa dos veces el producto por lo que las pérdidas de energía son el doble.

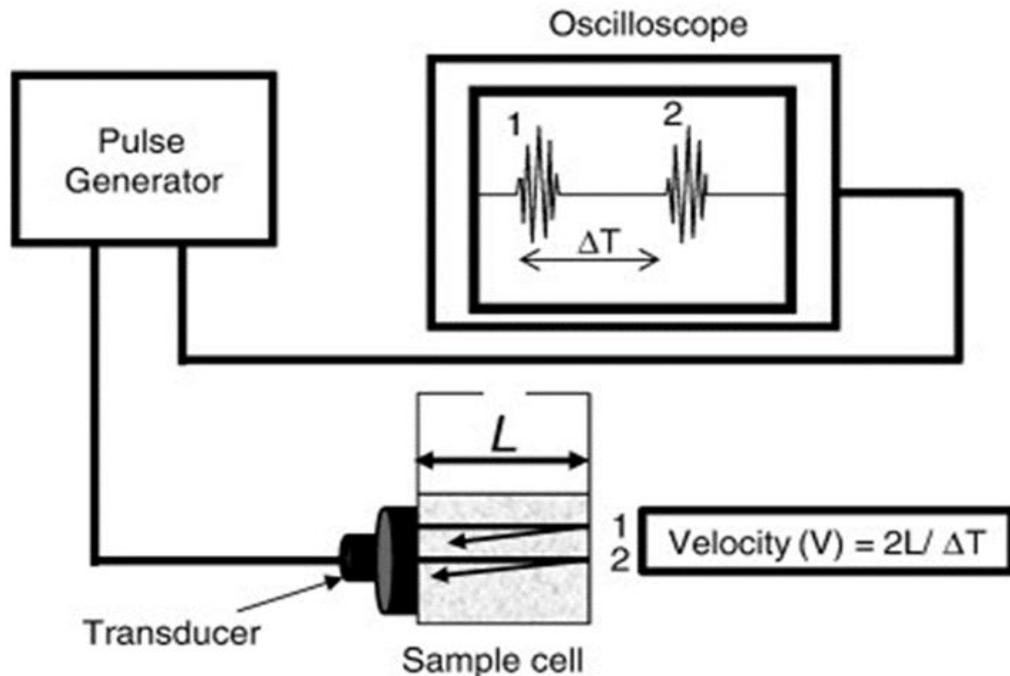


Figura 1. Diagrama de la técnica pulso-eco y del cálculo de la velocidad ultrasónica ( $V$ ), a partir del tiempo de vuelo ( $\Delta T$ ), y la mitad de la longitud que recorre la onda ( $L$ ) que coincidirá con el espesor del producto medido o celda de medida (Awad et al., 2012).

## 2.2. Sistemas de transmisión recepción

Los sistemas de transmisión recepción (Figura 2) utilizan dos transductores; un primer transductor transmisor genera un pulso mientras que un segundo transductor receptor colocado en la superficie opuesta del producto recibe la señal que atraviesa el producto (Awad, 2004)

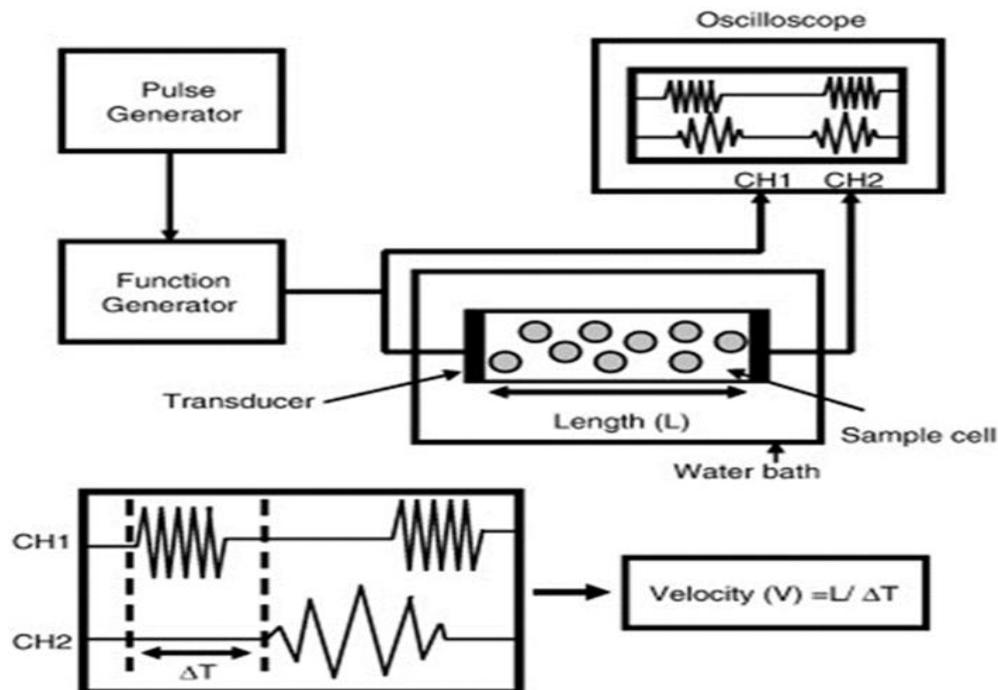


Figura 2. Diagrama de la técnica de transmisión recepción y del cálculo de la velocidad ultrasónica ( $V$ ) a partir del tiempo de vuelo ( $\Delta T$ ) y de la longitud que recorre la onda ( $L$ ) que coincidirá con el espesor del producto medio o la celda de medida (Awad, 2004).

### 2.3. Sistemas de medida en superficie

Los sistemas de superficie (Figura 3) se desarrollaron específicamente para la evaluación no destructiva de las características del tejido buscando realizar la medida con ondas de superficie, lo que aumenta la probabilidad de la transmisión ya que la onda no atraviesa el producto. Así, los parámetros ultrasónicos de estas ondas se asocian con índices relacionados con la calidad de especímenes intactos de frutas y verduras durante el transcurso de la maduración, el almacenamiento y la vida útil. Un sistema típico de superficie se caracteriza por la posición oblicua de sus transductores (Mizrach et al., 2000).

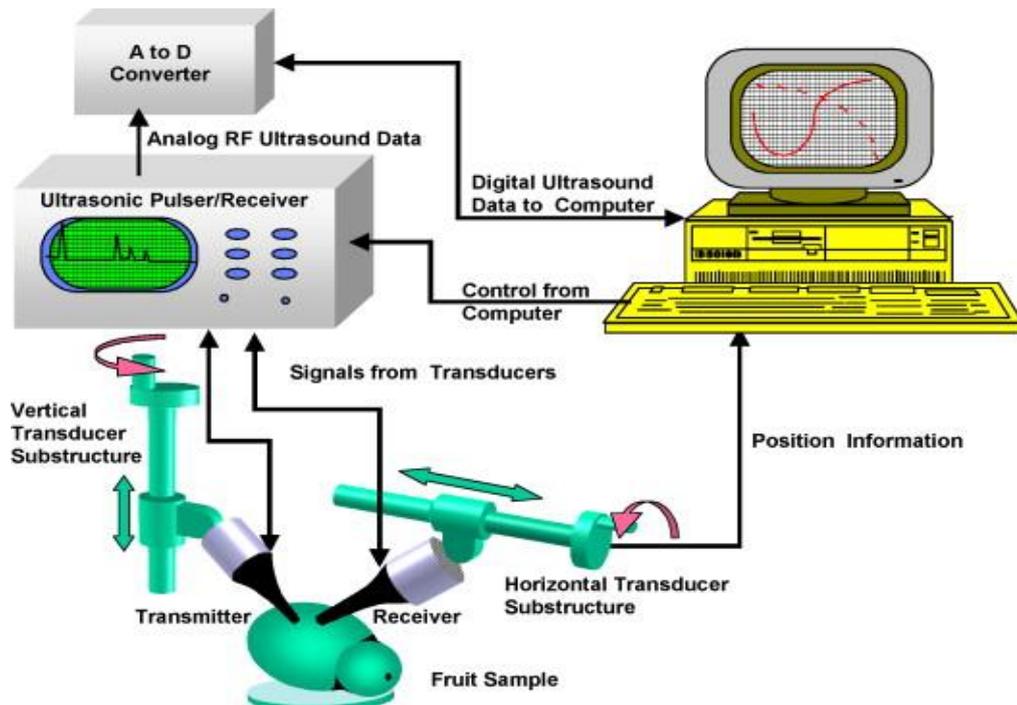


Figura 3. Esquema del sistema ultrasónico de medida en superficie (Mizrach et al., 2000).

En las medidas en superficie un transductor actúa como transmisor y el otro como receptor. La distancia entre los transductores se ajusta y se ponen en contacto los transductores con la piel de la fruta o verdura aplicándose una fuerza controlada, para mejorar el acoplamiento entre los transductores. También se puede modificar el área de contacto deseada con el producto utilizando dos reducciones cónicas con punta plana (Jiménez et al., 2012). El ángulo entre los ejes principales de los transductores se ajusta y no se modifica, únicamente varía la distancia entre las puntas de los transductores. Las ondas emitidas penetran en la piel y se propagan a través del tejido adyacente a lo largo del espacio entre las puntas de la sonda. Las velocidades de propagación de la onda se obtienen midiendo el tiempo requerido para que el pulso atravesase el espacio entre las dos sondas (Krautkramer y Krautkramer, 1990).

Gaete-Garretón et al., (2005) desarrollaron un nuevo sistema de medida en superficie para evaluar el estado de madurez de las frutas. La configuración incluye una cámara cilíndrica de acero inoxidable que funciona como una guía de ondas, y un generador de ondas instalado en un extremo de la cámara, cuyo otro extremo se pone en contacto con la fruta. El generador acústico es excitado por un transductor piezoeléctrico sándwich pretensado acoplado a una bocina escalonada hecha de aleación de titanio. El dispositivo está equipado con un sistema electrónico que mantiene la emisión de ondas a un nivel constante y una sonda de aguja para medir el campo dentro de la cámara. El coeficiente de absorción del material colocado en el extremo de la guía de onda puede calcularse midiendo la relación de onda estacionaria (Morse e Ingard, 1968).

## 2.4. Sistemas sin contacto

En los sistemas de análisis por ultrasonidos sin contacto (Figura 4) los transductores están modificados con capas de materiales activos, para mejorar su acoplamiento con el aire y se sitúan enfrentados verticalmente y perfectamente alineados (Álvarez-Arenas, 2013).

Una plataforma móvil perforada se sitúa entre ambos transductores y permite colocar la muestra para su medida a una distancia equidistante del transductor emisor y receptor. El transductor emisor genera la señal ultrasónica que viaja a través del aire, atravesando la muestra, hasta que es recibida por el transductor receptor (Sánchez, 2019). En estos sistemas se eliminan los errores de reproducibilidad del acoplamiento de contacto.

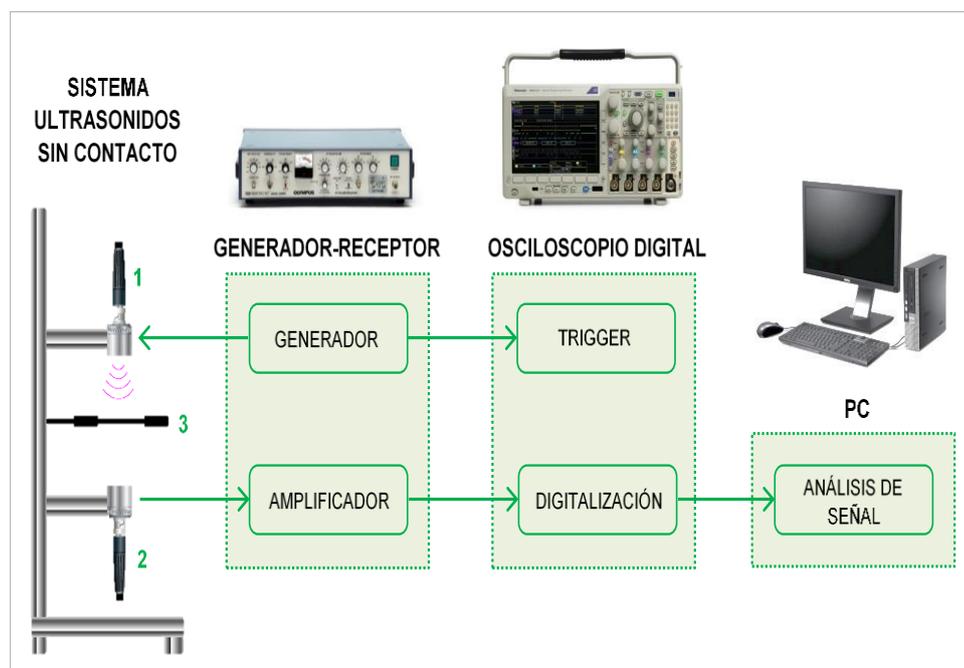


Figura 4. Esquema del sistema de ultrasonidos de señal sin contacto. 1, transductor emisor; 2, transductor receptor; 3, plataforma perforada para colocación de muestra (Sánchez, 2019).

## 2.5. Sistemas portátiles para medida en campo

Los sistemas descritos anteriormente se han construido y utilizado como dispositivos de mesa en un laboratorio. La necesidad de realizar medidas rápidas de la atenuación en el propio campo donde se cultivan las frutas o verduras hizo necesario el desarrollo sistemas portátiles. Estos sistemas incluyen el hardware básico que se encuentra comúnmente en la mayoría de los dispositivos de ultrasonidos, pero dado que fueron diseñados para utilizarse en el campo, incluyen un montaje especial para los transductores y procesan las señales de forma diferente a los sistemas fijos (Mizrach et al., 2003).

### 3. PARÁMETROS ULTRASÓNICOS

Las principales propiedades ultrasónicas son el coeficiente de atenuación ( $\alpha$ ), la velocidad ultrasónica ( $v$ ) y la impedancia acústica ( $Z$ ) puesto que tienen una fuerte relación con las propiedades físicas de los materiales. Esta relación deriva de la siguiente ecuación (McClements y Sundaram, 1997):

$$\left(\frac{k}{\omega}\right)^2 = \frac{\rho}{E} \quad (1)$$

Donde  $k$  = número complejo del material,  $\omega$  = frecuencia angular,  $E$  = módulo elástico y  $\rho$  = densidad del material. La ecuación 2 muestra como la velocidad ( $v$ ) y la atenuación ultrasónica ( $\alpha$ ) se relacionan con el número complejo (ecuación 1):

$$k = \frac{\omega}{v} + i\alpha \quad (2)$$

Donde  $i = \sqrt{-1}$ . Así, las variaciones de  $\alpha$  y  $v$  pueden proporcionar información valiosa que puede usarse debido a su relación inherente con la densidad y módulo elástico de los materiales. Este apartado desarrolla estas tres propiedades ultrasónicas las cuales proporcionan información de interés sobre los alimentos.

#### 3.1. Coeficiente de atenuación ( $\alpha$ )

La energía de una onda ultrasónica se atenúa cuando viaja a través de un material. La absorción y dispersión de las ondas son los principales factores que causan los fenómenos de atenuación. El efecto de absorción ocurre cuando la onda viaja en un medio no homogéneo y experimenta fricción interna entre el material de las moléculas (Hauptmann et al., 2002). Este hecho convierte la energía de ultrasonidos en energía térmica, lo que reduce indirectamente la amplitud inicial de la señal de la onda.

El efecto de dispersión es el otro factor que causa la atenuación de la onda. Comúnmente, la onda se propaga dentro de un cierto rango de ángulo que depende de la emisión del transductor ultrasónico. Sin embargo, la onda puede dispersarse fuera del rango del ángulo cuando se propaga a través del medio no homogéneo o interacciona con otras partículas, como aire o gotas de grasa (Mohammadi et al., 2014).

El coeficiente de atenuación ( $\alpha$ , Np/m) cuantifica las pérdidas de energía en el material y se puede calcular a partir de la siguiente relación matemática:

$$A = A_0 e^{-\alpha L} \quad (3)$$

Donde  $A$  = amplitud de la señal ultrasónica incidente, es decir, que es emitida por transductor emisor,  $A_o$  = amplitud de la señal ultrasónica que es recibida por el transductor receptor y  $L$  = distancia recorrida (Krautkramer y Krautkramer, 1990).

### 3.2. Velocidad ultrasónica ( $v$ )

La velocidad ultrasónica es uno de los parámetros que se usa ampliamente en la industria alimentaria para la inspección y clasificación de alimentos. La velocidad se calcula en función de la distancia propagada por una onda en una unidad de tiempo utilizando la siguiente ecuación (Mulet et al., 1999):

$$v = \frac{d}{t} \quad (4)$$

Donde  $v$  = velocidad ultrasónica,  $d$  = distancia recorrida y  $t$  = tiempo que tarda en recorrer dicha distancia, que generalmente se le denomina tiempo de vuelo (TOF o  $T_v$ ). La velocidad varía cuando viaja en un medio diferente, ya sea sólido, líquido o gaseoso. Para un medio sólido, el módulo de elasticidad ( $E$ ) y la densidad ( $\rho$ ) tienen un papel importante en la determinación de la velocidad, tal y como se muestra en la ecuación 5:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

La velocidad depende de las propiedades elásticas de materiales, así, la onda ultrasónica se propaga a mayor velocidad en sólidos que en líquidos y gases. El módulo de elasticidad para un medio sólido combina el módulo de compresibilidad y el módulo de cizalla como se muestra en la siguiente ecuación:

$$E = K + \frac{4}{3}G \quad (6)$$

Donde  $K$  = módulo de compresibilidad y  $G$  = módulo de cizalla. La ecuación (6) se sustituye en la ecuación (5) dando como resultado la siguiente ecuación:

$$v = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (7)$$

### 3.3. Impedancia acústica (Z)

El otro parámetro que se puede considerar de gran relevancia es la impedancia acústica (Z), donde se puede expresar como la relación entre la densidad del material y la velocidad de las partículas:

$$Z = \rho v \quad (8)$$

Donde  $\rho$  = densidad del medio ( $\text{kgm}^{-3}$ ) y  $v$  = velocidad ultrasónica (m/s). Cuando la onda ultrasónica atraviesa medios con impedancias diferentes, se producen reflexiones y refracciones de la onda (Hauptmann et al., 2002), que disminuyen la proporción de energía transmitida (Mohammadi et al., 2014).

## 4. CARACTERIZACIÓN DE COMPOSICIÓN EN FRUTAS Y VEGETALES

Los ultrasonidos ofrecen el potencial necesario para realizar medidas rápidas y no destructivas de parámetros composicionales relacionados con la calidad de frutas y verduras durante el crecimiento, el almacenamiento y la vida útil. Los índices fisicoquímicos más importantes que generalmente se han correlacionado con parámetros ultrasónicos son: contenido de aceite, contenido de materia seca (DW), acidez y sólidos solubles totales (TSS).

En el periodo de crecimiento, los sistemas de ultrasonidos pueden obtener información relevante acerca de los procesos de maduración e indicar el tiempo de cosecha apropiado, es decir, cuando la fruta ha alcanzado su madurez óptima (Mizrach et al., 1999). Durante el almacenamiento y la vida útil, pueden detectar cambios en las características fisicoquímicas de los tejidos de frutas y verduras y así determinar el tiempo de comercialización apropiado (Diederichs, 1996).

El aguacate se ha analizado mediante técnicas ultrasónicas tanto durante las etapas previas como posteriores a la cosecha. Los porcentajes de aceite y materia seca (DW) del aguacate aumentan durante el crecimiento y no cambian después de la cosecha (Degani et al., 1986). Los cambios en ambos índices fisicoquímicos durante el crecimiento y la determinación del tiempo de cosecha apropiado del aguacate se estudiaron con sistemas ultrasónicos de medida en superficie (Mizrach et al., 1999). Así, se observó que la atenuación de la onda ultrasónica disminuyó al aumentar el contenido de DW durante el crecimiento de la fruta, pero no a un ritmo constante: cayó de forma brusca durante los primeros 3 meses de crecimiento y luego de forma moderada a medida que la fruta se acercaba a la madurez durante los últimos 2 meses de crecimiento. Según la curva de atenuación-DW (Figura 5) se observó que la atenuación ultrasónica se aproximaba a un valor constante asintóticamente (Mizrach et al. 1999). La entrada en la parte asintótica de la curva indica que

el porcentaje de DW se está aproximando al estándar mínimo de madurez y que la fruta ha alcanzado la condición apropiada para la cosecha. Esto sugiere que el porcentaje de DW en el aguacate podría evaluarse a través de la medida de la atenuación ultrasónica durante el crecimiento del fruto, y que esta podría ser la base para la determinación del tiempo de cosecha.

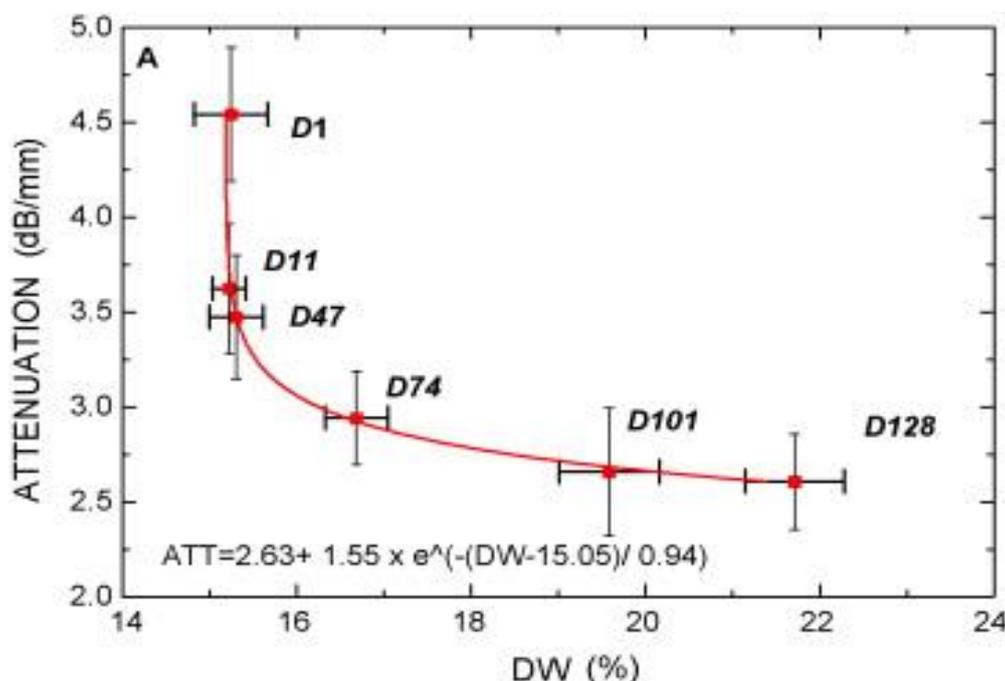


Figura 5. Relación entre atenuación ultrasónica y peso seco (DW) durante el crecimiento del aguacate. Las barras de error representan intervalos de confianza para la atenuación y DW respectivamente (nivel de confianza = 95%) (Mizrach et al., 1999)

En melones, Mizrach et al. (1994) midieron la atenuación y la velocidad de la onda superficial en productos enteros mediante un sistema de ultrasonidos de medida en superficie. La amplitud de la onda transmitida a través de la corteza aumentó durante la maduración, y hubo una buena correlación entre el color de la corteza, que se considera un índice de madurez, y la atenuación acústica. Por lo tanto, se podrían utilizar técnicas no destructivas para determinar la etapa de madurez de variedades de melones, donde el cambio de color no es tan notorio.

En el caso del mango, se ha caracterizado mediante sistemas de ultrasonidos a lo largo de la cosecha, almacenamiento y comercialización. Mizrach et al. (1997) estudiaron los cambios fisicoquímicos en el mango con sistemas ultrasónicos de medida en superficie midiendo la atenuación de la señal ultrasónica de la fruta durante 10 días de vida útil a temperatura ambiente. Las variaciones en la atenuación de los ultrasonidos y en los cambios químicos (contenido de acidez y azúcar) durante el tiempo de almacenamiento se relacionaron mediante regresión no lineal (Figura 6). Así, se seleccionó una expresión polinómica de tercer grado para describir la relación entre la atenuación y el contenido de azúcar, y se usó una expresión parabólica para la relación entre atenuación y acidez. Ambos parámetros fisiológicos reflejan cambios internos en la fruta del mango durante la

maduración. Así, a partir de la atenuación ultrasónica se pudo realizar una estimación no destructiva del contenido en azúcares solubles y la acidez de este fruto (Mizrach et al., 1997).

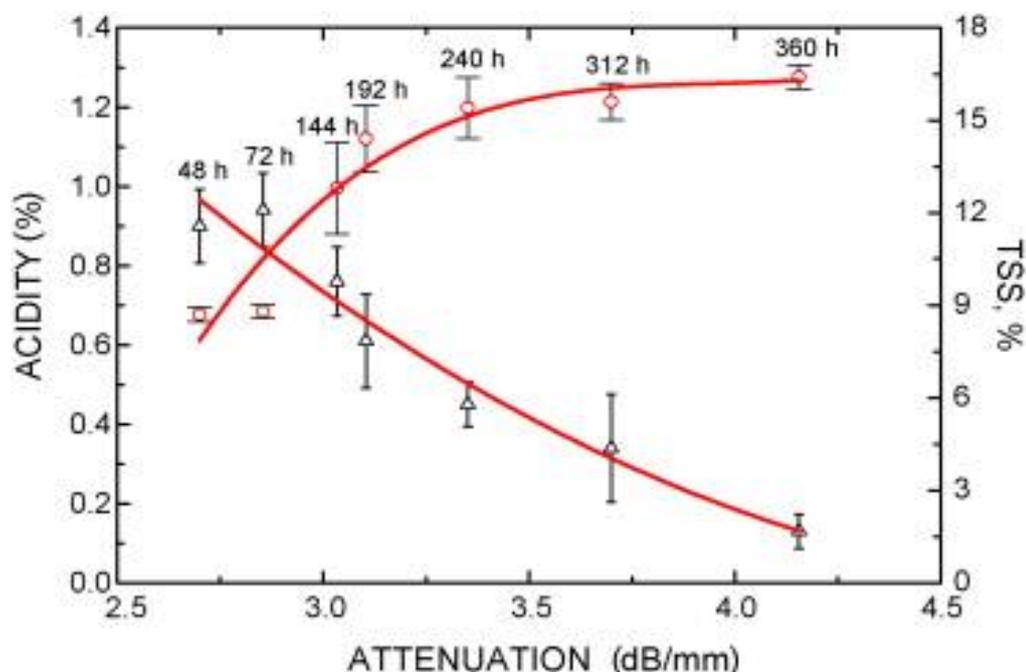


Figura 6. Relación entre el contenido de azúcar (TSS,  $\circ$ ) y la acidez ( $\Delta$ ) del mango y la atenuación (Mizrach et al., 1997)

Las propiedades acústicas de las patatas se midieron mediante el método de pulso-eco en un estudio que tuvo como objetivo distinguir entre buenas y defectuosas con el corazón hueco. Se encontró que la atenuación en las patatas defectuosas era mucho mayor que en las sanas, por lo tanto, los autores sugirieron que esta era una forma práctica de detectar patatas defectuosas (Ha et al., 1991, Hansen et al., 1992).

## **5. CARACTERIZACIÓN DE TEXTURA EN FRUTAS Y VEGETALES**

La propiedad mecánica más importante de las frutas y verduras que se correlaciona con las características de los ultrasonidos es la firmeza. Es un parámetro muy importante, que refleja los cambios en la textura del tejido durante el crecimiento, la maduración, el almacenamiento y su posterior vida útil. El grado de firmeza generalmente se asocia con la madurez, la frescura y buena calidad y, por lo tanto, con la venta. Se puede medir por compresión o por punción con diferentes tipos de ensayos instrumentales (Abbott, 1999). Estas técnicas destructivas y requieren mucho tiempo y conllevan una pérdida

de fruta, por lo que los ultrasonidos pueden considerarse como alternativa al ser un método rápido y no destructivo.

En las manzanas, la textura es un atributo primario de calidad, junto con el sabor y la apariencia. Crocancia, firmeza, dureza, jugosidad y harinosidad son los atributos de textura más reconocidos en las manzanas. De estos, la harinosidad perjudica la calidad y reduce la aceptabilidad y el precio del mercado (De-Smedt, 2000). Así, se desarrolló un sistema ultrasónico para determinar la atenuación ultrasónica en manzanas con tres niveles de harinosidad (fresca, madura y demasiado madura) de las variedades 'Jonagold' y 'Cox' (Mizrach et al., 2003). En un estudio realizado posteriormente por Bechar et al. (2005), la información obtenida a través de los ultrasonidos por Mizrach et al. (2003) se analizó en paralelo con la determinación del nivel de harinosidad de la fruta mediante medidas destructivas por compresión. La comparación entre los resultados de las medidas de ultrasonidos y las pruebas de compresión mostraron una buena correlación entre la atenuación de los niveles de harinosidad en manzanas frescas y demasiado maduras de la variedad 'Cox', pero no se correlacionó bien con los resultados de los ultrasonidos obtenidos para las manzanas de la variedad 'Jonagold'.

En aguacates, se encontró que las diferencias en los cambios de atenuación en fruta almacenada a diferentes temperaturas eran bastante significativas (Mizrach et al., 2000). La disminución de la firmeza durante el almacenamiento es un proceso fisicoquímico natural en el aguacate, pero el almacenamiento a baja temperatura ralentiza el proceso de ablandamiento (Mizrach et al., 2000). Dado que la firmeza y la atenuación dependían del tiempo, se definió una relación directa entre estos dos parámetros. La atenuación de la onda ultrasónica aumentó con la disminución de la firmeza a todas las temperaturas de almacenamiento (Figura 7). Las pendientes para el almacenamiento a 6, 8 y 20°C estaban muy próximas entre sí, pero se observaban diferencias con respecto a las de 2 y 4°C. Esto sugiere que la monitorización de la firmeza de la fruta por medio de la medida de la atenuación es factible, pero es necesario considerar la variabilidad entre las frutas, así como la diferente evolución de las mismas durante el almacenamiento a temperaturas variables.

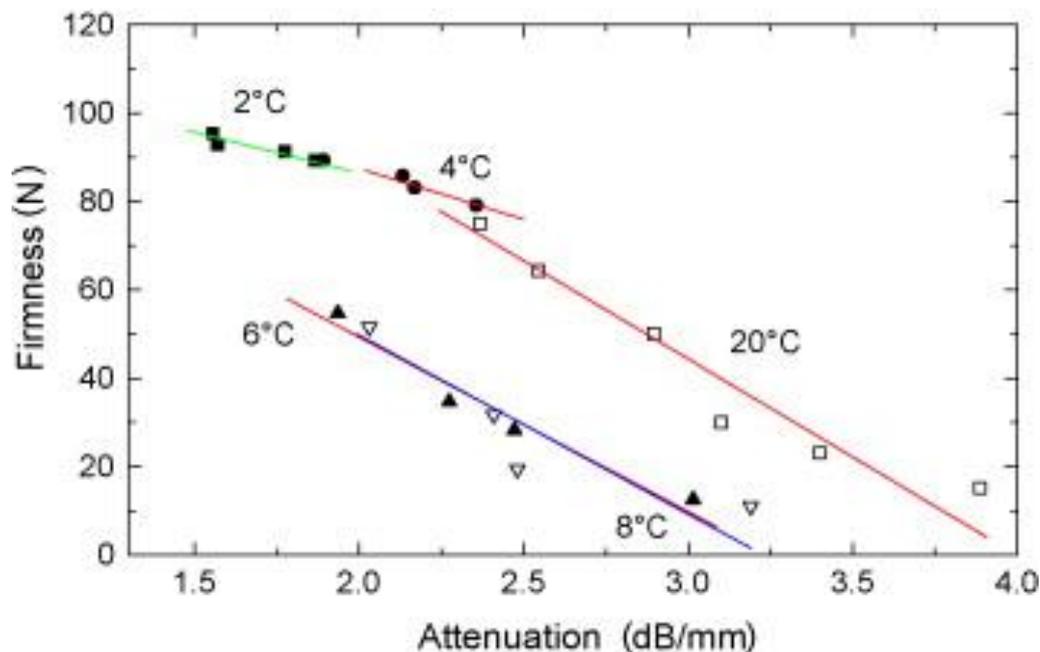


Figura 7. Relación entre atenuación y firmeza del aguacate a diferentes temperaturas. (■) 2°C; (●) 4°C; (▲) 6°C; (▼) 8°C; (□) 20°C (Mizrach et al., 2000).

En el caso de ciruela, para medir la firmeza se utilizó un sistema ultrasónico de medida en superficie para determinar la atenuación de la onda acústica en el tejido de la fruta por medio de sondas ultrasónicas en contacto con la piel de la fruta (Mizrach, 2004). Las diferencias en las señales acústicas transmitidas a través del tejido de la fruta en diferentes estados de madurez se midieron y analizaron durante todo un período de almacenamiento de 151 horas. La fruta también se sometió a medidas destructivas de penetración para determinar la firmeza, que se correlacionó con los parámetros ultrasónicos. Se observó que la atenuación y la firmeza disminuían en el transcurso de la vida útil, en especial, a partir de las 78 horas observándose una correlación significativa entre ambos parámetros (Mizrach, 2004).

Se usó un método ultrasónico no destructivo para monitorizar los cambios fisicoquímicos en la firmeza en tomates de invernadero durante su vida útil (Mizrach, 2007). Se encontró que la atenuación ultrasónica y la firmeza disminuyeron significativamente en el transcurso de la vida útil y que están relacionadas linealmente, lo que sugiere que este método ultrasónico podría usarse para la monitorización de la firmeza de los tomates durante su vida útil (Mizrach, 2007).

Kuo et al. (2008) midieron la viscosidad de un zumo de naranja reconstituido utilizando un sistema ultrasónico de pulso-eco. Para ello realizaron medidas preliminares en soluciones acuosas de azúcar para disponer de referencias a la hora de analizar el zumo. A diferencia de los estudios expuestos anteriormente en los que se medía la atenuación de la onda ultrasónica, se realizaron medidas de la velocidad ultrasónica debido a que las suspensiones sólidas contenidas en el zumo producen efectos de dispersión, que incurrirán en una atenuación muy alta que podría estar ligada a la presencia de pulpa, mientras que la velocidad es solo una función de la

compresibilidad adiabática y la densidad. Los resultados indicaron que existe una relación casi lineal (Figura 8) entre la velocidad ultrasónica y la viscosidad por debajo de 2.7 MPa·s, es decir, un contenido de azúcar inferior a 20 Brix.

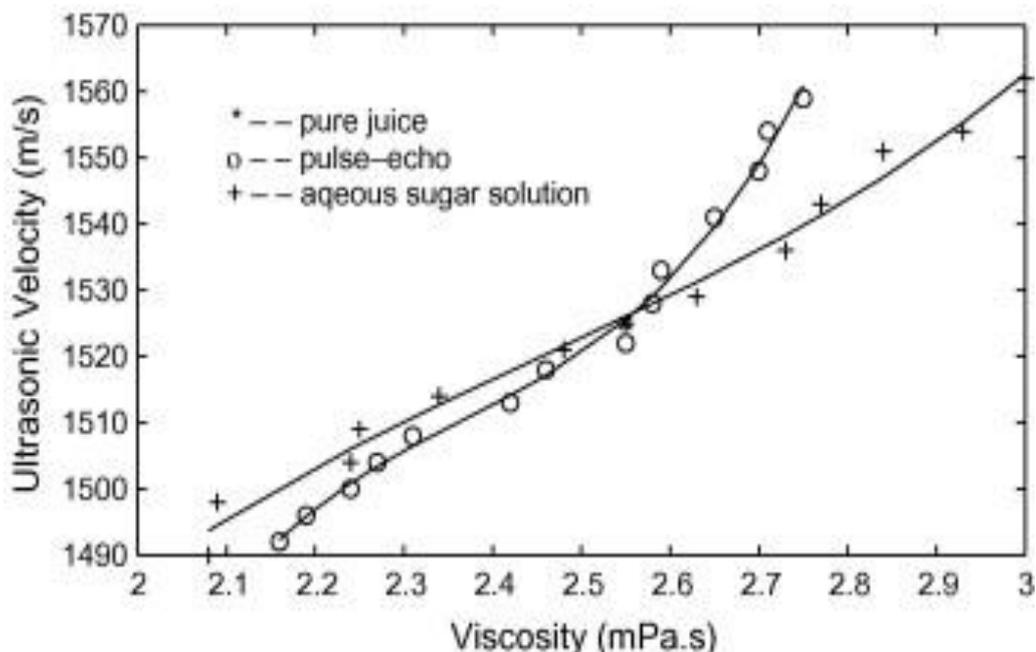


Figura 8. Relación entre velocidad ultrasónica y viscosidad del zumo de naranja y de soluciones acuosas de azúcar.

## 6. CONCLUSIONES

En las últimas décadas ha habido un progreso considerable en comparación a los primeros estudios que se llevaron a cabo. Estudios que se vieron obstaculizados por la falta de conocimiento sobre las respuestas de los tejidos de frutas y verduras a las ondas ultrasónicas, equipos deficientes o rangos de frecuencia inapropiados de los transductores. Se han desarrollado nuevas líneas de equipos y ha aumentado la conciencia de las ventajas que se pueden obtener mediante el uso de tecnología ultrasónica para la evaluación de la calidad de frutas y verduras frescas, la cual permite la obtención de productos de mayor calidad que cumplirán las expectativas de los consumidores, sin embargo, la mayoría de las técnicas de ultrasonidos siguen siendo una herramienta de investigación eficiente que aún no es aplicable en los procesos relacionados con la determinación de la calidad de frutas y verduras. Esto sugiere que la tecnología ultrasónica aún no está lista para el uso comercial y que aún queda mucho trabajo por hacer para poder incorporarla.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, J.A. 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biol. Technol.*, 15, pp. 207-225.
- Álvarez-Arenas, T.G. 2013. Air-coupled piezoelectric transducers with active polypropylene foam matching layers. *Sensors (Switzerland)*, 13, pp. 5996-6013.
- Awad, T.S. 2004. Ultrasonic studies of the crystallization behavior of two palm fats O/W emulsions and its modification. *Food Research International*, 37, pp. 579-586.
- Awad, T.S.; Moharram, H. A.; Shaltout, O. E.; Asker, D.; Youssef, M. M. 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*, 48, pp. 410-427.
- Bechar, A.; Mizrach, A.; Barreiro, P.; Landahl, S. 2005. Determination of mealiness in apples using ultra-sonic measurements. *Biosyst. Eng.*, 91, pp. 329-334.
- Benedito, J.; Carcel, J.A.; Rossello, C.; Mulet, A. 2001. Composition assessment of raw meat mixtures using ultrasonics. *Meat Science*, 57, pp. 365-370.
- Chanamai, R.; McClements, D.J. 1999. Ultrasonic determination of chicken composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47, pp. 4686-4692.
- Corredig, M.; Alexander, M; Dalgleish, D.G. 2004. The application of ultrasonic spectroscopy to the study of the gelation of milk components. *Food Research International*, 37, pp. 557-565.
- Crews Jr., D.H.; Kemp, R.A. 2002. Genetic evaluation of carcass yield using ultrasound measures on young replacement beef cattle. *J. Anim Sci.*, 80, pp. 1809-1818.
- de Prados, M.; Fulladosa, E.; Gou, P.; Muñoz, I.; Garcia-Perez, J.V.; Benedito, J. 2015. Non-destructive determination of fat content in green hams using ultrasound and X-rays. *Meat Science*, 104, pp. 37-43.
- De-Smedt, V., 2000. Measurement and modeling of mealiness in apples. Unpublished Phd, Katholieke University of Leuven, Belgium.
- Degani, C.; Bechor, V.; Albazri, R.; Blumenfeld, A. 1986. Dry weight content as an index for determination of maturity of avocado fruits. *Alon Hanotea*, 40, pp. 1017-1022.
- Diederichs, R., 1996. UT in Israel. *NDTnet-The e-Journal of Nondestructive Testing*, Dirección URL: [https://www.ndt.net/article/map/il\\_map/il.htm](https://www.ndt.net/article/map/il_map/il.htm) [Consulta: 17 Junio. 2006].
- Gaete-Garretón, L.; Vargas-Hernandez, Y.; Leon-Vidal, C.; Pettorino-Besnier, A. 2005. A novel noninvasive ultrasonic method to assess avocado ripening. *J.Food Sci.*, 70, pp. 187-191.
- Gallego-Juárez, J.; Rodríguez, G.; Acosta, V.; Riera, E. 2010. Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17, pp. 953-964.
- Ghaedian, R.; Decker, E.A.; McClements, D.J. 1997. Use of ultrasound to determine cod fillet composition. *Journal of Food Science*, 62, pp. 500-504.
- Ginel, A.M.; Álvarez-Arenas, T.G. 2019. Air-coupled Transducers for Quality Control in the Food Industry, 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, United Kingdom, pp. 803-806.
- Ha, K.; Kanai, H.; Chubachi, N.; Kamimura, K. 1991. A Basic Study on nondestructive evaluation of potatoes using ultrasound. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1*, 30, pp. 80-82.
- Hansen, J.D.; Emerson, C.L.; Signorotti, D.A. 1992. Visual detection of sweet-potato weevil by noninvasive methods. *Fla. Entomol.*, 75, pp. 369-375.
- Hauptmann, P.; Hoppe, N.; Puttmer, A. 2002. Application of ultrasonic sensors in the process industry. *Meas. Sci. Technol.*, 13, pp. 73-83.
- Hæggström, E.; Luukkala, M. 2001. Ultrasound detection and identification of foreign bodies in food products. *Food Control*, 12, pp. 37-45.
- Jiménez, N.; Picó, R.; Camarena, F.; Redondo, J.; Roig, B. 2012. Ultrasonic evaluation of the hydration degree of the orange peel. *Postharvest Biology and Technology*, 67, pp 130-137.
- Juodeikiene, G.; Basinskiene, L. 2004. Non-destructive texture analysis of cereal products. *Food Research International*, 37, pp. 603-610.

- Knorr, D.; Froehling, A.; Jaeger, H.; Reineke, K.; Schlueter, O.; Schoessler, K. 2011. Emerging Technologies in Food Processing. Annual Review of Food Science and Technology, 2, pp. 203-235.
- Krautkramer, J.; Krautkramer, H. 1990. Ultrasonic Testing of Materials. Springer, Heidelberg.
- Kuo, F.J.; Sheng, C.T.; Ting, C.H. 2008. Evaluation of ultrasonic propagation to measure sugar content and viscosity of reconstituted orange juice. Journal of Food Engineering, 86, pp. 84-90.
- Kuttruff, H. 1991. Ultrasonics: Fundamentals and Applications. Elsevier, New York.
- MacAndrew, A.; Harris, C. 1991. Sensors detect food contamination, Sensor Review, 11, 4, pp. 23-25.
- McClements, D.J.; Sundaram, G. 1997. Ultrasonic characterization of foods and drinks: principles, methods and applications. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 37, pp. 1-46.
- Mizrach, A.; Galili, N.; Rosenhouse, G. 1989. Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. Trans. ASAE, 32, pp. 2053-2058.
- Mizrach, A.; Galili, N.; Teitel, D.C.; Rosenhouse, G. 1994. Ultrasonic evaluation of some ripening parameters of autumn and winter-grown galia melons. Sci. Hortic., 56, pp. 291-297.
- Mizrach, A.; Flitsanov, U.; Fuchs, Y. 1997. An ultrasonic nondestructive method for measuring maturity of mango fruit. Trans. ASAE, 40, pp. 1107-1111.
- Mizrach, A.; Flitsanov, U.; El-Batsri, R.; Degani, C. 1999. Determination of avocado maturity by ultrasonic attenuation measurements. Sci. Hortic., 80, pp. 173-180.
- Mizrach, A.; Flitsanov, U.; Akerman, M.; Zauberman, G. 2000. Monitoring avocado softening in low-temperature storage using ultrasonic measurements. Comput. Electron. Agric., 26, pp. 199-207.
- Mizrach, A. 2000. Determination of avocado and mango fruit properties by ultrasonic technique. Ultrasonics, 38, pp. 717-722.
- Mizrach, A.; Bechar, A.; Grinshpon, Y.; Hofman, A.; Egozi, H.; Rosenfeld, L. 2003. Ultrasonic classification of mealiness in apples. Trans. ASAE, 46, pp. 397-400.
- Mizrach, A. 2004. Assessing plum fruit quality attributes with an ultrasonic method. Food Res. Int., 37, pp. 627-631.
- Mizrach, A. 2007. Nondestructive ultrasonic monitoring of tomato quality during shelf-life storage. Postharvest Biol. Technol., 46, pp. 271-274.
- Mizrach, A. 2008. Ultrasonic technology for quality evaluation of fresh fruit and vegetables in pre- and postharvest processes. Postharvest Biology and Technology, 48, pp. 315-330.
- Mohammadi, V.; Ghasemi-Varnamkhasti, M.; Ebrahimi, R.; Abbasvali, M. 2014. Ultrasonic techniques for the milk production industry. Measurement, 58, pp. 93-102.
- Mohammadi, V.; Ebrahimi, R.; Ghasemi-Varnamkhasti, M.; Abbasvali, M.; Lahimgarzade, A. 2016. Detection of microbial contamination of UHT milk packages using ultrasonic system. JFST, 13, pp. 149-157.
- Morse, P.M.; Ingard, K.U. 1968. Theoretical Acoustics. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Mulet, A.; Bedito, J.; Bon, J.; Sanjuan, N. 1999. Review: low intensity ultrasonics in food technology. Food Sci. Technol, 5, pp. 97-285.
- Niñoles, L.; Clemente, G.; Ventanas, S.; Bedito, J. 2007. Quality assessment of Iberian pigs through backfat ultrasound characterization and fatty acid composition. Meat Science, 76, pp. 102-111.
- Porteous, R.L.; Muir, A.Y.; Wastie, R.L. 1981. The identification of diseases and defect in potato tubers from measurements of spectral reflectance. J. Agric. Eng. Res., 26, pp. 151-160.
- Povey, M.J.W.; Harden, C.A. 1981. An application of the ultrasonic pulse echo technique to the measurement of crispness of biscuits. International Journal of Food Science & Technology, pp. 167-175.
- Ross, K.A.; Pyrak-Nolte, L.J.; Campanella, O.H. 2004. The use of ultrasound and shear oscillatory tests to characterize the effect of mixing time on the rheological properties of dough. Food Research International, 37, pp. 567-577.
- Sanchez, E.A. 2019. Análisis de textura en aguacate mediante ultrasonidos de señal sin contacto. Universitat Politècnica de València, Valencia.

- Skaf, A.; Nassar, G.; Lefebvre, F.; Nongaillard, B. 2009. A new acoustic technique to monitor bread dough during the fermentation phase. *Journal of Food Engineering*, 93, pp. 365-378.