



Facultad de Veterinaria
Universidad Zaragoza



Trabajo Fin de Grado en Ciencia y Tecnología de los alimentos

Determinación de la firmeza de manzanas por métodos invasivos y no invasivos

Apple firmness determination by invasive and non-invasive methods

Autor/es

Abel Morera Muñoz

Director/es

Fernando Blesa Moreno
Francisco José Torcal Milla

Facultad de Veterinaria

2018/2019

Índice

1. Resumen.....	2
2. Abstract	3
3. Introducción	4
3.1 Datos de producción y consumo	4
3.2 Características Físicas de la fruta	4
3.3 Maduración de frutas.....	5
3.4 Métodos para la determinación de la madurez	6
3.4.1 Espectroscopía de refracción infrarroja cercana	7
3.4.2 Análisis de imagen con luz laser	7
3.4.3 Espectroscopia de conteo de fotones laser	8
3.4.4 Resonancia magnética nuclear.....	8
3.4.5 Sensores basados en medidas fuerza-tiempo.....	8
3.4.6 Vibración mecánica	9
3.4.7 Firmeza a través de la curva fuerza-deformación	9
3.4.8 Respuesta ultrasónica a la vibración	10
3.4.9 Firmeza a partir de la respuesta acústica a la vibración	10
4. Justificación y Objetivos	11
4.1 Objetivo general.....	11
4.2 Objetivos parciales	11
5. Resultados y discusión	27
5.1 Resultados del primer experimento.....	28
5.2 Resultados del segundo experimento.....	30
5.3 Resultados del tercer experimento.....	32
6. Conclusiones.....	32
7. Conclusions.....	34
8. Valoración Personal.....	35
9. Bibliografía	36

1. Resumen

Los consumidores de frutas últimamente demandan una mayor calidad del producto. Antes se solían fijar solo en el sabor pero actualmente se fijan en otros factores, entre los que se encuentra la textura.

Entre los parámetros que se utilizan para medir la textura en frutas se encuentra la firmeza, que podemos definir como la resistencia de un material a la deformación. La firmeza es un parámetro que se utiliza para medir la maduración, tanto en el campo para conocer el momento óptimo en el cual se debe separar la fruta de la planta, como en los lugares donde se almacena o se manufactura la fruta.

Estos últimos años se han desarrollado muchos métodos para la determinación de la firmeza que no son invasivos, como por ejemplo la utilización de métodos acústicos. Por ello se marcó como objetivo de este trabajo el desarrollo de un método que permitiera conocer la firmeza de manzanas por un método no invasivo. Según la literatura, la firmeza de una manzana está relacionada con los armónicos del sonido del impacto de un péndulo con la superficie de la manzana y la masa de la manzana a través de un coeficiente. Este coeficiente se calculó experimentalmente y se comparó con los resultados obtenidos por métodos destructivos.

Para ello se utilizaron dos péndulos diferentes (de diferente masa) siendo el que dio resultados satisfactorios, el que consistía en un péndulo formado por una pequeña esfera unida al extremo de un hilo sin masa. Este método se comparó con medidas de firmeza realizadas con un penetrómetro manual obteniendo una correlación de $R^2=0,42$, acorde a los resultados observados en la bibliografía. Por motivos experimentales y de tiempo, se utilizaron alrededor de 30 manzanas como muestra para el tercer experimento (el más concluyente), lo que hace suponer que utilizando mayor cantidad de las mismas, el ajuste y correlación entre ambos métodos hubieran sido mejores.

Se llegó a la conclusión de que este último método sirve para poder determinar la firmeza de las manzanas mediante métodos no destructivos pero que hay una serie de condiciones tales como el silencio en el lugar de la determinación que hay que tener en cuenta para tener unos resultados satisfactorios.

2. Abstract

Fruit consumers lately demand higher product quality. Before they used to be fixed only in the taste but currently they are fixed in other factors, among which is the texture.

Among the parameters used to measure texture in fruits is firmness, which we can define as the resistance of a material to deformation. Firmness is a parameter that is used to measure ripening, both in the field to know the optimal moment in which the fruit must be separated from the plant, and in the places where the fruit is stored or manufactured.

In recent years, many methods for determining firmness that are not invasive have been developed, such as the use of acoustic methods. For this reason, the objective of this work was to develop a method that allowed to know the firmness of apples by a method non-invasive. According to the literature, the firmness of an apple is related to the harmonics of the sound of the impact of a pendulum with the surface of the apple and the mass of the apple through a coefficient. This coefficient was calculated experimentally and compared with the results obtained by destructive methods.

For this, two different pendulums (of different mass) were used, the one that gave satisfactory results, which consisted of a pendulum formed by a small ball attached to the end of a thread without mass. This method was compared with firmness measurements performed with a manual penetrometer, obtaining a correlation of $R^2 = 0.42$, according to the results observed in the literature. For experimental and time reasons, about 30 apples were used as a sample in the third experiment, which suggests that using more of them, the adjustment and correlation between the two methods would have been better.

It was concluded that this last method is used to determine the firmness of apples through non-destructive methods but that there are a number of conditions such as silence in the place of determination that must be taken into account to have satisfactory results.

3. Introducción

En este capítulo del Trabajo de Fin de Grado se van a detallar varios aspectos, cuyo conocimiento es importante a la hora de determinar los objetivos y de desarrollar el procedimiento experimental.

Se van a detallar los datos de producción y consumo de frutas, las características físicas de la fruta, la maduración de la fruta y métodos de determinación de la madurez. Este último apartado lleva incluida una descripción de aquellos métodos no destructivos, diseñados para el conocimiento de la firmeza de la fruta, cuya metodología y resultados han sido publicados en literatura científica.

3.1 Datos de producción y consumo

A nivel mundial se producen anualmente 1941 millones de kg de frutas y hortalizas. El principal país productor a nivel mundial es China con un 38% del total de la producción, España produce el 2% del total mundial, siendo según los datos facilitados por Eurostat el mayor productor de frutas en la Unión Europea, con un 27,1% de la producción total, lo que conlleva un total de 636.000 hectáreas cultivadas. La fruta que más se cultiva en la Unión Europea es la manzana, un total 12,7 millones de toneladas (25 kg/ hab Union Europea) siendo Polonia su principal productor, país que produce una de cada cuatro manzanas, un 25% del total de la producción, seguido por Italia con un 19,2% y por Francia por un 15,5%. España además es el mayor exportador de frutas y hortalizas en la unión europea y el tercer mayor exportador a nivel mundial tras China y los Estados Unidos. España exporta el 50% de su producción, siendo los principales productos exportados las hortalizas de invernaderos seguido de los cítricos, melocotón y nectarina. Los principales países a los que exporta España son Alemania, Francia, Reino Unido y Países Bajos. La manzana está clasificada dentro de las frutas de pepita, en España se obtienen de forma general 513.055 de kg de manzanas. Siendo la mayor productora de manzanas Cataluña 276.487 kg, seguido por Aragón con 90.026 kg. Los principales proveedores en España de manzanas son Francia, Italia y Portugal. El consumo de manzanas a nivel nacional es de 125.485 kg.

3.2 Características Físicas de la fruta

En los últimos años ha habido una mayor demanda por parte de los consumidores de fruta de mayor calidad. Entre las variables por las cuales los clientes demandan dicha

calidad se encuentra la textura, que se puede definir como la sensación que produce al tacto una determinada materia. La textura de los alimentos engloba a su vez otras variables como son la firmeza, la elasticidad, la cohesión y la viscosidad. La firmeza es una variable de la textura definida como la resistencia de un material a la deformación.

Las frutas son consideradas como materiales viscoelásticos ya que presentan tanto propiedades de flujo viscoso como de sólido elástico. Hay otros factores en la fruta que determinan el comportamiento reológico de éstas. Estos factores son la presión de turgencia, rigidez de la pared celular, contenido de fibra, agua, tiempo, temperatura y dimensiones geométricas. Tradicionalmente los consumidores a la hora de aceptar el consumo de una fruta se fijaban en el sabor aunque actualmente cada vez se fijan más en la textura y en el color. La medida de las propiedades mecánicas puede ser de especial importancia, en el momento de la cosecha de la fruta ya que podría indicar el momento óptimo para la separación de la fruta de la planta, en la eliminación de productos de una calidad indeseable y para la eliminación del daño mecánico durante la cosecha y la poscosecha.

3.3 Maduración de frutas

El fruto pasa por una serie de diferentes etapas, que están caracterizadas por una secuencia de cambios metabólicos continuos. Después de la polinización y cuajado, la planta pasa por tres etapas fisiológicas fundamentales, crecimiento, maduración y senescencia. La maduración se puede dividir en maduración fisiológica y maduración organoléptica. La maduración fisiológica comienza antes de que acabe el crecimiento celular y finaliza cuando el fruto tiene ya las semillas en disposición de producir nuevas plantas dándose solo en el árbol. La maduración organoléptica hace referencia al proceso en el cual las frutas adquieren unas características sensoriales que las hacen ser comestibles. Es el proceso en el cual el tejido maduro no comestible se transforma en un tejido visual, olfatorio y gustativamente atractivo. Por lo tanto, los cambios más importantes durante el proceso de maduración son el color y el sabor. En los frutos climatéricos estos procesos son controlados principalmente por el etileno y por la actividad respiratoria.

Un concepto importante dentro de lo que es la maduración de las frutas, es el concepto de fruta climatérica. Las frutas climatéricas son aquellas frutas que una vez han sido separadas de la planta siguen con su proceso de maduración organoléptica, por lo tanto

estas frutas se pueden recolectar verdes y llegar al mercado en su punto óptimo de maduración, diferenciándose de las frutas no climatéricas que una vez separadas de la planta se interrumpe cualquier tipo de maduración.

La maduración que se da una vez recolectadas es la maduración organoléptica, no dándose maduración fisiológica, por lo tanto las frutas climatéricas deben llegar en el árbol a su tamaño final.

3.4 Métodos para la determinación de la madurez

Medir la madurez de las frutas en el árbol no es fácil debido a los diferentes procesos metabólicos que se dan ocasionados por las condiciones medioambientales y los procesos de producción. Los principales parámetros para la determinación de la madurez de la fruta son la determinación de la firmeza de la pulpa y la determinación de la dulzura de la fruta, aunque en la mayor parte de las ocasiones la determinación de la calidad de la fruta durante la cosecha y el almacenamiento se reduce a la determinación de la firmeza de la pulpa.

La firmeza de la pulpa de la fruta se relaciona con las propiedades de textura, este parámetro puede ser juzgado por el ser humano, aunque para obtener unos resultados más objetivos se desarrollan pruebas mecánicas. Las pruebas mecánicas destructivas de textura incluyen pruebas de punción, compresión y corte, mientras que las pruebas no destructivas están relacionadas con los métodos de impacto, de interacción luz-materia, sónicos o ultrasónicos. Los horticultores definen la firmeza como la fuerza máxima alcanzada en la popular prueba destructiva del penetrómetro. Aunque desde hace unas décadas se están desarrollando otras técnicas no destructiva entre las que se encuentra la técnica de frecuencia de resonancia de impulso acústico (AIF) que utiliza las frecuencias naturales de la fruta intacta obtenida al grabar el sonido que se produce al golpear la fruta y luego realizar una transformación de Fourier en la señal. Para la fruta esférica, se puede calcular un factor de rigidez utilizando la frecuencia y la masa de la fruta. Esta técnica nos proporciona información útil sobre la calidad de la fruta. Sin embargo, este método no es satisfactorio para medir la textura de la fruta en el árbol. Debido a esto en la actualidad la lectura espectral óptica en el rango de longitud de onda visible se relaciona con el factor de rigidez para predecir la firmeza del fruto en el árbol. Por otro lado, para conocer la dulzura de la fruta durante su maduración organoléptica se utiliza la refractometría que es una técnica utilizada para conocer la concentración de

sólidos solubles en la fruta. Para todos los materiales la velocidad de la luz que los atraviesa es menor que la velocidad de la luz en el vacío, por lo tanto sus índices de refracción son superiores a la unidad. De la medida del índice de refracción del zumo de la fruta se puede estimar la cantidad de sólidos solubles (azúcares principalmente) que tiene. La medida se realiza en °Brix donde 1 °Brix equivale al índice de refracción de una solución de sacarosa en agua al 1%.

Empresas relacionadas con la manufacturación de la fruta y equipos de investigación han estado investigando durante estas últimas décadas sobre métodos no destructivos para determinar variables relacionadas con la madurez, aunque por ahora ninguno de ellos ha proporcionado toda la información necesaria para una correcta identificación del proceso de madurez de la fruta sin necesidad de que se tenga que dañar la fruta mecánicamente. Tal y como se ha comentado, la calidad del fruto está relacionada con variables internas como son la firmeza, el contenido en azúcar, contenido de ácido, defectos internos y variables externas como forma, tamaño y defectos externos.

A continuación se explican diferentes técnicas no destructivas que se han utilizado hasta el día de hoy para la medida de la firmeza en fruta.

3.4.1 Espectroscopía de refracción infrarroja cercana

Este método se ha utilizado en cerezas dulces y consiste en determinar la firmeza y el azúcar iluminándolo con una luz halógena (*Lu et al, 2001*) a una longitud de onda entre 800-1700 nanómetros. El método consistió en correlacionar el espectro reflejado por las cerezas al iluminarlas con la luz halógena a 800-1700 nm con unos valores de firmeza. (*Lu et al, 2001*). Los valores obtenidos del espectro reflejado fueron correlacionados con medidas de firmeza obtenidas mediante el test de magness-taylor, consiguiendo una correlación de $R^2=0,8$ para la longitud de onda de 800 nm y $R^2=0,65$ para la longitud de onda de 1700 nm. Las cerezas fueron clasificadas según su firmeza en tres grupos, $< 3,5$ N; $3,5-6$ N y > 6 N.

3.4.2 Análisis de imagen con luz láser

Para el cálculo de la firmeza en futa a partir del análisis de imagen con luz láser se muestran en la literatura tres métodos diferentes.

El primero de ellos consiste en un sistema que cuenta con un estereomicroscopio cuyo fin es el de grabar el área de dispersión de una manzana iluminada con un láser de

longitud de onda 670 nm (*Duprat et al*), obteniéndose una correlación de $R^2=0,84$ enfrentando el tamaño del área de luz dispersada con el módulo de Young.

En otro experimento se iluminó la fruta con un láser de helio-neón. El área de luz dispersada se grabó con una cámara, el número de píxeles de la zona cuya intensidad era mayor se enfrentó a la medida de la firmeza obtenida mediante métodos acústicos.

El último de todos consiste en iluminar las manzanas con diodos laser a 632,685 y 678 nm y comparar las características de las imágenes con los resultados de firmeza obtenidos mediante el test de magness-taylor.

3.4.3 Espectroscopia de conteo de fotones láser

Este método consiste en medir las características internas de la fruta mediante la técnica de reflectancia espectroscópica difusa. Esta técnica consiste en producir pequeños pulsos de luz láser que se ensanchan cuando pasa a través de los tejidos de la fruta. Los fotones que son recuperados tras su viaje a través de la fruta son grabados, a la vez que se toma también el tiempo transcurrido. El test se lleva a cabo utilizando los coeficientes de TSR en los rangos de VIS Y NIR y fue utilizado para crear modelos de estimación de variables internas de calidad. En el caso del modelo diseñado para la determinación de firmeza clasificó de manera correcta el 76 % de manzanas, 77 % de melocotones, 81 % de tomates, 75% de kiwis y 60% de melones, basándose en la firmeza standard de cada fruta.

3.4.4 Resonancia magnética nuclear

Esta técnica sirve para medir las características internas de la fruta basándose en propiedades magnéticas del núcleo de los átomos. Aunque no se puede medir directamente la firmeza, las características que consiguen con la resonancia magnética nuclear pueden afectar a la firmeza y a las características reológicas. Normalmente el núcleo excitado es el de hidrógeno y la información relacionada con la firmeza está relacionada con la cantidad de agua, el movimiento del agua y la cantidad de puentes de hidrogeno que constituyen los tejidos de la fruta.

3.4.5 Sensores basados en medidas fuerza-tiempo

Los sensores basados en las medidas fuerza-tiempo, se basan en la teoría de que una fruta que impacta sobre una superficie dura o el impacto de una esfera sobre la fruta

pueden ser estudiados como el impacto entre dos cuerpos elásticos (Chen et al, 1996) llegando a la conclusión de que la fuerza y el tiempo del impacto estaban relacionados con la medida de la firmeza en frutas.

La técnica del impacto se ha llevado a cabo de las siguientes maneras, golpeando la superficie de la fruta con un elemento que llevaba integrado un sensor, poniendo la fruta sobre una célula de carga y dejando caer un peso sobre ella y poniendo la fruta sobre una placa plana que debajo de ella se encontraba una célula de carga (*García Ramos et al 2005*) Posteriormente se desarrolló un equipo consistente en un brazo en cuyo extremo tenía un pequeño cuerpo semiesférico, que llevaba instalado un acelerómetro. El brazo con el pequeño cuerpo semiesférico se dejaba desde diferentes alturas. Los resultados obtenidos tras el experimento mostraron que cuanto menor era la masa del elemento de impacto, los resultados eran mejores (*García Ramos et al, 2005*). También se desarrolló un sistema de impacto lateral basado en un brazo que desarrollaba un movimiento lateral con una cabeza semiesférica que llevaba acoplada un acelerómetro piezoeléctrico (*Chen et al, 1996*).

Por otro lado, una evolución del equipo destinado a llevar a cabo estos experimentos fue el desarrollo de un sensor de impacto manual como si fuera una pistola que se utilizaba en huertos para conocer el estado de maduración. Las únicas limitaciones de este sensor eran que las medidas se tenían que hacer en una posición correcta que era la vertical y con un contenido de humedad concreto (*Chen et al, 2000*).

3.4.6 Vibración mecánica

Para la determinación de la firmeza de la fruta mediante la vibración mecánica, se coloca la fruta sobre una superficie que vibra a una frecuencia ya preseleccionada. La respuesta de la fruta a la vibración mecánica es captada por un acelerómetro situado en un soporte que estaba en contacto con la parte de arriba de la fruta (*Peleg, 1993*). A partir de este método se llegó a la conclusión de que los frutos blandos atenuaban la vibración mientras que los frutos más firmes daban una mayor señal.

3.4.7 Firmeza a través de la curva fuerza-deformación

El estrés de deformación entre dos cuerpos en contacto es proporcional a su módulo elástico e inversamente proporcional al radio. Basándose en ello se desarrolló un método, el cual consiste en aplicar una pequeña fuerza de deformación a la fruta de

manera que no produzca daño alguno. La fuerza de deformación se aplica con un embolo metálico que bien podía ser una esfera metálica pequeña o un embolo con una sonda con extremo plano. La curva de fuerza-deformación se capta mediante un sensor pizoelectrico que se coloca en la parte posterior de la zona donde se ejerce la fuerza de compresión (*Macnish et al 1997*).

3.4.8 Respuesta ultrasónica a la vibración.

Es difícil conocer el índice de firmeza mediante la captación de ultrasonidos debido a que son fuertemente atenuados cuando viajan a través de los tejidos vegetales. Además, estas ondas no penetran profundamente en la fruta (*Chen et al, 1996*).

Se realizaron dos estudios de determinación de firmeza mediante la respuesta ultrasónica de manzana en dos variedades distintas. Dando resultados positivos en la determinación de la firmeza en la variedad jonagold y no dando resultados satisfactorios en la variedad cox (*Mizrach et al, 2001*).

3.4.9 Firmeza a partir de la respuesta acústica a la vibración

La respuesta de las frutas y hortalizas a la vibración depende de su masa, su coeficiente de elasticidad y su forma. Las vibraciones que se usan comúnmente son las vibraciones mecánicas y las acústicas. Las vibraciones acústicas son captadas por un micrófono o por un sensor pizoeléctrico tras haber sufrido la fruta un pequeño impacto. El sonido de la vibración emitida por el impacto es captado por un micrófono que se encuentra en la parte opuesta de la zona de la fruta donde recibe el impacto. El sonido es transformado a una señal frecuencial mediante la transformada de Fourier. Para conocer la firmeza a partir de este método de respuesta acústica a la vibración, se desarrollaron unas ecuaciones que eran una evolución de unas ecuaciones que ya se utilizaban con el propósito de calcular el coeficiente de elasticidad. (*Landahl et al, 2003*)

$$S=f^2*m^{2/3}$$

$$S=f^2*m$$

Siendo S la firmeza, f la frecuencia fundamental o alguno de los primeros armónicos del sonido de impacto entre el péndulo y la fruta y m la masa de la fruta.

Este último método es el que se ha llevado a cabo en el presente Trabajo Fin de Grado.

4. Justificación y Objetivos

Tras conocer la necesidad que tienen los agricultores y las empresas transformadoras de fruta de determinar la firmeza de la fruta mediante técnicas que no la dañen y habiendo leído literatura científica en la cual se explicaba el desarrollo de métodos no invasivos de determinación de la firmeza de la fruta. Se decidió desarrollar un método de determinación de la firmeza mediante señales acústicas en manzanas. El hecho de utilizar manzana es debido a que es una fruta que se encuentra presente en el mercado durante todo el año y además reúne la condición de que es una fruta climatérica.

4.1 Objetivo general

Desarrollo de un sistema de determinación de firmeza en manzanas mediante un método no destructivo basado en el análisis de las señales acústicas registradas al golpear la manzana con un péndulo y comparación de los resultados frente un método destructivo ya testado.

4.2 Objetivos parciales

- Conocer la frecuencia fundamental y primeros armónicos producidos al golpear con un péndulo la superficie de la fruta
- Conocer la firmeza de la manzana mediante un método destructivo (texturómetro o penetrómetro).
- Calcular el coeficiente que nos indica la firmeza de la manzana mediante el método no destructivo.
- Cuantificar la cantidad de sólidos solubles presentes en la manzana.
- Obtener la firmeza y la elasticidad de la manzana por ambos métodos.
- Calcular el módulo de Young de la manzana.

Comparar los resultados obtenidos por el método destructivo y no destructivo para establecer una correlación entre ambos.

Durante el desarrollo del método experimental se realizaron tres experimentos, en el primer experimento se contaron con 50 manzanas de la variedad Golden. El experimento se realizaba de 10 manzanas en 10 manzanas, tomando los datos una vez a la semana, y consistía en:

- El primer paso de todos consistió en pesar las manzanas y en clasificarlas numerándolas, con el fin de tener una correcta identificación a lo largo de todo el proceso experimental.

	Peso (g)		Peso (g)		Peso (g)		Peso (g)
Manzana 11	223,79	Manzana 21	208,79	Manzana 31	221,49	Manzana 41	207,63
Manzana 12	200,59	Manzana 22	205,13	Manzana 32	218,71	Manzana 42	186,11
Manzana 13	210,41	Manzana 23	205,07	Manzana 33	199,34	Manzana 43	212,13
Manzana 14	186,89	Manzana 24	231,88	Manzana 34	231,08	Manzana 44	210,88
Manzana 15	247,96	Manzana 25	210,27	Manzana 35	220,79	Manzana 45	213,21
Manzana 16	192,51	Manzana 26	216,63	Manzana 36	187,88	Manzana 46	202,92
Manzana 17	194,61	Manzana 27	203,3	Manzana 37	212,56	Manzana 47	197,68
Manzana 18	203,57	Manzana 28	194,34	Manzana 38	212,12	Manzana 48	209,58
Manzana 19	209,24	Manzana 29	232,93	Manzana 39	201,7	Manzana 49	192,47
Manzana 20	202,94	Manzana 30	188,72	Manzana 40	221,52	Manzana 50	206,27

- Obtener la frecuencia fundamental y primeros armónicos (Tabla 1) de la vibración producida por el golpe entre un péndulo y la superficie de una fruta: Se construyó un péndulo con materiales y soportes que se encontraban en el laboratorio de Física. Como podemos ver en la imagen 1 se ve el péndulo con el micrófono conectado al ordenador. También se observa la colocación de la manzana en la parte inferior.



Imagen 1: Péndulo con el que se realizaron los impactos en los experimentos 1 y 2

Con este péndulo se golpeaban las superficies de las manzanas, para ello se colocaron las manzanas sobre una superficie lisa en la cual se golpeaban desde una altura en la cual el péndulo se encontraba en una posición paralela a la del suelo. El sonido resultante del impacto del péndulo con la superficie de la fruta era recogido por un micrófono que estaba situado al lado de la manzana

golpeada y a su vez este micrófono estaba conectado a un ordenador. El ordenador tenía instalado un programa de análisis de sonidos llamado audacity, que es un programa de ordenador con el cual se pueden grabar y editar audios. Con el programa de análisis de sonidos audacity se grababa el impacto del péndulo con la superficie de la fruta y se guardaban los audios obtenidos en el ordenador. Una vez obtenidos todos los audios, se recortaban con el programa audacity todas aquellas partes del audio que pudieran aportar sonidos que pudieran interferir en el análisis del audio. Para conocer las tres frecuencias más altas en el programa audacity, se seleccionaba el audio y se le hacía una análisis de espectro. Una vez se observaba el espectro (Imagen 2) había que asegurarse que el análisis se realizaba en una frecuencia lineal y no logarítmica. Una vez que se había comprobado que todo estaba bien se apuntaban las frecuencias de los tres primeros picos.

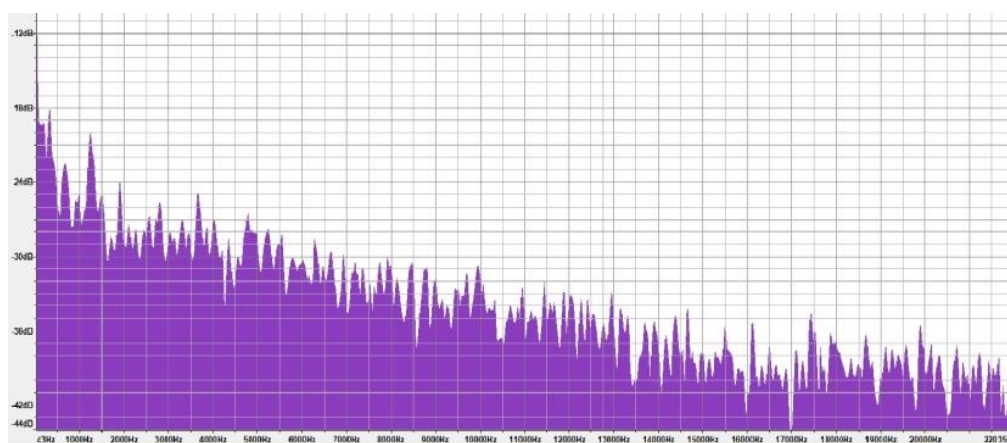


Imagen 2: Ejemplo del espectro frecuencial de sonido obtenido por el impacto entre el péndulo y la manzana en el método 1.

Tabla 1: Firmeza de los sonidos obtenidos al golpear el péndulo con la manzana en el primer experimento

	F_0 (Hz)	F_1 (Hz)	F_2 (Hz)
Manzana 1	300	560	664
Manzana 2	203	327	621
Manzana 3	210	517	675
Manzana 4	196	324	618
Manzana 5	176	293	518
Manzana 6	158	298	453

Manzana 7	210	322	426
Manzana 8	298	410	515
Manzana 9	313	517	674
Manzana 10	192	326	681
Manzana 11	188	534	704
Manzana 12	217	279	644
Manzana 13	304	413	625
Manzana 14	326	729	847
Manzana 15	119	282	513
Manzana 16	109	469	623
Manzana 17	326	499	458
Manzana 18	125	337	936
Manzana 19	122	347	986
Manzana 20	356	640	765
Manzana 21	338	620	847
Manzana 22	387	639	667
Manzana 23	385	678	725
Manzana 24	129	348	746
Manzana 25	378	537	645
Manzana 26	298	365	746
Manzana 27	367	623	336
Manzana 28	113	203	624
Manzana 29	153	367	682
Manzana 30	267	474	596
Manzana 31	152	335	646
Manzana 32	170	365	590
Manzana 33	119	324	755
Manzana 34	158	341	796
Manzana 35	341	637	548
Manzana 36	165	359	681
Manzana 37	365	676	839
Manzana 39	356	654	753
Manzana 40	300	494	681

Manzana 41	165	357	593
Manzana 42	340	706	927
Manzana 43	167	338	594
Manzana 44	356	753	933
Manzana 45	350	636	761
Manzana 46	342	499	666
Manzana 47	336	643	761
Manzana 48	151	335	702

- Calcular el coeficiente (Tabla 2) que nos indica la firmeza de la manzana mediante el método no destructivo.: Para calcular el valor del coeficiente que nos indica el valor de la firmeza obtenido por el método no destructivo, se utilizó una ecuación que se encontraba en la bibliografía científica consultada (*Landalh et al 2002*). Esta fórmula viene expresada como $S = f^2 * m^{2/3}$. Se calculó este coeficiente para cada una de las tres primeras frecuencias que se habían observado. Para los cálculos posteriores se utilizó una hoja de datos, como Excel.

Tabla 2: Tabla de valores de coeficiente de firmeza por métodos no destructivos

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆
Manzana 1	18567,9	64698,816	90961,2538	31423,6066	31423,6066	109493,811
Manzana 2	9159,11234	23766,0395	85712,5687	15120,5045	15120,5045	39234,6436
Manzana 3	19294,958	53666,2854	91480,3875	32951,1332	32951,1332	91649,068
Manzana 4	7323,24208	20011,5749	72806,1721	12724,4682	12724,4682	34771,0271
Manzana 5	5439,69536	15075,9429	47120,3776	9713,85234	9713,85234	26921,6332
Manzana 6	5248,18172	18669,2649	43141,0881	8826,27187	8826,27187	31397,5424
Manzana 7	8834,553	20771,0157	36355,0871	15098,5735	15098,5735	35498,4239
Manzana 8	19504,0225	36919,803	58251,3668	32326,6203	32326,6203	61192,1183
Manzana 9	19504,0225	53436,4169	90818,8579	33495,9915	33495,9915	91387,1741
Manzana 10	8249,79456	23783,506	103785,074	13588,2306	13588,2306	39173,7954
Manzana 11	7089,65296	57199,442	99415,6134	12111,2383	12111,2383	97713,6793

Manzana 12	8800,46321	14547,7045	77510,011	15392,536	15392,536	25444,8044
Manzana 13	22915,4714	42294,2892	96859,375	36475,5279	36475,5279	67321,6144
Manzana 14	20459,1928	102307,707	138108,407	35432,685	35432,685	177183,762
Manzana 15	2755,87221	15476,1656	75533,7847	4755,58583	4755,58583	26705,9676
Manzana 16	2755,87221	44777,4608	53573,3133	4111,45474	4111,45474	76118,1463
Manzana 17	2418,61517	52100,9692	118956,288	37456,8864	37456,8864	87760,1922
Manzana 18	22237,1902	23047,6929	78766,8993	5395,91538	5395,91538	39219,7577
Manzana 19	3170,9375	24435,8025	42569,5062	5140,01949	5140,01949	41581,8736
Manzana 20	3020,55896	85520,384	182920,084	44603,93	44603,93	144156,118
Manzana 21	26461,2094	78851,972	199426,565	39736,1867	39736,1867	133701,465
Manzana 22	23434,8717	83734,3875	120012,091	52082,2836	52082,2836	141993,938
Manzana 23	30713,1288	106591,526	166352,799	55945,306	55945,306	173500,84
Manzana 24	34370,413	25464,5381	93546,81	5884,33826	5884,33826	42822,9614
Manzana 25	3499,10307	62469,3765	113866,144	51538,2102	51538,2102	104014,6
Manzana 26	30952,9609	27084,6425	84577,8825	30703,7047	30703,7047	46062,1263
Manzana 27	18053,8532	75428,9899	108153,319	45189,7835	45189,7835	130221,959
Manzana 28	26175,4603	9598,81237	26296,8653	4834,00585	4834,00585	15600,638
Manzana 29	2974,28317	25418,5081	73483,0387	7701,8457	7701,8457	44314,3191
Manzana 30	4417,74648	49763,4872	103020,315	26097,0813	26097,0813	82248,1425
Manzana 31	15789,8006	24544,7298	77689,2914	9526,69927	9526,69927	40738,2192
Manzana 32	5739,82524	26557,0715	83187,7714	9861,90494	9861,90494	45462,0168
Manzana 33	5760,926	24257,8541	80438,948	5332,55687	5332,55687	39530,435
Manzana 34	3272,32388	25673,682	125855,82	9119,41767	9119,41767	42477,7682
Manzana 35	5511,80156	76235,8797	119043,774	38144,254	38144,254	133106,49
Manzana 35	21846,8743	27394,9454	63832,6182	9696,66182	9696,66182	45903,2313
Manzana	5786,946	92172,0592	141980,866	45820,1311	45820,1311	157167,951

36						
Manzana 37	26871,4825	94747,6483	125603,834	46399,0004	46399,0004	156590,036
Manzana 38	28074,5587	45417,54	86310,5597	29337,4468	29337,4468	79548,8131
Manzana 39	16749,9	27035,7564	74595,3024	9683,58011	9683,58011	45331,9597
Manzana 40	5775,23925	105110,184	181215,3	40955,7386	40955,7386	176590,091
Manzana 41	24377,728	24357,9632	75228,1636	9953,3969	9953,3969	40772,9168
Manzana 42	5946,21369	115057,466	176639,628	43763,9552	43763,9552	195797,22
Manzana 43	25717,2691	79960,7693	114480,639	41569,7976	41569,7976	137263,811
Manzana 44	24215,8	52185,6296	92960,4665	41268,5081	41268,5081	87855,2358
Manzana 45	24513,3151	79576,529	111463,419	37634,5955	37634,5955	137825,839
Manzana 46	21729,0931	23148,6508	101650,681	7959,96712	7959,96712	39178,4268
Manzana 47	4703,16227	79576,52	192675,324	37634,5955	137825,839	193053,647
Manzana 48	4,703,87	84678,765	176834,547	7959,96712	39178,4268	172040,859

- Comparar los resultados obtenidos por el método destructivo y no destructivo. Una vez calculados los resultados de los coeficientes de los valores de firmeza obtenidos por el método no destructivo y del módulo de Young o coeficiente de elasticidad obtenidos por un método destructivo, se compararon estos resultados mediante la elaboración de un diagrama de dispersión de puntos en Excel, calculando la línea de tendencia y la R^2 .

El segundo método utilizado consistió en comparar el coeficiente obtenido con los datos de masa y frecuencias de vibración con el módulo de elasticidad o Young. Para este experimento se utilizaron un total de 42 manzanas. El método es muy similar al anterior y comienza por el peso de todas las manzanas. Los datos de peso se muestran a continuación.

nº Manzana	peso (g)								
Manzana 51	203,61	Manzana 61	207,72	Manzana 71	196,67	Manzana 81	178,68	Manzana 91	201,23
Manzana 52	165,87	Manzana 62	174,59	Manzana 72	193,74	Manzana 82	233,73	Manzana 92	177,09
Manzana 53	195,47	Manzana 63	208,76	Manzana 73	226,16	Manzana 83	174,62	Manzana 93	221,97
Manzana 54	208,25	Manzana 64	211,14	Manzana 74	199,97	Manzana 84	219,59	Manzana 94	195,22
Manzana 55	200,95	Manzana 65	201,23	Manzana 75	215,87	Manzana 85	183,23		
Manzana 56	204,6	Manzana 66	197,97	Manzana 76	212,16	Manzana 86	211,7		
Manzana 57	184,53	Manzana 67	212,09	Manzana 77	204,51	Manzana 87	202,32		
Manzana 58	239,2	Manzana 68	225,17	Manzana 78	201,82	Manzana 88	239,17		
Manzana 59	200,27	Manzana 69	186,21	Manzana 79	219,66	Manzana 89	232,55		
Manzana 60	193,86	Manzana 70	200,38	Manzana 80	209,46	Manzana 90	227,64		

Los pasos llevados a cabo en este experimento son:

- Obtener la frecuencia fundamental y primeros armónicos (Tabla 3) producidos por el golpe del péndulo del experimento anterior sobre la manzana. El sonido resultante del impacto del péndulo con la superficie de la fruta era recogido por un micrófono que estaba situado al lado de la manzana golpeada y a su vez este micrófono estaba conectado a un ordenador. El ordenador tenía instalado un programa de análisis de sonidos llamado audacity, que es un programa de ordenador con el cual se pueden grabar y editar audios.

Con el programa de análisis de sonidos audacity se grababa el impacto del péndulo con la superficie de la fruta y se guardaban los audios obtenidos en el ordenador. Una vez obtenidos todos los audios, se recortaban con el programa audacity todas aquellas partes del audio que pudieran aportar sonidos que pudieran interferir en el análisis del audio. Para conocer las tres frecuencias más altas en el programa audacity, se seleccionaba el audio y se le hacía una análisis de espectro. Una vez ya salía el espectro había que asegurarse que el análisis se realizaba en una frecuencia lineal y no logarítmica. Una vez que se había comprobado que todo estaba bien se apuntaban las frecuencias de los tres primeros picos los cuales se observaban visualmente.

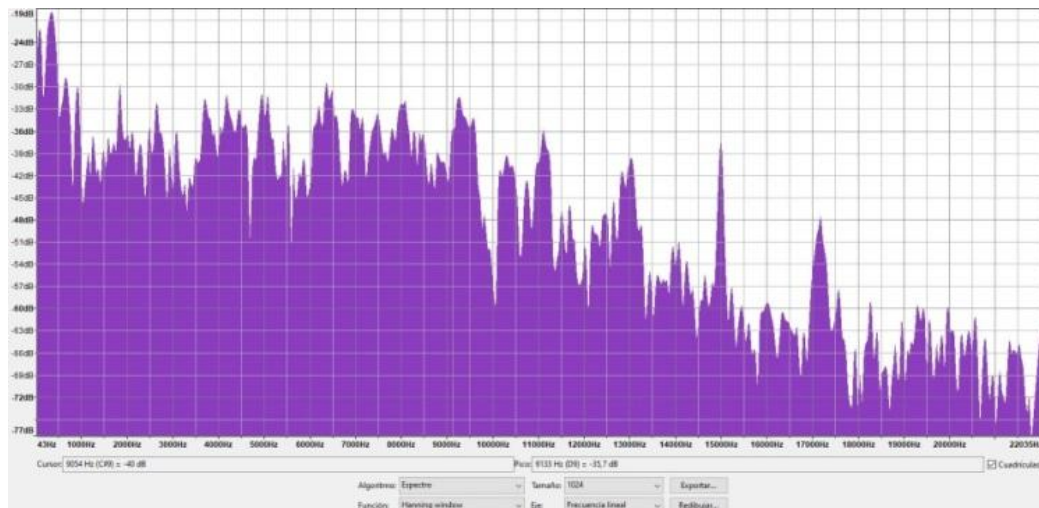


Imagen 3: Espectro frecuencial de sonido obtenido por el impacto entre el péndulo y la manzana en el método 2

Tabla 3: Frecuencias del sonido del golpe en el segundo experimento

	F_0	F_1	F_2
Manzana 1	80	339	599
Manzana 2	82	350	546
Manzana 3	76	335	681
Manzana 4	70	339	514
Manzana 5	79	333	591
Manzana 6	69	320	671
Manzana 7	80	337	721
Manzana 8	87	352	557
Manzana 9	66	344	517
Manzana 10	122	336	541
Manzana 11	67	333	647
Manzana 12	70	352	671
Manzana 13	71	348	690
Manzana 14	107	332	559
Manzana 15	126	319	486
Manzana 16	76	340	571
Manzana 17	347	752	840
Manzana 18	339	696	927
Manzana 19	110	332	639
Manzana 20	60	335	501
Manzana 21	66	362	498
Manzana 22	119	346	645
Manzana 23	335	552	772
Manzana 24	118	330	559
Manzana 25	108	327	555
Manzana 26	110	333	584
Manzana 27	147	347	572
Manzana 28	317	545	783
Manzana 29	79	326	541

Manzana 30	73	358	642
Manzana 31	74	255	363
Manzana 32	99	354	742
Manzana 33	368	629	882
Manzana 34	73	364	641
Manzana 35	300	634	764
Manzana 36	302	651	968
Manzana 37	183	372	645
Manzana 38	73	355	788
Manzana 39	315	646	980
Manzana 40	67	361	651
Manzana 41	367	628	969
Manzana 42	126	360	683
Manzana 43	333	660	1057
Manzana 44	66	348	626
Manzana 45	264	374	642
Manzana 46	156	370	754
Manzana 47	300	591	945
Manzana 48	312	643	933
Manzana 49	325	722	972
Manzana 50	359	638	1014
Manzana 51	365	837	975
Manzana 52	337	692	886
Manzana 53	313	681	924
Manzana 54	338	611	1022
Manzana 55	63	357	500
Manzana 56	323	718	926
Manzana 57	328	693	949
Manzana 58	311	635	864

- Calcular el coeficiente (Tabla 4) que nos indica la firmeza de la manzana mediante el método no destructivo: Para calcular el coeficiente que nos indicaba los valores de la firmeza obtenidos por el método no destructivo, se utilizó una ecuación que se encontraba en la bibliografía científica consultada (*Landalh et al 2002*). Esta fórmula es $S = f^2 * m^{2/3}$. Se calculó este coeficiente para cada una de las frecuencias que se habían observado. Para ello se utilizó una hoja de datos, como Excel.

Tabla 4: Coeficiente firmeza métodos no destructivo segundo experimento

	S_1	S_2
Manzana 1	28772,77077	45651,4163
Manzana 2	30934,925	48941,59
Manzana 3	28414,24775	44914,5769
Manzana 4	29996,67942	46936,9919
Manzana 5	27856,42569	44148,2083
Manzana 6	29310,976	44475,4317

Manzana 7	26910,17455	43487,4835
Manzana 8	31140,79232	49345,5751
Manzana 9	30250,23168	47664,1038
Manzana 10	31931,50464	48645,1007
Manzana 11	29958,88113	46342,5452
Manzana 12	33219,90144	51518,1986
Manzana 13	30438,27936	48231,7361
Manzana 14	26327,0024	42431,9507
Manzana 15	26534,18075	41533,4089
Manzana 16	32527,528	49638,6526
Manzana 17	149123,4048	232546,122
Manzana 18	116574,7104	187417,032
Manzana 19	30958,61488	47272,9898
Manzana 20	26816,16375	43214,3154
Manzana 21	35587,61908	54954,7204
Manzana 22	28337,97436	45810,3139
Manzana 23	85527,36576	130625,946
Manzana 24	29926,809	46030,9108
Manzana 25	27218,77695	42948,1281
Manzana 26	28343,2284	44661,0607
Manzana 27	30081,78047	47762,6786
Manzana 28	75337,421	119015,859
Manzana 29	27223,66016	42865,6496
Manzana 30	29807,10148	48469,4973
Manzana 31	15265,269	24745,5111
Manzana 32	31292,65836	49693,2209
Manzana 33	97885,53981	155923,936
Manzana 34	32946,45536	52393,0145
Manzana 35	97209,03904	156026,107
Manzana 36	94388,95872	155716,556
Manzana 37	34716,39408	55045,0621
Manzana 38	32954,27725	51533,9497
Manzana 39	103072,8788	164279,97
Manzana 40	32225,77688	51342,1122
Manzana 41	99183,63216	157132,65
Manzana 42	30493,584	49393,9754
Manzana 43	116941,176	181276,258
Manzana 44	26791,83792	44298,379
Manzana 45	35236,16316	55792,1986
Manzana 46	33848,525	53929,6558
Manzana 47	75888,28287	126233,553
Manzana 48	97296,95317	157594,168
Manzana 49	141784,0352	218831,424
Manzana 50	100572,4315	160275,234
Manzana 51	164850,8914	267020,439
Manzana 52	106748,3629	176053,587
Manzana 53	105500,9899	172823,355
Manzana 54	89529,84222	144102,889
Manzana 55	31734,801	50443,204
Manzana 56	131932,9021	207802,949

Manzana 57	118323,7486	188742,674
Manzana 58	90931,26975	149391,076

- Obtener la firmeza y elasticidad de la manzana por métodos destructivos. Para obtener el módulo de Young o de elasticidad, fue necesario conocer dos parámetros, la firmeza y la elasticidad. Para ello las determinaciones se llevaron a cabo en el texturómetro (Aname, TA-XT2i) que se encuentra ubicado en el laboratorio físico-químico de la planta piloto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Zaragoza.

Este equipo a su vez está conectado a un ordenador que tiene instalado un software que recoge todos los datos obtenidos durante la realización de las mediciones. Antes de realizar las mediciones hay que crear el proyecto y poner los parámetros con los que se van a realizar las mediciones. Para la realización de estas mediciones se estimaron que la distancia que el objeto de penetración iba a penetrar era de 8 mm y la velocidad de penetración 1 mm/s. El elemento que penetra la manzana fue el vástago plano de tamaño 1/10. Las penetraciones en la manzana se realizaron en tres partes de la manzana las cuales se situaban en los laterales y en la parte de atrás de la zona en la cual había recibido el impacto con el péndulo. Por último, los resultados fueron proporcionados directamente por el software instalado por el ordenador, que proporcionaba las tres medidas de firmeza en gramos y tres medidas de la elasticidad en mm, así como sus respectivas medias y desviaciones.

- Obtener el módulo de Young de la fruta. Para obtener el módulo de Young de la fruta se necesitaron los datos de firmeza y de elasticidad obtenidos con el texturómetro usando la siguiente fórmula: $Y=F/e^2$ siendo F la firmeza que se expresa en Newton y la e la elasticidad expresada en mm. Para ello los datos obtenidos de la firmeza en el texturómetro en gramos se transformaron a Newton, pasando la firmeza en gramos a kilogramos y multiplicando estos datos por 9,8 (aceleración de la gravedad). Una vez obtenidos estos valores se aplicó la ecuación del módulo de Young $Y=F/ e^2$. Se utilizaron las medias de los resultados obtenidos en el punto anterior, mediante una hoja de datos como es Excel.

- Comparar los resultados obtenidos por el método destructivo y no destructivo. Una vez calculados los resultados de los coeficientes de los valores de firmeza obtenidos por el método no destructivo y del módulo de Young o coeficiente de elasticidad obtenidos por un método destructivo, se compararon estos resultados mediante la elaboración de un diagrama de dispersión de puntos en Excel, calculando la línea de tendencia y la R^2 .

Tras realizar los dos experimentos anteriores caímos en la cuenta de que el sonido producido por el impacto era demasiado grande, lo que llevaba a cálculos erróneos. Esto nos llevó a llevar a cabo un tercer método modificando la naturaleza del péndulo.

El tercer método utilizado en el experimento consistió en comparar las medidas de la firmeza obtenidas mediante un método no destructivo al impactar un péndulo formado por una pequeña esfera de plástico colgada de un hilo de masa despreciable con los datos obtenidos al hacer las determinaciones de la firmeza con un método destructivo. Las partes fundamentales son las mismas que en los métodos anteriores.

- Conocer la frecuencia fundamental (Tabla 5) que se registra mediante el golpe de un objeto y la superficie de una fruta: El péndulo con él se golpeaban las superficies de las manzanas en los primeros métodos se eliminó sustituyéndose por uno consistente en un hilo (sin masa) que llevaba acoplado en un extremo una pequeña esfera de plástico de 7,76 gramos (Imagen 4).



Imagen 4: Péndulo formado por hilo y bola pequeña en el extremo, utilizado en el método 3

Las manzanas antes de ser golpeadas por el péndulo fueron pesadas en una báscula y clasificadas para su correcta identificación a lo largo del método experimental. Para este experimento se utilizaron un total de 34 manzanas cuyos pesos se muestran en la tabla.

Manzana	Masa (g)		
1	219,36	13	215,86
2	215,25	14	211,35
3	223,65	15	206,47
4	208,78	16	205,65
5	225,36	17	221,86
6	216,99	18	223,49
7	213,24	19	220,19
8	214,04	20	216
9	207,75	21	211,34
10	228,2	22	214,44
11	209,32	23	204,36
12	213,66	24	205,9
		25	225,93
		26	215,79
		27	223,94
		28	219,08
		29	235,13
		30	229,12
		31	220,59
		32	223,83
		33	203,95
		34	217,77

Ilustración 1: Masa manzanas experimento 3

También fueron marcados los tres puntos en los cuales se iba a golpear la manzana dejando una distancia entre ellos de 120° . Se decidió golpear la manzana en tres lugares para realizar un análisis estadístico de los datos y tratar de eliminar la dependencia de las medidas con la zona de golpeo (más madura en el lado que le ha dado el sol en el árbol). Una vez realizados estos pasos preliminares, se colocó la fruta sobre una base que la sujetara debido a la forma irregular de muchas de ellas que hacía que no se sostuvieran bien. Una vez estaba la manzana colocada y sujeta, se golpeaba la manzana desde una altura la cual el péndulo se colocaba de manera paralela a la superficie donde se encontraba la manzana. Una vez realizado el primer golpe se giraba la manzana 120° para realizar el segundo golpe y se repetía la operación antes de golpearla por tercera vez.

La captura del sonido y tratamiento es idéntico a los dos experimentos anteriores. En la Imagen 5 se muestra un ejemplo del espectro de frecuencias obtenido. Se puede observar la menor intensidad del sonido en general, debido a la menor masa del péndulo utilizado.

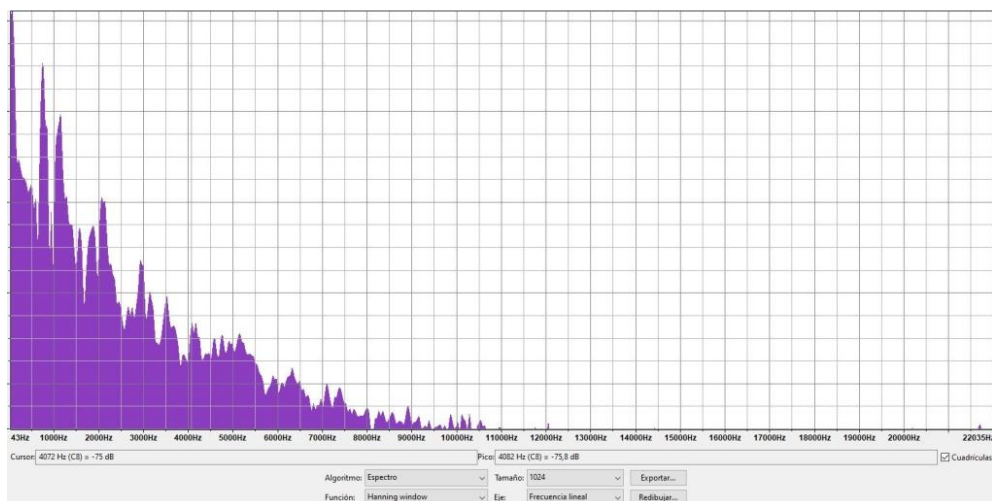


Imagen 5: Ejemplo de espectro obtenido con el método 3.

Tabla 5: Frecuencias del golpe del tercer experimento

	F1	F2	F3
Manzana 1	759	623	765
Manzana 2	710	710	683
Manzana 3	765	757	761
Manzana 4	787	776	711
Manzana 5	762	808	800
Manzana 6	765	754	753
Manzana 7	768	735	720
Manzana 8	754	773	707
Manzana 9	702	761	745
Manzana 10	830	753	797
Manzana 11	744	769	725
Manzana 12	833	840	838
Manzana 13	768	815	764
Manzana 14	765	770	769
Manzana 15	777	765	769
Manzana 16	758	775	759
Manzana 17	684	668	651
Manzana 18	808	771	801
Manzana 19	646	639	637
Manzana 20	803	730	808
Manzana 21	895	797	801
Manzana 22	727	747	730
Manzana 23	691	669	668
Manzana 24	729	752	765
Manzana 25	710	740	770
Manzana 26	722	734	738
Manzana 27	739	725	736
Manzana 28	694	750	735
Manzana 29	703	757	732

Manzana 30	684	687	719
Manzana 31	802	804	800
Manzana 32	665	651	672
Manzana 33	835	863	854
Manzana 34	729	741	740

- Conocer la firmeza de la manzana mediante un método destructivo. Para conocer la firmeza destructivamente, se utilizó en esta ocasión un penetrómetro manual. Conocidos ya los tres puntos en los cuales había impactado el péndulo con la superficie de la manzana, se cogieron las tres partes que se encontraban entre esos puntos para hacer la prueba destructiva. La prueba destructiva se hizo penetrando con el penetrómetro de manera perpendicular a la superficie de la manzana sin piel. La piel se retira antes de la determinación de la firmeza con un pelador que viene incluido con el penetrómetro.
- Conocer la cantidad de sólidos solubles que hay en la manzana: Se determinó la cantidad de sólidos solubles totales mediante refractometría, para ello se utilizó el refractómetro, colocando sobre el refractómetro el zumo desprendido tras la determinación de la firmeza de las manzanas con el penetrómetro, la superficie del refractómetro donde se pone el zumo debe estar limpia, para evitar que cualquier otra sustancia interfiera en el valor de las medidas.
- Calcular el coeficiente (Tabla 6) que nos indica la firmeza de la manzana mediante el método no destructivo. Una vez obtenidos los datos de la masa de la manzana y de la frecuencia fundamental del sonido obtenido al impactar el péndulo con la superficie de la manzana, se calculó el coeficiente que nos indica el valor de la firmeza aplicando el método no destructivo. La fórmula que se utilizó es la viene expresada mediante la siguiente ecuación $S = f^2 \cdot m^{2/3}$.

Tabla 6: Coeficientes firmeza método no destructivo tercer experimento

	S_1
Manzana 1	18629157,1
Manzana 2	17649462,2
Manzana 3	21337748
Manzana 4	20220769,3
Manzana 5	23112064,4
Manzana 6	20710978,8
Manzana 7	19598170,5

Manzana 8	19842076,7
Manzana 9	19001285,5
Manzana 10	23502920,5
Manzana 11	19619358,6
Manzana 12	25038005,6
Manzana 13	22024114,3
Manzana 14	20927817,6
Manzana 15	20729811,5
Manzana 16	20336327,5
Manzana 17	16336990,7
Manzana 18	23178400,8
Manzana 19	14966812,5
Manzana 20	21921124
Manzana 21	24501340,7
Manzana 22	19336796,9
Manzana 23	15854674,2
Manzana 24	19544049,7
Manzana 25	20313248,2
Manzana 26	19242062,2
Manzana 27	19831579,3
Manzana 28	19172280,4
Manzana 29	20338111,3
Manzana 30	18172948,5
Manzana 31	23482227,1
Manzana 32	16188344,8
Manzana 33	25072711,5
Manzana 34	19642981,4

- Comparar los resultados obtenidos por el método destructivo y no destructivo. Los valores de la firmeza obtenidos mediante la aplicación del método no destructivo que habían sido calculados mediante la fórmula expresada en el punto anterior fueron comparados con los valores de firmeza obtenidos mediante la aplicación del método destructivo. Para ello se hizo en Excel una gráfica de dispersión de puntos, en la cual se calculó su línea de tendencia y su valor de R^2 .

5. Resultados y discusión

En esta sección se detallarán los resultados obtenidos y se discutirá su validez en términos científicos a fin de determinar la utilidad de los resultados obtenidos en posibles aplicaciones posteriores.

5.1 Resultados del primer experimento

En este primer experimento se obtuvieron, como se puede ver en las imágenes, seis gráficas. Las tres primeras gráficas representan la correlación de los valores de firmeza, obtenidos al desarrollar el método no destructivo, calculados mediante una ecuación que relaciona las frecuencias de los primeros armónicos y la frecuencia fundamental obtenidas al golpear la manzana con un péndulo y la masa de la manzana, $S=f^2*m$. Las tres siguientes gráficas representan la correlación de los mismos valores, pero el valor obtenido mediante el método no destructivo, en vez de calcularlo con la ecuación detallada anteriormente, es calculado con la ecuación $S=f^2*m^{2/3}$. Los valores de R^2 obtenidos en las gráficas fueron los siguientes: Primera gráfica 0,0055, segunda gráfica 0,0043, tercer gráfica 0,0188, cuarta gráfica 0,0065, quinta gráfica 0,0167 y sexta gráfica 0,0167.

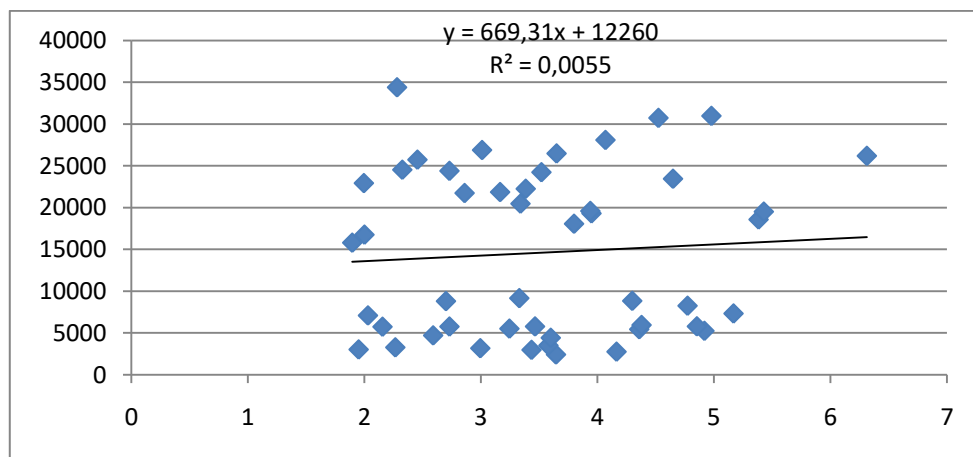


Figura 1: Correlación entre medida de firmeza con penetrómetro en x con coeficiente de firmeza no destructivo en y calculado con f_0 y m (f^2*m)

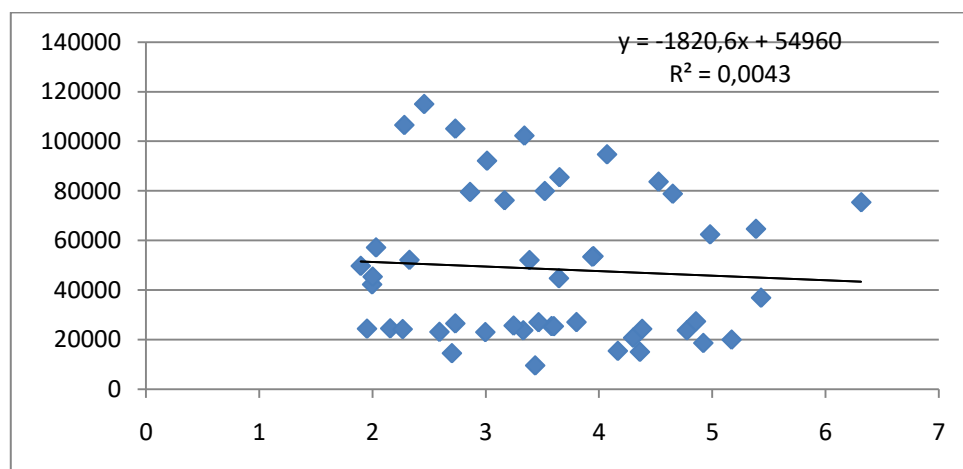


Figura 2: Correlación entre medida de firmeza con penetrómetro en x con coeficiente de firmeza no destructivo en y calculado con f_1 y m (f^2*m)

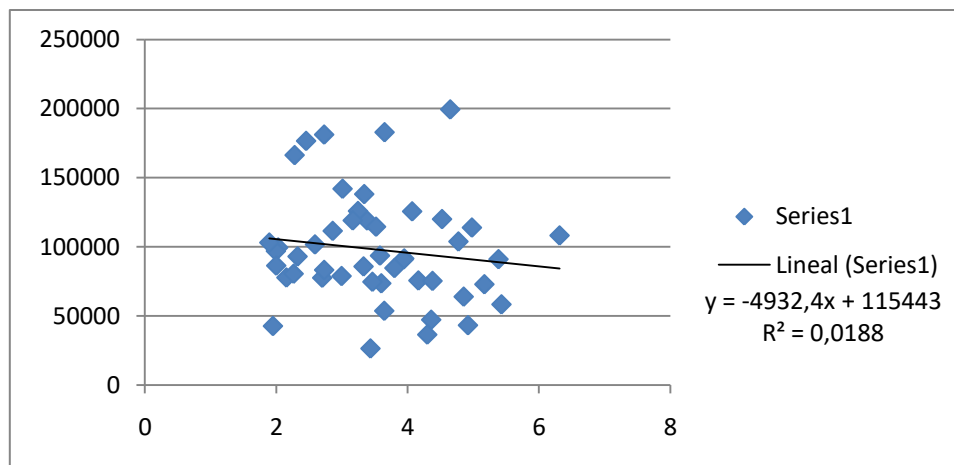


Figura 3: Correlación entre medida de firmeza con penetrómetro en x con coeficiente de firmeza no destructivo en y calculado con f_2 y m ($f_2 \cdot m$)

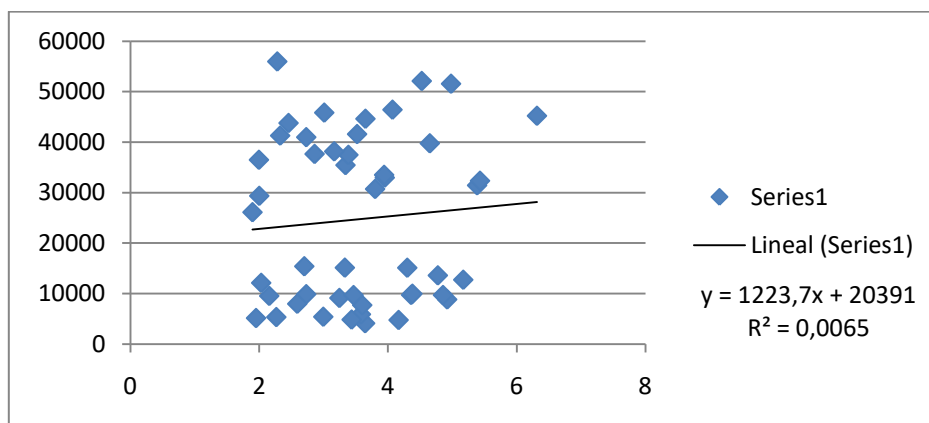


Figura 4: Correlación entre medida de firmeza con penetrómetro en x con coeficiente de firmeza no destructivo en y calculado con f_0 y m ($f_0 \cdot m^{2/3}$)

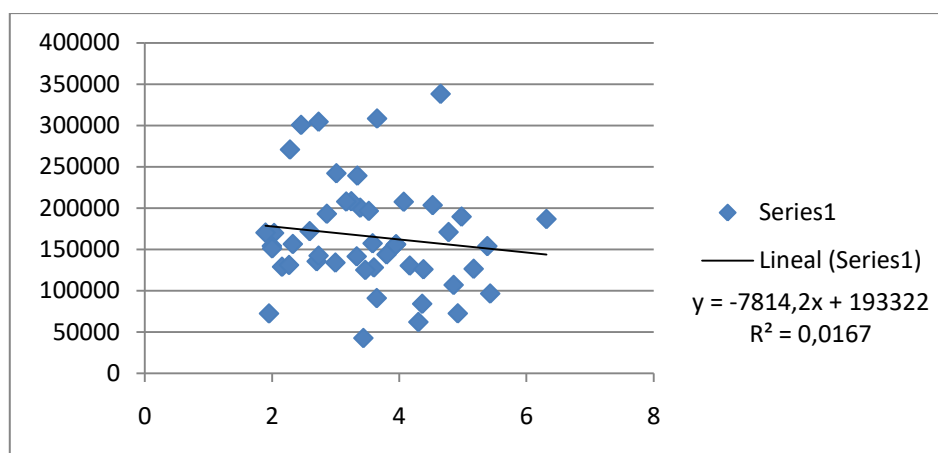


Figura 5: Correlación entre medida de firmeza con penetrómetro en x con coeficiente de firmeza no destructivo en y calculado con f_1 y m ($f_1 \cdot m^{2/3}$)

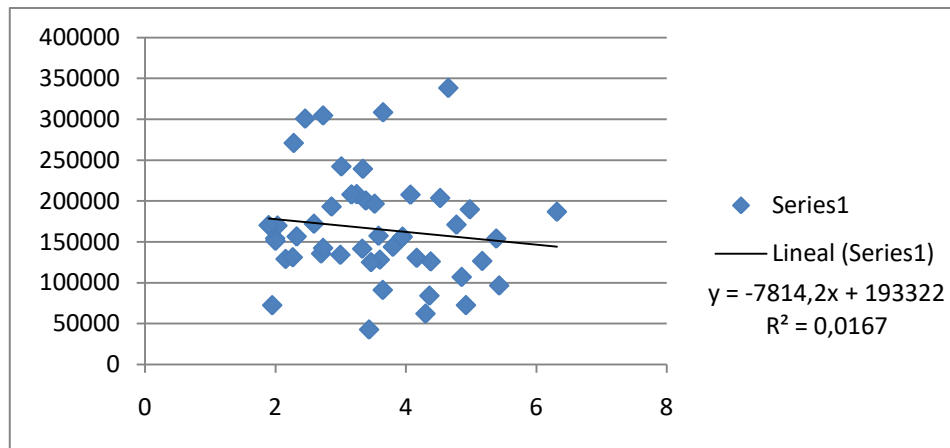


Figura 6: Correlación entre medida de firmeza con penetrómetro en x con coeficiente de firmeza no destructivo en y calculado con $f^2 \cdot m$ y $f^2 \cdot m^{2/3}$

Tras observar estos gráficos en los cuales se representaban los coeficientes de los valores de la firmeza obtenidos mediante métodos no destructivos, que fueron calculados mediante las ecuaciones $f^2 \cdot m$ y $f^2 \cdot m^{2/3}$, siendo f la frecuencia del sonido al impactar el péndulo con la manzana y m la masa de la manzana. Con los valores obtenidos mediante el método destructivo con el penetrómetro digital, se llega a la conclusión que no existe ninguna correlación significativa, debido a que la dispersión de los puntos es muy grande y por lo tanto el valor de R^2 es muy bajo en todas las gráficas. Esto puede ser debido a que la masa del péndulo con el que fueron golpeadas las manzanas fuese muy grande y a que el sonido ocasionado al impactar el péndulo con las manzanas no fuera bien grabado por audacity, debido a que el espectro de grabación saturaba.

5.2 Resultados del segundo experimento

En el segundo experimento, como se puede observar, se obtuvieron dos gráficas. En la primera gráfica se puede observar la correlación del módulo de Young, que se obtiene por métodos destructivos tras penetrar la fruta con el texturómetro y obtener los datos de firmeza y elasticidad para aplicar la siguiente fórmula $Y = F/e^2$, con los valores de firmeza obtenidos mediante el método no destructivo, calculados con la ecuación $s = f^2 \cdot m$, siendo f la frecuencia obtenida tras el impacto del péndulo con la manzana y la m la masa de la manzana. En la segunda gráfica los mismos datos del módulo de Young

correlacionados en la primera gráfica se correlacionan con los datos de firmeza obtenidos mediante el método no destructivo aplicando la ecuación $s=f^2*m^{2/3}$.

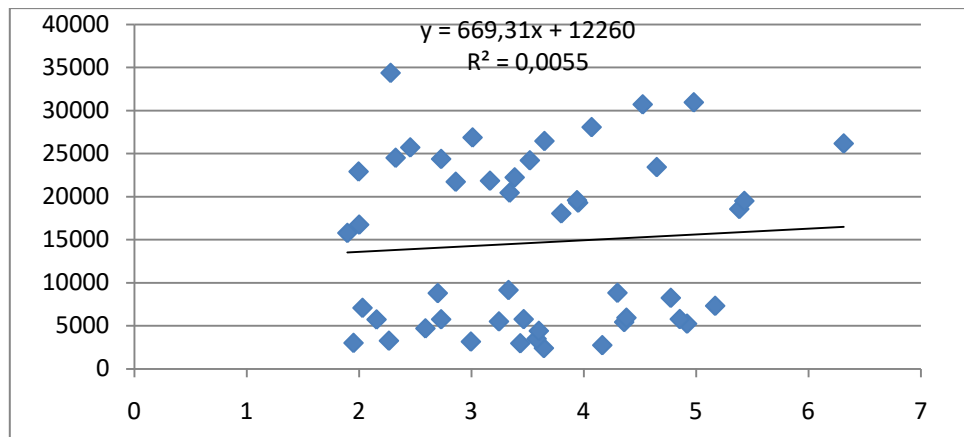


Figura 7: Correlación entre valores de módulo de young en x y coeficiente de firmeza obtenidos por métodos no destructivos en y calculado con f_1 y m ($f^2*m^{2/3}$)

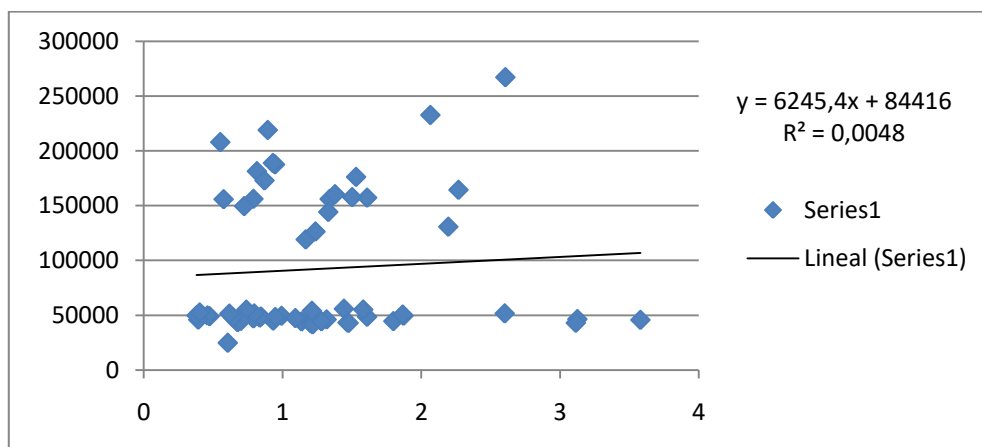


Figura 8: Correlación entre valores de módulo de young en x y coeficiente de firmeza obtenidos por métodos no destructivos en y destructivos en y calculado con f_1 y m ($f^2*m^{2/3}$)

La diferencia entre el primer método y el segundo método era que en este método los coeficientes del valor de firmeza obtenidos mediante la aplicación del método no destructivo se enfrentaban al valor del módulo de Young o módulo de elasticidad obtenido con el texturómetro. Se llega a la conclusión que la dispersión de los puntos en las gráficas es muy grande e incluso es mayor que la dispersión obtenida en el experimento 1. Los valores de R^2 son muy bajos con lo que la correlación no es significativa. Esto puede ser debido a que las masa del péndulo a utilizado, que es el mismo péndulo que se utilizó para el experimento 1 fuera muy grande ocasionando unos sonidos fuertes y que los valores de módulo de Young no fueran los valores correctos

para poder correlacionar la medida de firmeza de un método destructivo con la medidas de firmeza obtenidas mediante un método no destructivo

5.3 Resultados del tercer experimento

En este primer método solo se obtuvo una gráfica, la cual se observa la correlación de los valores de firmeza obtenidos al desarrollar el método no destructivo, mediante los valores de la frecuencia fundamental obtenida tras impactar el péndulo, formado por un hilo sin masa y una pequeña esfera en su extremo, y la masa de la manzana con las medidas de la firmeza obtenidas mediante un método destructivo con el penetrómetro.

El tercer método que consistió en comparar los valores de firmeza obtenidos mediante el método no destructivo, al calcular un coeficiente que dependía de la frecuencia principal obtenida al golpear la fruta con un péndulo formado por un hilo y una esfera pequeña en su extremo y la masa de la manzana, con los valores de la firmeza de la manzana obtenidos mediante un penetrómetro manual, sí que dio una correlación significativa, obteniendo un valor de $R^2 = 0,42$. Comparando con los dos métodos desarrollados con anterioridad se puede observar que la masa del péndulo sí que influía a la hora de calcular el coeficiente de firmeza del método no destructivo.

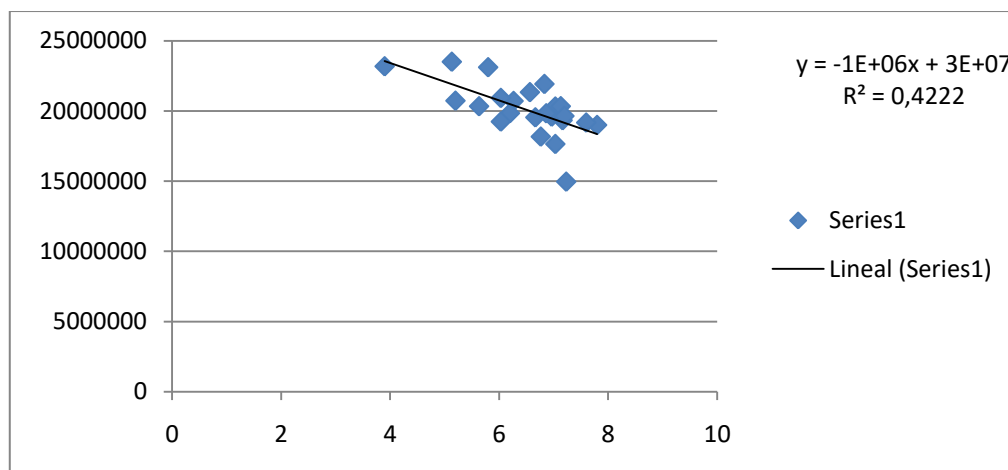


Figura 9: Correlación entre el valor de la firmeza obtenido por un método destructivo en x con un valor de firmeza obtenido por un método no destructivo en y destructivos en y calculado con f_1 y m ($f^2 \cdot m^{2/3}$)

6. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo fue desarrollar un método que sirviera para medir la firmeza de manzanas de una forma no destructiva satisfactoriamente. Para lograr el objetivo del trabajo se desarrollaron los tres métodos siguientes. El primer método

consistió en comparar los valores de la firmeza obtenidos mediante un método no destructivo al golpear la manzana con un péndulo, con los valores de firmeza obtenidos con un método destructivo. El segundo método consistió en comparar los valores de la firmeza obtenidos mediante un método no destructivo al golpear la manzana con un péndulo con los valores del módulo de Young obtenidos con un método destructivo. Para finalizar, el tercer método consistió en calcular el valor de la firmeza en manzanas obtenido al golpear con un péndulo que en su extremo tenía una pequeña esfera de plástico comparándolo con los datos obtenidos en la determinación de la firmeza mediante un método destructivo con un penetrómetro manual.

De los tres métodos utilizados el que ha dado unos resultados satisfactorios ha sido el tercer método. Esto fue debido a que al comparar los resultados de los valores de firmeza obtenidos al aplicar el método no destructivo, que fueron calculados a partir de la formula $S=f^2*m^{2/3}$ con los valores obtenidos al aplicar el método destructivo (módulo de Young o firmeza), fue el único método, que al someterlos a un análisis estadístico dio un valor significativo de correlación ($R^2=0,42$). Con este valor de R indica que hay una correlación significativa entre ambos parámetros. Creemos, por otro lado, que una mayor muestra y más uniforme hubiera dado valores de correlación mayores en las medidas.

Por lo tanto se llegó a la conclusión de que este método es un método útil para conocer tanto la firmeza de las manzanas de manera no destructiva. Aunque el valor de R^2 no sea muy elevado, hay otros factores que se van a exponer a continuación que nos indican que este método si se desarrolla en una condiciones óptimas es un método valido para la determinación de la firmeza por métodos no destructivos.

Todas las determinaciones fueron realizadas en laboratorio del departamento de Física la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Zaragoza, aunque los equipos para hacer las determinaciones y el espacio eran ideales, tenía el pequeño problema de que no había un silencio total debido a que está situado al lado de los pasillos de la facultad y se escuchaban ruidos constantes y personas pasando. Aunque se intentaba hacer con el mayor silencio posible al final siempre había ruidos que eran inevitables. Por ello se llegó a la conclusión de que este método no es adecuado para hacerlo en el campo ya que allí siempre va a haber una serie de ruidos y sonidos que son inevitables, como el canto de pájaros, por ejemplo.

Otro punto a tener en cuenta es que las manzanas habían sido compradas en un supermercado y por ello no se sabía si provenían de un lote homogéneo, el momento de recolección y el tiempo que habían sido almacenadas. Creemos que el haber contado con un lote más grande y homogéneo hubiera dado mejores resultados en la correlación de las medidas.

7. Conclusions

The objective of this work was to develop a method that was used to measure the firmness of apples in a satisfactory non-destructive way.

To achieve the objective of the work, the following three methods were developed.

The first method was to compare the firmness values obtained by a non-destructive method by hitting the apple with a pendulum, with the firmness values obtained with a destructive method

The second method was to compare the firmness values obtained by a non-destructive method by hitting the apple with a pendulum with the values of the young module obtained with a destructive method

The third method consisted in calculating the value of firmness in apples with a pendulum that at its end contained a small ball comparing them with the data obtained in determining firmness by means of a destructive method with a manual penetrometer.

Of the three methods used, the one that has given satisfactory results has been the third method. This was because when comparing the results of the firmness values obtained when applying the non-destructive method, which were calculated from the formula $S = f^2 * m^{2/3}$ with the values obtained when applying the destructive method (Young's module or firmness), was the only method in which when subjected to a statistical analysis gave a value of $R^2 = 0.42$. With this value of r indicates that there is a significant correlation between both parameters.

Therefore it was concluded that this method is a useful method to know both the firmness of apples and other fruits in a non-destructive way. Although the value of R^2 is not the most appropriate, there are other factors that will be explained below that

indicate that this method if developed under optimal conditions is a valid method for determining firmness by non-destructive methods.

All the determinations were made in the laboratory of the Department of Physics, the Faculty of Veterinary Medicine of the University of Zaragoza, although the equipment to make the determinations and the space was ideal, it had a small problem, there was no total silence because it is located side of the halls of the faculty and noise was heard. Although it was tried to do with the greatest possible silence in the end there were always noises that will be inevitable, so it was concluded that this method is not suitable for doing so in the field since there whenever there are a series of noises are inevitable

Another point to keep in mind is that apples had been bought in a supermarket and therefore they didn't know if they came from a homogeneous lot, the time of collection and the time they had been stored.

8. Valoración Personal

Agradezco la ayuda ofrecida por los dos profesores que han tutelado este trabajo.

Entre los puntos positivos con los que valoro la realización de este trabajo se encuentra que he podido investigar sobre métodos poco utilizados en la industria alimentaria y en la agricultura para conocer una característica de la textura de la fruta como es la firmeza.

Otro aspecto positivo que tiene la realización de estos trabajos experimentales, te hace ver que no siempre obtienes unos resultados la primera vez que desarrollas la metodología a desarrollar y te ayuda a buscar alternativas a partir de unos datos que ya has obtenido.

Al poder leer literatura científica, he podido conocer una gran cantidad de métodos no destructivos utilizados para conocer la firmeza de las frutas.

También he aprendido a trabajar con un programa a análisis de sonidos como es audacity, el cual lo he utilizado para poder conocer la frecuencia de los sonidos que obteníamos al golpear el péndulo con las manzanas.

He podido aprender un poco más sobre el funcionamiento de Excel, debido a que con el elaboré las gráficas de dispersión de puntos que permitían correlacionar los resultados

obtenidos por el método no destructivo y el método destructivo y además he podido comprender el valor de R^2 , para poder conocer el grado de correlación existente entre dos variables que se pintan en la una misma gráfica.

9. Bibliografía

[Bechar et al, 2005] Bechar, A., Mizrach, A., Barreiro, P. and Landahl, S. (2005). Determination of Mealiness in Apples using Ultrasonic Measurements. *Biosystems Engineering*, 91(3), pp.329-334.

[Chen et al,1996] Chen, P., Ruiz-Altisent, M. and Barreiro, P. (1996). Effect of Impacting Mass on Firmness Sensing of Fruits. *Transactions of the ASAE*, 39(3), pp.1019-1023.

[Chen et al,2000] CHEN P., SARIG Y., THOMPSON J.F., 2000. A hand-held impact sensor for firmness sensing of fruits. Proc Postharvest Congress, Jerusalem. March 26-31.

[García et al, 1988] GARCÍA C., RUIZ-ALTISENT M., CHEN P., 1988. Impact parameters related to bruising in selected fruits. Proc Summer Meeting of the ASAE. Rapid City, South Dakota, USA. Paper 88-6027.

[García-Ramos et al, 2005]García-Ramos, F., Valero, C., Homer, I., Ortiz-Cañavate, J. and Ruiz-Altisent, M. (2005). Non-destructive fruit firmness sensors: a review. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 3(1), pp.61-73.

[García Ramos et al, 2003] García-Ramos, F., Ortiz-Cañavate, J., Ruiz-Altisent, M., Díez, J., Flores, L., Homer, I. and Chávez, J. (2003). Development and implementation of an on-line impact sensor for firmness sensing of fruits. *Journal of Food Engineering*, 58(1), pp.53-57.

[Flitsanov et al, 2000] Flitsanov, U., Mizrach, A., Liberzon, A., Akerman, M. and Zauberman, G. (2000). Measurement of avocado softening at various temperatures using ultrasound. *Postharvest Biology and Technology*20(3), pp.279-286.

Hortoinfo.es. (2019). Italia y España, los mayores productores de hortalizas en la Unión Europea.

[Landahl et al, 2003] Landalh, S., Jancsó, P. and De Baerdemaeker, J. (2003). Firmness of developing apples on the tree and shortly after harvest measured with the acoustic impulse response technique. *Acta Horticulturae*, (600), pp.63-70.

[Lu,2001] Lu (2001). Predicting firmness and sugar content of sweet cherries using near-infrared diffuse reflectance spectroscopy. *Transactions of the ASAE*, 44(5).

[Macnish et al,1997] Macnish, A., Joyce, D. and Shorter, A. (1997). A simple non-destructive method for laboratory evaluation of fruit firmness. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 37(6), p.709.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2019). *Fruta de Pepita Campaña 2018/2019*.

[Mizrach, 2008] Mizrach, A. (2008). Ultrasonic technology for quality evaluation of fresh fruit and vegetables in pre- and postharvest processes. *Postharvest Biology and Technology*, [online] 48(4), pp.315-330.