

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



CALIBRACIÓN Y ENSAYO DE UN EQUIPO NEUMÁTICO NO DESTRUCTIVO DESARROLLADO PARA LA EVALUACIÓN DE FIRMEZA EN FRUTA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y DEL MEDIO RURAL

ALUMNO: FILIBERTO LLOBREGAT SEMPÈRE
TUTORA: MARÍA CORAL ORTIZ SÁNCHEZ
TUTOR: CARLOS BLANES CAMPOS

Curso Académico: 2017/2018

VALENCIA, 25 DE NOVIEMBRE DE 2017

Resumen

La firmeza es un parámetro importante para la estimación de la calidad de las frutas. Es por esto por lo que muchos estudios están destinados a la medida de este parámetro. Los análisis no destructivos se basan en la no realización de daños a la pieza medida. En el presente trabajo, se ha ensayado la medida de firmeza de aguacate mediante un equipo impactador no destructivo desarrollado en el Instituto de Automática Industrial de la Universitat Politècnica de València. Este equipo dispone de un vástago de impacto con un sistema “jamming” de vacío capaz de adaptarse a la forma irregular del aguacate. El equipo es capaz de extraer diferentes parámetros relacionados con la firmeza mediante un acelerómetro situado en el vástago. Un lote de 125 aguacates inmaduros se almacenó durante 7 días con la idea de obtener distintos niveles de firmeza. En 5 días distintos, un lote de 25 aguacates se ensayó de forma no destructiva y destructiva. Los resultados obtenidos confirman una alta repetibilidad del equipo. Además, muestran una alta correlación entre los parámetros no destructivos de firmeza extraídos del impactador y la firmeza destructiva medida en un ensayo de compresión destructiva.

Palabras clave:

firmeza, no destructivo, fruta

Resum

La fermesa és un paràmetre important per a l'estimació de la qualitat de les fruites. És per això pel que molts estudis estan destinats a la mesura d'este paràmetre.

Els anàlisis no destructius es basen en la no realització de danys a la peça mesurada. En el present treball, s'ha assajat la mesura de fermesa mitjançant un equip *impactador* no destructiu, desenvolupat en l'Institut d'Automàtica Industrial de la Universitat Politècnica de València. Este equip disposa d'un pern d'impacte amb un sistema "*jamming*" de buit, capaç d'adaptar-se a la forma irregular de l'alvocat. L'equip és capaç d'extreure diferents paràmetres relacionats amb la fermesa mitjançant un acceleròmetre situat en el pern. Un lot de 125 alvocats immadurs es varen emmagatzemar durant 7 dies amb la idea d'obtindre diferents nivells de fermesa. En 5 dies diferents, es va dur a terme l'assaig, en lots de 25 alvocats cada vegada, de forma no destructiva i destructiva. Els resultats obtinguts confirmen una elevada repetibilitat de l'equip. A més, mostren una alta correlació entre els paràmetres no destructius de fermesa extrets de l'*impactador* i la fermesa destructiva mesurada en un assaig de compressió.

Paraules clau:

fermesa, no destructiu, fruita

Abstract

Firmness is a very important factor related to fruit quality. For this reason, many scientific studies have been developed in order to estimate this attribute. In the present study a non-destructive impact device, developed in the Instituto de Automática Industrial de la Universitat Politècnica de València, has been tested to analyse avocado firmness. This device has a vacuum jamming system capable to be adapted to the irregular fruit shape. Using an accelerometer attached to the impact rod, certain parameters related to firmness are registered. A set of 125 unripe avocados was stored under room conditions during seven days in order to obtain different firmness stages. A set of 25 avocados was tested non-destructively and destructively during different 5 days. The obtained results confirm the high repeatability of the measurements. Besides, the results show a high correlation between the non-destructive parameters related to firmness and the destructive firmness measured by a Universal Test Machine.

Key words:

firmness, non-destructive, fruit

Índice

1. Introducción	1
1.1 Prólogo	1
1.2 El aguacate	1
1.2.1. Importancia económica del aguacate en España.....	1
1.2.2. Propiedades del aguacate	2
1.2.3. Proceso de maduración del aguacate	3
1.3. Evaluación de la madurez.....	5
1.3.1. Métodos para la evaluación de la madurez según sus propiedades	6
1.3.1.1. Contenido de aceite	6
1.3.1.4. Firmeza	7
1.3.1.4.1 Definición de firmeza	7
1.3.1.4.2. Equipos de medida de firmeza en frutos	7
1.3.1.4.2.1. Técnicas destructivas	7
1.3.1.4.2.2. Técnicas no destructivas	8
1.3.2. Métodos para evaluación de la madurez comerciales.....	9
2. Objetivos del trabajo	12
3. Materiales y métodos	13
3.1. Material vegetal	13
3.1.1. Ensayo preliminar.....	13
3.1.2. Ensayo definitivo	13
3.2. Descripción de los equipos.....	13
3.2.1. Prototipo impactador no destructivo	13
3.2.1.1. Prototipo 1	13
3.2.1.2 Prototipo 2	15
3.2.2. Referencias de medida destructiva.....	16
3.2.3 Fruto electrónico	17
3.3 Diseño experimental	17
3.3.1. Ensayo preliminar.....	17
3.3.2 Ensayo de calibración	18
3.3.3 Ensayo definitivo	19
3.4 Análisis estadístico de los resultados	20
4. Resultados	21
4.1 Resultados del ensayo preliminar	21

4.2 Resultados del ensayo de calibración y evaluación de daños.....	22
4.3 Resultados del ensayo definitivo.....	23
4.3.1 Evolución de la firmeza medida de forma destructiva.....	23
4.3.2 Evolución de la firmeza medida de forma no destructiva.....	25
4.3.2.1 Evolución del parámetro del impactador Máximo (área máxima de la curva)...	25
4.3.2.2 Evolución del parámetro del impactador Avslp (pendiente media)	26
4.3.2.3 Evolución del parámetro del impactador VE-A (aceleración máxima)	27
4.3.2.4 Comparación entre caras	28
4.3.2.5 Comparación entre repeticiones.....	28
4.3.3 Comparación de medidas del ensayo de firmeza medida de forma destructiva frente al ensayo de firmeza medida de forma no destructiva.....	29
4.3.3.1 Relación entre la firmeza destructiva y las variables no destructivas.....	29
4.3.3.2 Regresión múltiple de la fuerza en función de 5 valores medidos	30
5. Conclusiones.....	32
6. Bibliografía	33

Índice de figuras

Figura 1: Producción mundial (FAOSTAT, 2014).

Figura 2: Área cultivada de aguacate (FAOSTAT, 2014).

Figura 3: Producción de CO₂ y etileno en aguacate "Hass" (Obenland et al. ,2012).

Figura 4: Atributos de sabor y textura del aguacate "Hass" (D. Obenland et al. / Postharvest Biology and Technology 71 (2012)).

Figura 5: Máquina universal de pruebas (<http://testersupply.es>).

Figura 6: Penetrómetro modelo F.T.327 (Effegi).

Figura 7: Penefel LC (<http://www.agro-technologie.es>).

Figura 8: Penefel dft14 (<http://www.agro-technologie.es>).

Figura 9: IQ-firmness tester (<http://agriculturablogger.blogspot.com.es>).

Figura 10: Durometro Agrost 100 Field (<http://www.agro-technologie.es>).

Figura 11: Firmalon (www.researchgate.net).

Figura 12: Parte del lote de aguacates.

Figura 13: Equipo de análisis.

Figura 14: Interpretación de datos mediante el programa.

Figura 15: Sistema jamming.

Figura 16: Durómetro manual con el vástago Magness-Taylor de 8 mm de diámetro.

Figura 17: Máquina universal de ensayos Ibertest.

Figura 18: Fruto electrónico (<http://martinlishman.com/tuberlog-electronic-potato>).

Figura 19: Aguacates del ensayo preliminar.

Figura 20: Ensayo con el cilindro.

Figura 21: Anova del ensayo.

Figura 22: Muestra de aguacate para el análisis de daños.

Figura 23: Medias e intervalos LSD de la firmeza destructiva (medida como resistencia a compresión) para los diferentes días de ensayo.

Figura 24: Dispersión de medias de la firmeza destructiva (medida como resistencia a compresión) para los diferentes días de ensayo.

Figura 25: Medias e intervalos LSD de la firmeza no destructiva para los diferentes días de ensayo con el parámetro Máximo.

Figura 26: Medias e intervalos LSD de la firmeza no destructiva para los diferentes días de ensayo con el parámetro Avslp.

Figura 27: Medias e intervalos LSD de la firmeza no destructiva para los diferentes días de ensayo con el parámetro VE-A.

Figura 28: Resultados de ajustar un modelo X-cuadrada para describir la relación entre F (N) y Máximo.

Figura 29: Resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre F (N) con las variables masa, calibre y los tres parámetros medidos por el impactador.

Índice de tablas

Tabla 1: Superficies y producción de aguacate en España (FAOSTAT, 2014).

Tabla 2: Resultados ensayo preliminar.

Tabla 3: Resultados de calibración.

Tabla 4: Medidas con el cilindro de goma.

Tabla 5: Análisis de varianza del efecto de los días en que se han tomado las medidas en la firmeza no destructiva (parámetro máximo).

Tabla 6: Análisis de varianza del efecto de los días en que se han tomado las medidas en la firmeza no destructiva (parámetro Avslp).

Tabla 7: Análisis de varianza del efecto de los días en que se han tomado las medidas en la firmeza no destructiva (parámetro VE-A).

Tabla 8: Análisis de varianza del efecto de los días y la cara en que se han tomado las medidas en la firmeza no destructiva.

Tabla 9: Análisis de varianza del efecto de los días y las repeticiones realizadas en la firmeza no destructiva.

Tabla 10: Prueba de múltiples rangos de las repeticiones realizadas en cada cara del fruto en la firmeza no destructiva.

1. Introducción

1.1 Prólogo

El aguacate es un fruto que ha experimentado, en los últimos años, un aumento considerable, tanto a nivel comercial como en plantaciones. Este aumento en producción y consumo, junto con la exigencia actual de calidad en los productos, han sido determinantes para la realización de estudios y avances, en plantaciones y gestión pos-cosecha.

En el apartado de pos-cosecha, muchos estudios se han centrado en la creación de nuevas tecnologías, para la medida de parámetros cuantitativos y cualitativos, con la finalidad de determinar la madurez óptima para la cosecha y la comercialización del fruto, prolongando así su vida útil.

1.2 El aguacate

1.2.1. Importancia económica del aguacate en España.

El cultivo de aguacate está presente en la práctica totalidad de las zonas templadas y cálidas del mundo. Esto se debe a que es un fruto cuyo consumo va en aumento, tanto por su alto valor nutricional como por su sabor. La consecuencia de esto ha llevado a realizar plantaciones en zonas de donde no es originario, pero que tienen clima favorable para el desarrollo del árbol. Los principales productores, según los últimos datos publicados de la FAO son: México, República Dominicana y Perú como podemos ver en el siguiente gráfico, FAOSTAT, 2014.

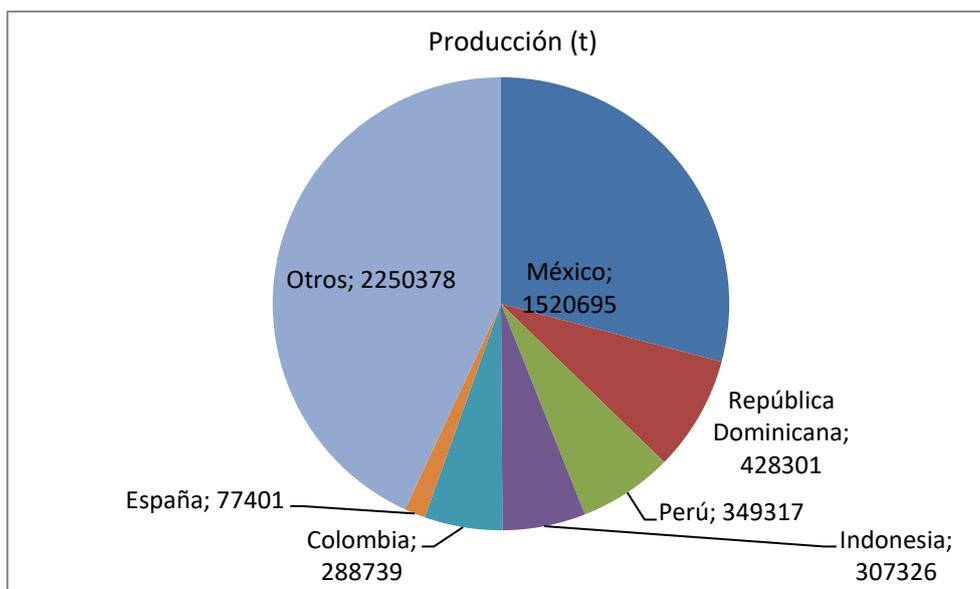


Figura 1: Producción mundial (FAOSTAT, 2014).

Se puede observar que México está muy por encima del resto de países, produciendo más de la cuarta parte de los aguacates recolectados en todo el mundo, figura 1. Es por esto por lo que

se busca el desarrollo de técnicas para medir las características de conservación pos-cosecha, para que su distribución, tanto a pequeña como a gran escala, y con trayectos más bien largos, como puede ser el cambio de continente, se pueda realizar sin que el fruto pierda ninguna de sus cualidades. Al mismo tiempo, comprobamos como la producción nacional está lejos de los países mencionados anteriormente.

En la figura 2, podemos observar que la superficie cultivada en España está muy lejos de la de los países punteros. Eso es debido a que las plantaciones en España son nuevas, motivadas por el precio de la fruta y la posible adaptación a nuestras condiciones climáticas.

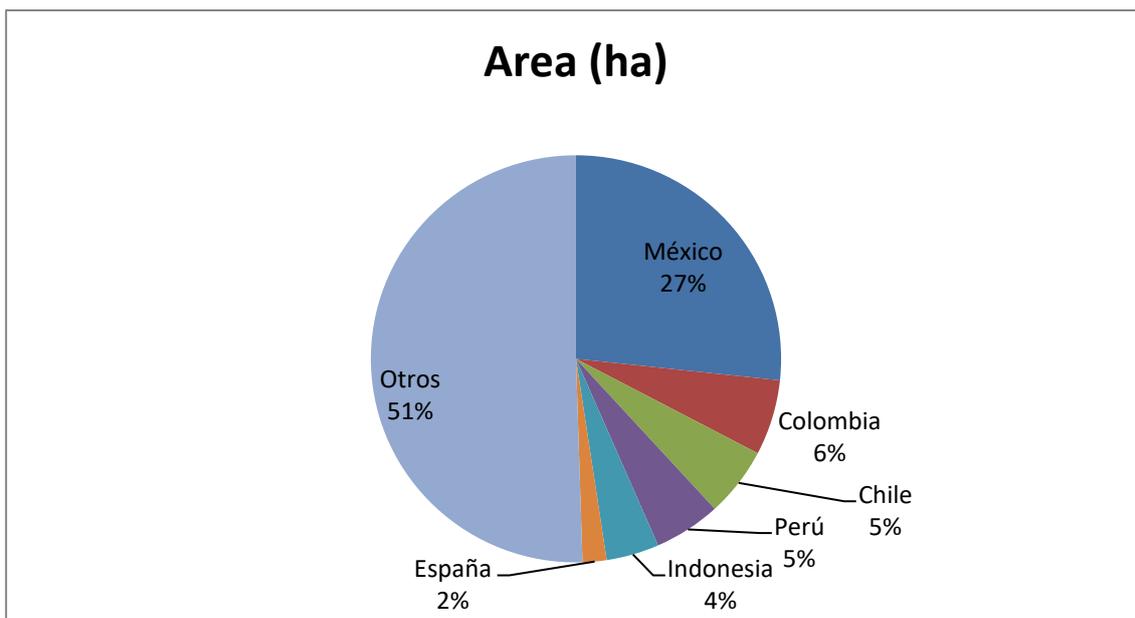


Figura 2: Área cultivada de aguacate (FAOSTAT, 2014).

En cuanto a España se refiere, la comunidad autónoma con mayor producción es Andalucía, seguido de Canarias, tabla 1.

Tabla 1: Superficies y producción de aguacate en España (FAOSTAT, 2014).

Zona	Baleares	C. Valenciana	Andalucía	Canarias	España
Sup. en plantación regular (hectáreas)	3	45	8935	741	9724
Producción (toneladas)	60	425	66739	9073	76297

1.2.2. Propiedades del aguacate

En este apartado vamos a describir los principales compuestos del aguacate, que son los que definen sus propiedades.

El contenido en aceite es una de sus propiedades más destacadas. Se trata de una fruta con un alto valor nutricional, por sus ácidos grasos insaturados, que son los más importantes de estos aceites (Donetti y Terry, 2014). Como consecuencia, albergan un 50-60% de la fracción oleaginosa de la fruta, siendo ésta entre un 8-30% del tejido mesocarpiano (Lee *et al.*, 1983).

La **materia seca** va aumentando durante el desarrollo del fruto. Gamble (2010) estableció una escala de niveles para considerar el punto de madurez del fruto. Estos niveles varían de un 20% de materia seca poco maduro, a un 40% muy maduro.

Se han llevado a cabo estudios para evaluar el aumento de la materia seca y la aceptabilidad del fruto por el consumidor, obteniendo unos resultados positivos (Arpaia *et al.*, 2003).

Por otra parte, el **contenido en humedad** siempre es un índice importante a la hora de evaluar las frutas y los alimentos en general. Este valor sirve también para estimar el tiempo de conservación en óptimas condiciones. Se usa como indicador del valor económico, ya que mediante el contenido en humedad y, por medio de su balance, podemos conocer la proporción de sólidos del fruto (Vinha *et al.*, 2013). Este contenido, siempre dependiendo del cultivar, tiene que estar entre un 69 y 75 %, para que la calidad del fruto sea aceptable (Mans *et al.*, 1995).

Otra propiedad importante a destacar es el **color**, ya que puede ser indicador de la madurez del fruto. El cambio de color se observa con la variación de la tonalidad, de verde a púrpura, y posteriormente más negro. El aumento en los antocianos del fruto indica la etapa de maduración que va siguiendo el fruto. Esta característica depende de la variedad. En algunos cultivares los cambios no son muy notables. Pero a pesar de no ser un fruto que demuestra cambios físicos evidentes durante la maduración, en otros sí cambia el color (Sotto, 2000).

Por último, la **firmeza**, que es una propiedad fundamental en el aguacate, y en muchas otras frutas. Su medición es uno de los métodos más fiables y aceptados para evaluar la madurez del aguacate. La firmeza es tanto indicador de madurez como de maduración posterior a la cosecha. Las mediciones de firmeza en la madurez del fruto en el árbol, y en la maduración una vez separado de éste, tienen una relación inversa. En madurez, la firmeza va de menor a mayor, en cambio, en la maduración, estas medidas van desde que el fruto está más firme en sus primeras etapas pos-cosecha, a sufrir un ablandamiento, y por lo tanto, una pérdida de firmeza avanzados unos días después de su recolección (Magwaza y Tesfay, 2015).

1.2.3. Proceso de maduración del aguacate

Cuando hablamos de la maduración del aguacate, ya se ha indicado que tenemos que tener en cuenta algunos parámetros. Ellos son los que se utilizan para decidir su recolección, el contenido

en aceites y agua, tamaño, color, peso, y también el tiempo de ablandamiento (o pérdida de firmeza) tras la separación del árbol (Agustí, 2010).

Dado que el aguacate es un fruto climatérico, su maduración continuará una vez cosechado. Debido a estas características, se produce un incremento de la respiración, que precede a la maduración y ablandamiento del fruto, a la que además, se une un aumento de la producción de etileno al inicio de la maduración, figura 3.

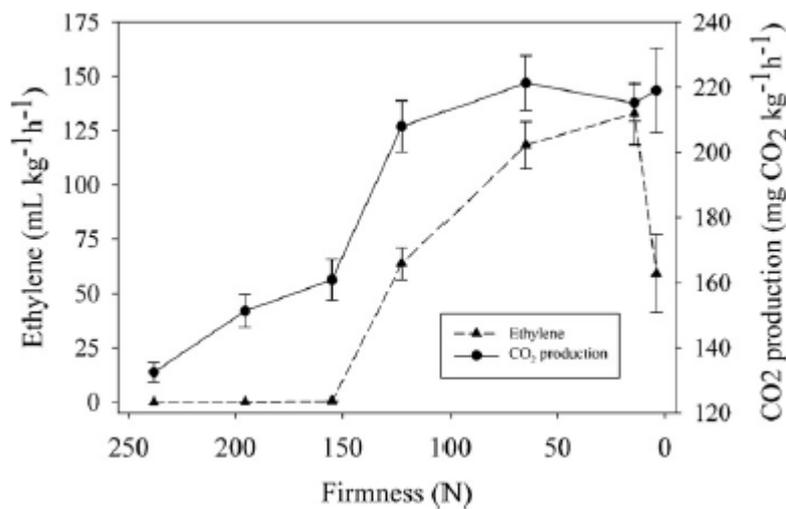


Figura 3: Producción de CO₂ y etileno en aguacate "Hass" (Obenland et al., 2012).

Los aguacates, solo si se cosechan en un estado de madurez adecuado, serán aptos para sintetizar cantidades suficientes de etileno, para ser capaces de iniciar dicha maduración. Este requisito, el que deban haber alcanzado un estado de desarrollo suficiente en la planta para alcanzar todo el potencial de sabor, es común a los frutos de este grupo. Solo los frutos fisiológicamente maduros mostrarán características organolépticas satisfactorias una vez maduros, figura 4. Si estos frutos fuesen recolectados sin llegar a este estado, no tendrían una maduración normal y por lo tanto perderían su valor (Pak et al., 2003).

En el proceso de maduración, hay un flujo de componentes inhibitorios de las hojas a la fruta, impidiendo que se ablande en el árbol (Werman y Neeman, 1987). El fruto de aguacate puede quedar en el árbol, durante más de 12 meses, después de alcanzar la madurez mínima de la cosecha, siendo este período mayor a los demás frutos de su grupo (Woolf et al., 2004).

El aguacate, fuera del árbol, madura rápidamente, pudiendo alcanzar en un período corto de entre 5-7 días su estado óptimo (Seymour y Tucket, 1993).

La capacidad que tiene el fruto de alcanzar la madurez sin encogerse, marca la etapa mínima de madurez en el árbol para empezar a cosechar en los cultivares de aguacate (Flitsanov et al., 2000).

La cosecha del aguacate se puede dar en dos estados de madurez, la fisiológica, en la que la fruta continúa la ontogenia después de haber sido separada del árbol (Lee et al., 1983; Kader 1999) y la comercial o madurez hortícola. Esta última, es la etapa en la que la fruta cosechada posee los requisitos previos para su posterior consumo, y se llevará a cabo una maduración normal, para que la calidad alimentaria del producto sea la mayor posible. En algunas ocasiones la madurez fisiológica y comercial no tienen relación, porque debido a exigencias de mercado, la madurez comercial se refiere al momento de cosecha con un fin particular (Wills et al., 2007).

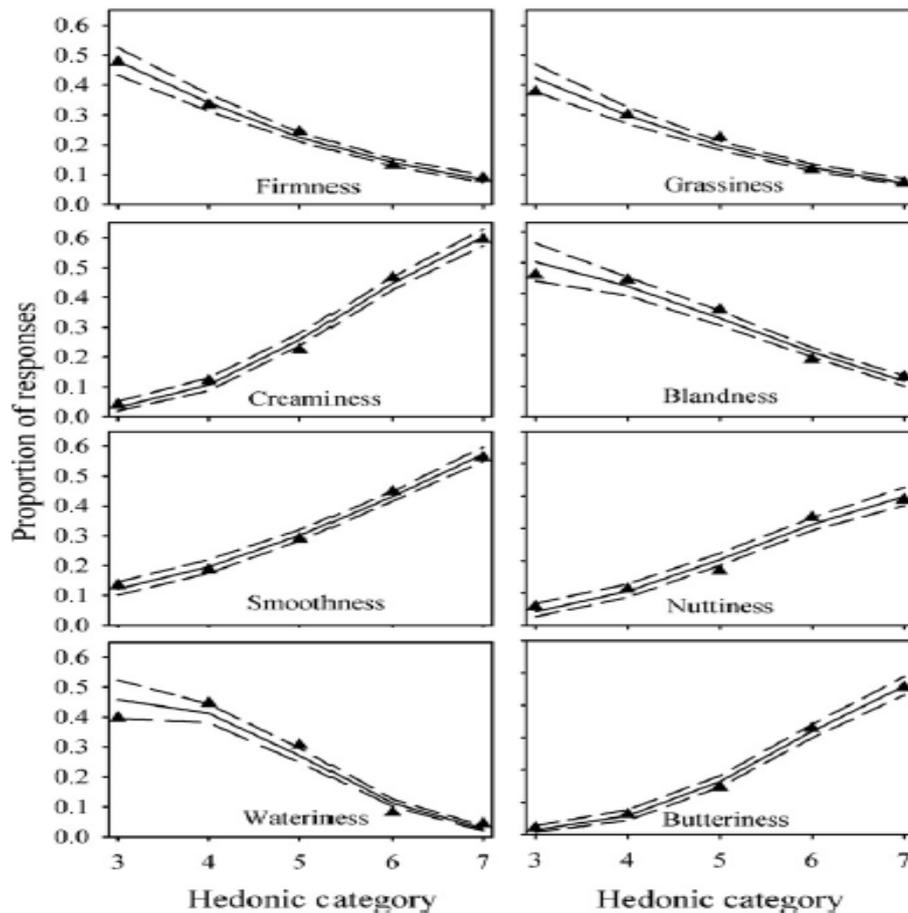


Figura 4: Atributos de sabor y textura del aguacate "Hass" (D. Obenland et al. / *Postharvest Biology and Technology* 71 (2012)).

1.3. Evaluación de la madurez

Cada país establece sus normas de madurez en frutos, así evita que entren frutas inmaduras en sus mercados. De ahí la importancia de dicha evaluación (Pak et al., 2003).

1.3.1. Métodos para la evaluación de la madurez según sus propiedades

1.3.1.1. Contenido de aceite

En algunos países el contenido de aceite se usa como indicador de madurez. Este método tiene ciertas dificultades y un coste elevado. Es por esto por lo que se han llevado a cabo estudios para buscar otras opciones de medida con la misma validez, pero sin tener las dificultades y el coste de los métodos existentes para obtener el contenido de aceite que ya se conocían (Kaiser y Wolstenholme, 1994).

Con la técnica de *imagen de resonancia magnética nuclear* se miden las características internas, basadas en las propiedades magnéticas de los núcleos de los átomos que componen un material, midiendo propiedades relacionadas con la madurez y defectos internos (Bellon et al. 1992), siendo el contenido de aceite una característica medida por esta técnica.

1.3.1.2 Contenido de materia seca y humedad

Un método rápido, barato y eficaz, para evaluar la madurez del fruto, es la determinación del contenido de materia seca, ya que tiene una correlación alta con el contenido de materia grasa, y se puede determinar con una **estufa** específica de determinación de materia seca (Kader et al. 2002) pero, este tipo de análisis sería destructivo.

También la técnica NIR (*near infrared spectroscopy*), o sea, la **espectroscopia de infrarrojo cercano**, se ha utilizado en la medida de estos parámetros (Lu, 2001).

1.3.1.3. Color y parámetros asociados

A continuación, expondremos varios métodos no destructivos para dicha evaluación.

Uno de ellos es la toma de **imágenes hiperespectrales**, que recogen las características espectrales de la fruta, relacionándolos con los parámetros de calidad (Girod et al. 2008).

Maftoonazad *et al.* (2011) relacionaron parámetros fisiológicos como la firmeza, el cambio de color, la pérdida de peso y la tasa de respiración, mediante la combinación de imágenes hiperespectrales con redes neuronales artificiales multicapa.

El **procesamiento de imágenes** en el rango visible es otra de las técnicas no destructivas. Estos equipos se pueden adaptar fácilmente a líneas de procesamiento para obtener sus mediciones. Su precisión y correlación con una inspección humana visual, hacen de ella una de las técnicas más ventajosas (Wu y Sun 2013). Se han desarrollado estudios, como los de Arzate-Vázquez et al. (2011) y Guerrero y Benavides (2014), en los que se ha comparado el procesamiento de imágenes con la opinión humana. De estas equiparaciones se obtuvo una buena correlación y se concluyó que es una herramienta valiosa.

1.3.1.4. Firmeza

Ya hemos indicado con anterioridad que la firmeza es una de las características más importantes para evaluar la madurez de estos frutos.

1.3.1.4.1 Definición de firmeza

Se podría decir que la firmeza es una propiedad medible con diferentes escalas, bien de manera instrumental, con los medidores desarrollados para ello, o bien con la gradación que ofrece un **análisis descriptivo sensorial** (Kader et al. 2002).

La firmeza, como propiedad física, se podría definir como la consistencia del fruto, evaluada como la fuerza necesaria para deformar con un dedo la superficie de un fruto. Su determinación más común se lleva a cabo a través de una medida de resistencia, como es el **ensayo de penetración Magness-Taylor**, pero también podría ser con otras magnitudes, como el módulo de elasticidad, resistencia a rotura, o la indeformabilidad (Barreiro y Ruiz-Altisent, 1996).

Por otra parte, podríamos decir que la firmeza es una parte de la textura de los alimentos, basada en **principios reológicos**. Por ello, además de medirse de manera instrumental, también podría hacerse de manera sensorial, como se hace en algunos casos, con **paneles de catadores**.

1.3.1.4.2. Equipos de medida de firmeza en frutos

A lo largo del tiempo se han ido desarrollando diferentes equipos de medida de firmeza.

Los destructivos fueron los primeros equipos que se desarrollaron. Sin embargo, los actuales avances de los equipos, buscan, que el fruto expuesto al análisis, no sufra ningún daño. Con el paso del tiempo, se han llevado a cabo investigaciones para mejorar estos equipos, conocidos como métodos de medida no destructivos, de los diferentes parámetros que se desea conocer, siendo uno de ellos la firmeza.

La complicación de los nuevos equipos pasa por que se obtengan unos resultados, con suficiente porcentaje de fiabilidad, dentro de la limitación que suponen las diferentes formas e irregularidades de los frutos.

Seguidamente nombraremos diferentes técnicas de sensores de firmeza.

1.3.1.4.2.1. Técnicas destructivas

Los equipos destructivos están basados en el ensayo Magness-Taylor, desarrollado en 1925 por John Robert Magness y George Frederick Taylor. Se lleva a cabo mediante una medición con un vástago cilíndrico de punta redondeada, de diámetro 8 mm o 10 mm. Consiste en tomar el valor de fuerza necesaria para deformar la pulpa sin piel.

El **penetrómetro**, donde se determina la firmeza por la dureza extraída de la penetración en la fruta, es un instrumento derivado de dicho ensayo.

Otra forma de realizar el mismo ensayo es mediante el uso de una **máquina universal de pruebas**, que con la penetración se obtienen las curvas fuerza-determinación unitaria, y las curvas de fuerza-tiempo, figura 5.



Figura 5: Máquina universal de pruebas (<http://testersupply.es>).

1.3.1.4.2.2. Técnicas no destructivas

En primer lugar, hablaremos de las técnicas basadas en la curva de fuerza-deformación. Encontramos dispositivos como el **Analogue/Digital CSIRO firmness meter**, que es un disco, unido por un brazo, a un indicador de desplazamiento analógico (Macnish *et al.*, 1997). También **prototipo laser "air-puff"**, que mide la deformación de los frutos sometidos a una corriente de aire, corta pero fuerte (Hung *et al.*, 1998).

Otras técnicas están basadas en la fuerza-impacto vs. tiempo. El impacto de dos cuerpos elásticos, como puede considerarse el **impacto de un fruto sobre una superficie dura o una esfera sobre un fruto**, es estudiado como tal, y las variables, como fuerza de impacto y duración del impacto, están directamente relacionadas con la firmeza de la fruta (Chen y Ruiz-Altisent, 1996). Otra técnica desarrollada en esta línea es la técnica de **golpear el fruto con un péndulo**, pudiendo ser el péndulo el que lleva el sensor (Mohsenin, 1970). La fruta está sobre una célula de carga y se deja caer el péndulo sobre ella (Desmet *et al.* 2002). Se utiliza un sensor para medir la respuesta a dichos impactos de los frutos. Éste, de impacto vertical, consta de una masa semiesférica con poca masa, para poder obtener mejores resultados, provista de un acelerómetro (Jarén, 1994, Chen *et al.*, 1996). Otra técnica similar es la de rebote, en ella, la firmeza se puede cuantificar de acuerdo con el rebote causado en la fruta al impactar con una superficie (García-Ramos *et al.* 2005).

Por otra parte, tenemos las **técnicas acústicas** como la respuesta acústica a la vibración. Las vibraciones más comunes son acústicas y mecánicas. Se usa un micrófono o un sensor piezoeléctrico, dado que los métodos acústicos miden la señal emitida por la fruta, después de hacerla vibrar por medio de un pequeño impacto (García-Ramos *et al.* 2005). Otro método

acústico es la respuesta ultrasónica a la vibración. En este método la señal se atenúa al viajar a través de tejidos vegetales y las ondas no pueden penetrar profundamente en las frutas (Chen, 1996). También cabe destacar la técnica que se lleva a cabo mediante vibraciones mecánicas, en las que se pone la fruta encima de una superficie que vibra, y la respuesta se mide con un acelerómetro (García-Ramos et al. 2005). Así mismo, el sistema de medición por ultrasonido es un método acústico por el cual se pueden medir parámetros que podrían tener una alta relación con la madurez y otros atributos de calidad (Mizrach, 2000). Otros métodos desarrollados son la energía de vibración (Peleg et al., 1990) o la excitación ultrasónica (Mizrach et al., 1996, Flitsanov et al., 2000).

Y por último enumeraremos distintas **técnicas ópticas**, como el análisis de imagen multiespectral e hiperespectral, que mide los perfiles de dispersión de luz reflejada desde el fruto, en una selección de bandas espectrales (Lu, 2004). Se han utilizado tanto en parámetros de color como de firmeza (Maftoonazad et al. 2011). Otros estudios han sido realizados con análisis de imagen con luz láser, y espectroscopia en visible e infrarrojo cercano, en reflectancia y transmitancia.

1.3.2. Métodos para evaluación de la madurez comerciales

En los métodos destructivos podemos encontrar como ejemplos de marcas comerciales el penetrómetro marca **Effegi**, figura 6, o un formato digital marca **Penefel**, figura 7.



Figura 6: Penetrómetro modelo F.T.327 (Effegi).



Figura 7: Penefel LC (<http://www.agro-technologie.es>).

También se han usado dinamómetros digitales para la medida de firmeza, midiendo la fuerza máxima obtenida en la punción en la fruta, un ejemplo sería el **Penefel DFT 14**, figura 8.



Figura 8: Penefel dft14 (<http://www.agro-technologie.es>).

En el apartado de equipos no destructivos, disponemos en el mercado equipos basados en la técnica de fuerza-impacto vs. tiempo, como el impactador “iQ firmness tester” de la marca Sinclair, figura 9, o el **medidor inteligente de firmeza de la marca Greefa**, siendo este también un impactador.



Figura 9: iQ-firmness tester (<http://agriculturablogger.blogspot.com.es>).

El **durómetro** que es un equipo basado en las variables de curva deformación. También se puede encontrar en formato comercial, figura 10.



Figura 10: Durómetro Agrost 100 Field (<http://www.agro-technologie.es>).

De las respuestas acústicas a la vibración, un equipo comercial sería el **Firmalon de Eshet Eilon Ltd**, figura 11. Este dispositivo incluye un transductor de fuerza para medir la masa de fruta, una cuna para ésta, equipada con un sensor piezoeléctrico, que permite la libre vibración de la fruta.



Figura 11: Firmalon (www.researchgate.net).

2. Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este trabajo consistía en medir la firmeza de aguacate mediante un prototipo desarrollado, impactador no destructivo.

Los sub-objetivos serían:

- Medir la fiabilidad y repetibilidad de las medidas.
- Comprobar la no producción de daños al fruto por parte del equipo.
- Estimar la capacidad de medir diferentes estados de madurez.

3. Materiales y métodos

3.1. Material vegetal

3.1.1. Ensayo preliminar

En el ensayo preliminar se utilizaron 4 aguacates de la variedad 'Hass', la cual tiene un comportamiento pos-cosecha excelente y ocupa la mayor parte de superficie en España. Estos concretamente proceden de Málaga. Dos de ellos se dejaron durante 7 días en refrigeración a una temperatura alrededor de los 4° C y los otros estuvieron a temperatura ambiente en torno a los 20-23° C.

3.1.2. Ensayo definitivo

Para el ensayo definitivo que se llevó a cabo durante 5 días, el material vegetal utilizado fueron 9 cajas de aguacate, de la variedad 'Hass' de categoría 1, con un calibre 16. Cada una de estas cajas estaba compuesta por 16 piezas de fruta, de las cuales se pretendía utilizar 25 de ellas cada día, para obtener sus parámetros, y que se tuviesen piezas de repuesto por si alguna difería del resto del lote, en calibre o en un estado de madurez extremo. En este caso, procedían de México.



Figura 12: Parte del lote de aguacates.

Estos aguacates fueron conservados en el laboratorio de ensayo en sus cajas sin ningún tipo de refrigeración. La temperatura registrada en el termómetro, que se albergó junto al lote, durante el tiempo que permanecieron allí fue de 22,9°C de media con un 64,76% de humedad, siendo la desviación de un 0,8°C y un 9% respectivamente.

3.2. Descripción de los equipos

3.2.1. Prototipo impactador no destructivo

3.2.1.1. Prototipo 1

El equipo utilizado es un prototipo, desarrollado en el Laboratorio de Automatización de Sistemas Agroalimentarios (LASA), del Instituto de Automática Industrial de la Universidad Politécnica de Valencia. El impactador está provisto de una pieza con forma de disco ligeramente

cóncavo, unido a un pistón neumático (de 16 mm de diámetro) de bajo rozamiento mediante una rótula, figura 13. El pistón neumático está accionado por una electroválvula, que recibe una señal vía Ethernet, de un programa manipulado desde un PC. En el disco de impacto se sitúa un acelerómetro ADXL 278 ($5,5 \text{ mV/m}\cdot\text{s}^{-2}$ de medida), que recoge señal en la dirección vertical.

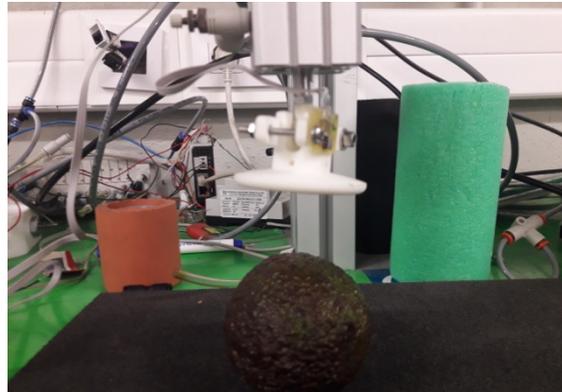


Figura 13: Equipo de análisis.

La secuencia de funcionamiento de dicho equipo tiene varias partes diferenciadas. Primero, la electroválvula recibe la señal desde el PC y activa el pistón, hay un tiempo de espera y comienza a bajar el pistón. Con un primer impacto adapta la rótula para que la superficie de impacto sea la más adecuada, según la forma de la cara de la fruta sobre la cual se va a realizar la medida. Posteriormente, vuelve a subir, y después de otro tiempo de espera, menor al anterior, vuelve a bajar empezando entonces la toma de datos.

Una vez que el impactador ha tomado los datos, estos son recogidos por una tarjeta de adquisición de datos, que captura la señal del acelerómetro. Estos datos son recogidos en voltios a una frecuencia determinada. Mediante un programa de LABVIEW, los datos son analizados extrayendo los parámetros más importantes. En la figura 14 se puede observar el panel de programación y de control.



Figura 14: Interpretación de datos mediante el programa.

3.2.1.2 Prototipo 2

Después del primer ensayo se realizaron algunos cambios en el equipo. Se sustituyó la pieza que va unida al pistón por una provista del sistema *jamming*, figura 15. Esta pieza estaba igualmente provista de un acelerómetro, realizando así las mismas medidas, y siendo la secuencia de funcionamiento igual que con el disco cóncavo. El *jamming* es un sistema en el que la pieza posee en su interior un material granular, y está conectada a un equipo neumático encargado de hacer el vacío. Se produce un atasco del material granular del interior, por efecto del vacío, y pasa a comportarse como un sólido. El vástago del impactador, con apariencia de semiesfera, al ponerse en contacto con la fruta y producirse el vacío, copia la forma de la cara de la fruta en el primer impacto. El impactador queda con esa forma para el segundo impacto y sucesivos en los que realiza la medida de aceleración.

Además, también se añadió al equipo una cuna provista del mismo sistema, adaptándose así las dos piezas de contacto con el fruto a éste. Al igual que el impactador, la cuna tomaba la forma del fruto en su primer impacto, conservándola para el segundo.



Figura 15: Sistema jamming.

3.2.2. Referencias de medida destructiva

Como referencia destructiva se utilizaron dos ensayos.

Resistencia a penetración Magness-Taylor

Se realizó con un durómetro manual Turoni, con un vástago de 8 mm de diámetro, con el fin de estimar la firmeza de la pulpa de los aguacates analizados, figura 16.



Figura 16: Durómetro manual con el vástago Magness-Taylor de 8 mm de diámetro.

Resistencia compresión con disco plano

Se realizó con una máquina universal de ensayos (Ibertest, www.ibertestint.com), figura 17. La velocidad de bajada del vástago fue de 0,001m/s. El vástago utilizado fue una esfera de 10 mm de diámetro. Se realizó una compresión establecida en 5mm, distancia estimada ya que se realizaba sobre fruto entero con piel, y con una compresión inferior, por las características de la piel, hubiesen sido más difíciles las medidas.



Figura 17: Máquina universal de ensayos Ibertest.

3.2.3 Fruto electrónico

Los frutos electrónicos son unos equipos diseñados para la evaluación de daños en frutas y hortalizas durante la manipulación. El equipo provisto de un acelerómetro triaxial y un reloj dentro de un cuerpo de plástico, detecta los impactos que recibiría el fruto en dicho proceso, registrando el valor del impacto y el tiempo.



Figura 18: Fruto electrónico (<http://martinlishman.com/tuberlog-electronic-potato/>).

El modelo utilizado fue un tuberlog (<http://martinlishman.com/tuberlog-electronic-potato/>), figura 18, un fruto electrónico de medición por aceleración. Es un ovoide similar a una patata que registra los impactos al instante, los registra y muestra visualmente a través de una *tablet android*. Tiene un software con el que se pueden analizar los datos registrados.

Este fruto se usa con el fin de evaluar el nivel de daño recibido por los frutos en el ensayo con el prototipo impactador.

3.3 Diseño experimental

3.3.1. Ensayo preliminar

En una primera parte se tomaron las medidas de firmeza, no destructiva, con el prototipo impactador en la zona ecuatorial, y en las caras opuestas que fueron marcadas. Las pruebas se realizaron a los 4 frutos con diferentes estados de madurez, dos muy duros y dos muy blandos, con el fin de comprobar que el equipo era capaz de diferenciar dos niveles de firmeza extremos, figura 19.

Posteriormente los frutos fueron llevados al laboratorio, donde se les realizó una prueba destructiva de resistencia a penetración Magness-Taylor, en la misma zona de impacto no

destrutivo. Este equipo no fue capaz de medir las dos piezas con un nivel de madurez muy alto, debido al ablandamiento sufrido.



Figura 19: Aguacates del ensayo preliminar.

3.3.2 Ensayo de calibración

El ensayo de calibración se realizó con el equipo ya provisto del sistema jamming.

Se probó el resultado de éste con dos frutos. Después se utilizó un cilindro de goma de 62,85 mm de altura y un diámetro de 52,04 mm, siendo el recubrimiento de goma de un espesor de 7,79 mm, como muestra en blanco, para poder evaluar la repetitibilidad del equipo y su calibración, figura 20. Con el cilindro se realizaron 35 medidas con dicho equipo y posteriormente fue evaluado, por la máquina universal de ensayos, para poder establecer una comparativa. Los resultados obtenidos fueron de una media de 62,175 N con una compresión de 5 mm a una velocidad de 0,001m/s.

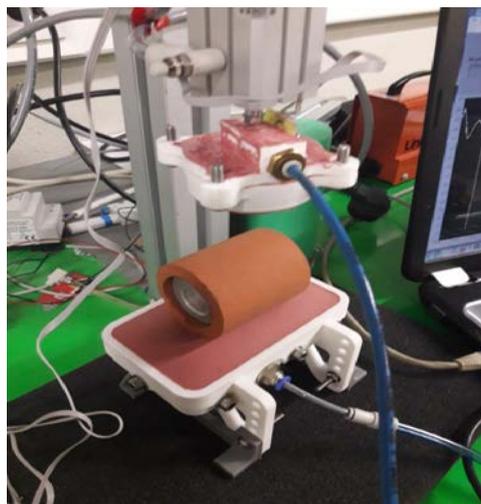


Figura 20: Ensayo con el cilindro.

La segunda parte de este ensayo se realizó con el fruto electrónico. Se realizaron otras 35 medidas, que formaron parte de la calibración del equipo. El porcentaje de desviación de las muestras era muy similar al obtenido con el cilindro.

Por último, en esta parte también se midió, mediante el uso de un fruto electrónico, si el equipo era capaz de tomar las medidas sin desarrollar ningún daño en el fruto.

3.3.3 Ensayo definitivo

El ensayo definitivo fue realizado durante 5 días. Esto se hizo con la finalidad de que el lote adquirido fuese aumentando en su proceso de maduración a lo largo de los diferentes días. Al acrecentar su nivel de maduración, cada uno de los días de ensayo, disminuía su nivel de firmeza, y así se pudieron obtener datos en diferentes estados de firmeza. El procedimiento seguido en el ensayo, en sus 5 días, fue el mismo.

Una parte del ensayo de cada día era similar al ensayo de calibración, se tomaban medidas con el cilindro de goma, para poder establecer una comparativa con las medidas tomadas en el ensayo de calibración, y así poder ver si el equipo, en cada uno de los días de ensayo, había sufrido alguna alteración.

Una vez realizadas las medidas con el cilindro, se pasaba a numerar 25 piezas del lote en una de sus caras, la cual sería denominada “cara A”, y su opuesta “cara B”. Posteriormente, se cogían las piezas por orden y se depositaban, sucesivamente, en la cuna de jamming. Primero se realizaban 5 impactos en la cara A, y posteriormente otros 5 en la cara B, para cada pieza.

De las curvas registradas por el acelerómetro del impactador, se extrajeron tres parámetros de medida para cada uno de los impactos, siendo estos la pendiente media ($Avslp$), la aceleración máxima (VE_A) y el área máxima de la curva (Máximo).

Cuando se habían tomado las 5 medidas en cada cara de cada uno de los 25 aguacates, estos se llevaban a otro laboratorio de ensayo.

Este laboratorio estaba provisto de una maquina universal de ensayos. Los frutos eran trasladados lo más rápidamente posible, y una vez en el laboratorio, eran resguardados en un frigorífico, para que en la duración del ensayo no aumentase, o aumentase lo menos posible, su maduración.

En este laboratorio, y por el mismo orden en el que se habían numerado las piezas, se les realizaba las medidas con la maquina universal de ensayo.

Primeramente, se tomaba la medida en la cara A, así nos asegurábamos de haber tomado la medida en la misma zona que el impactador. Además, se tomaban dos medidas más en cada pieza. Para que no se viesen afectadas las medidas por la punción, no se realizaba en el mismo eje que la primera, así realizando una de ella a 120° y la otra a unos 240° aproximadamente.

Después de realizar las 3 medidas y registrarlas, se pesaba el fruto con una báscula de precisión de 0,001 g, y se medía su calibre con un calibre digital electrónico con una exactitud de 0,02 mm.

Ya como última parte del ensayo, se dejaron madurar a temperatura ambiente una muestra de 5 aguacates. Con estos aguacates se pretendía observar si el impactador no destructivo realizaba algún daño. Estos frutos se abrieron por la superficie de contacto con el impactador cada uno de ellos 12 horas después de haber realizado la prueba.

3.4 Análisis estadístico de los resultados

El análisis estadístico de los resultados obtenidos de las pruebas definitivas se realizó con el programa Statgraphics Centurion XVII.

Se llevaron a cabo análisis de varianza (ANOVA) y análisis de regresión simple y multifactorial, donde la firmeza se estableció en función de los distintos factores medidos.

4. Resultados

4.1 Resultados del ensayo preliminar

En la tabla 2, podemos observar las medidas obtenidas siendo los aguacates 1 y 2 los duros y los aguacates 3 y 4 los más blandos. Los resultados parecen indicar que el equipo podría ser capaz de discriminar entre frutos inmaduros y maduros. En los aguacates 3 y 4 no se pudo obtener medidas con el penetrómetro debido al reblandecimiento y sin embargo en el equipo no destructivo se observaron unas diferencias notables en las medidas.

Tabla 2: Resultados ensayo preliminar.

	Aguacate 1	Aguacate 2	Aguacate 3	Aguacate 4
M-T(kg)	2,25	1,2	-	-
Ensayo	-0,8645	-0,7966	-0,4902	-0,5236

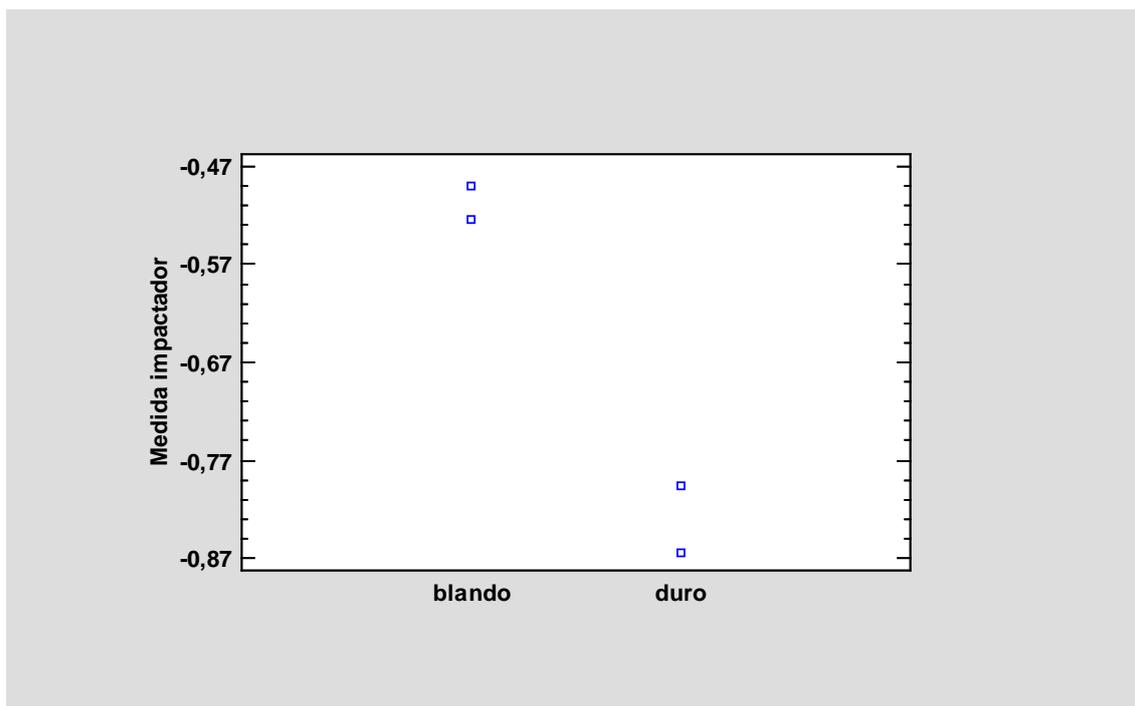


Figura 21: Anova del ensayo.

En el gráfico de la figura 21 se pueden apreciar mejor las diferencias entre los dos frutos duros y los frutos blandos.

4.2 Resultados del ensayo de calibración y evaluación de daños

En los resultados obtenidos el coeficiente de variación entre una medida y otra daba un porcentaje de diferencia muy bajo. Se realizaron 35 repeticiones consecutivas. Estos valores se utilizarían posteriormente como una calibración del equipo cada día de ensayo.

Tabla 3: Resultados de calibración.

	Frutoelect	Frutoelect	Frutoelect	Cilindro	Cilindro	Cilindro
	VE_A	Avslp	Máximo	VE_A	Avslp	Máximo
Promedio	80,49	1,64	245,8	101,1	1,92	268,38
Desvest	1,7	0,02	3,27	2,48	0,04	2,74
CV (%)	2,11	1,49	1,33	2,46	1,92	1,02

Los resultados mostraron como en todos los casos el coeficiente de variación fue menor del 2,5%, tabla 3. En el caso de la variable Máximo, los valores registrados al impactar tanto el cilindro como el fruto electrónico, obtuvieron un coeficiente de variación menor del 1,4%.

Como segunda parte de este ensayo se tenía como objetivo comprobar que el equipo no realizaba daños en el fruto. Para ello se analizaron los valores de impacto registrados en el fruto electrónico al impactar con el prototipo impactador estudiado.

Los datos recopilados por el fruto electrónico fueron de 28,46 g es decir $278,88 \text{ m/s}^2$ muy similar al máximo registrado en el prototipo impactador que obtiene un valor medio de $245,80 \text{ m/s}^2$. Este valor de aceleración está considerado fuera del umbral de aceleración que produciría daños en el fruto.

En los aguacates abiertos después de realizar el ensayo se pudo observar que el impactador no realizaba ningún daño sobre el fruto. En las primeras horas después del ensayo no se pudo observar ningún tipo de daño. A partir de 24h después del ensayo, en los frutos abiertos, se observaban las 3 manchas producidas por el vástago de la máquina universal de ensayo. Por el contrario, en la zona de contacto del impactador no se apreció ninguna mancha ni oscurecimiento, figura 22, corroborándolo 72 horas después de haber realizado las pruebas.



Figura 22: Muestra de aguacate para el análisis de daños.

4.3 Resultados del ensayo definitivo

4.3.1 Evolución de la firmeza medida de forma destructiva

En la tabla 4 se muestra el análisis de varianza donde se confirma el efecto del factor día en el valor de la firmeza destructiva medida como la resistencia a compresión.

Tabla 4: Análisis de varianza del efecto de los días en que se han tomado las medidas en la firmeza destructiva (medida como resistencia a compresión).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Día	1,47909E6	4	369772,	3323,32	0,0000
RESIDUOS	138526,	1245	111,266		
TOTAL (CORREGIDO)	1,61761E6	1249			

En la figura 23 se presenta la evolución de la firmeza destructiva (media e intervalo LSD) a lo largo de los días. Se comprueba que existen diferencias significativas entre los valores de firmeza destructiva los diferentes días de almacenamiento.

Se puede observar como la pérdida de firmeza fue más acusada los primeros días, tendiendo a reducirse los días jueves, viernes y lunes.

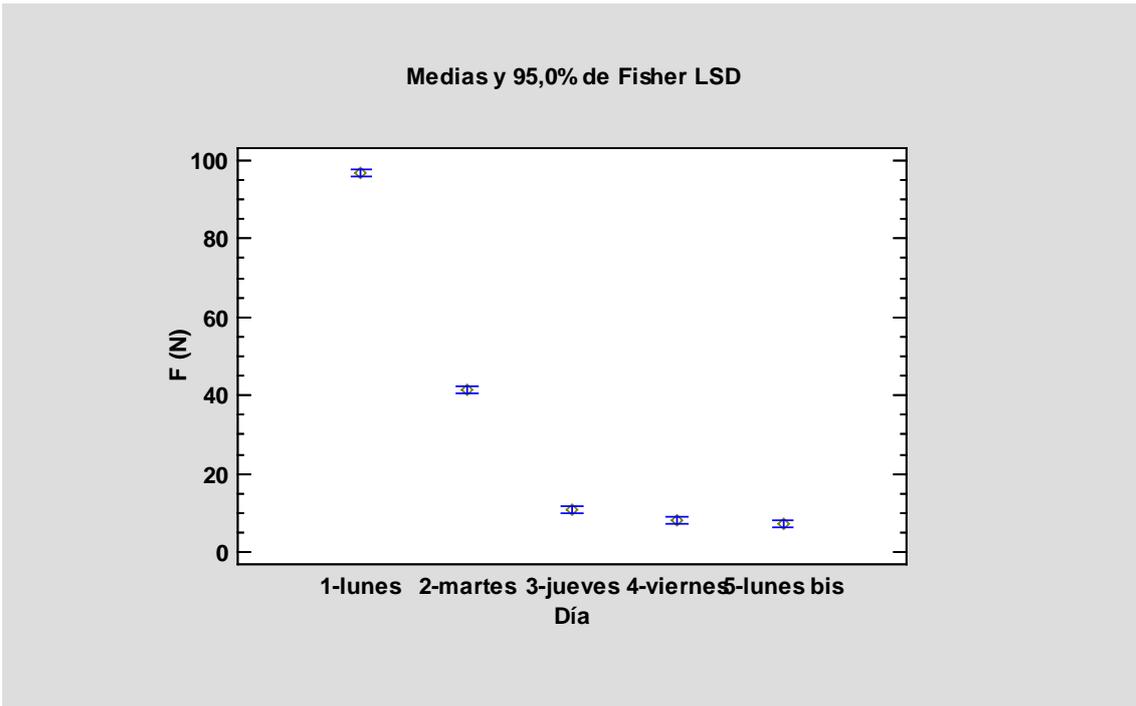


Figura 23: Medias e intervalos LSD de la firmeza destructiva (medida como resistencia a compresión) para los diferentes días de ensayo.

En la figura 24, se observan las medias de la fuerza obtenida en el análisis destructivo de los aguacates del lote tomado en cada día. Con este gráfico podemos comprobar que no todo el lote de frutos tomados en un mismo día tiene el mismo estado de firmeza medido de manera destructiva. Ya que se puede observar valores de firmeza iguales en días alternos.

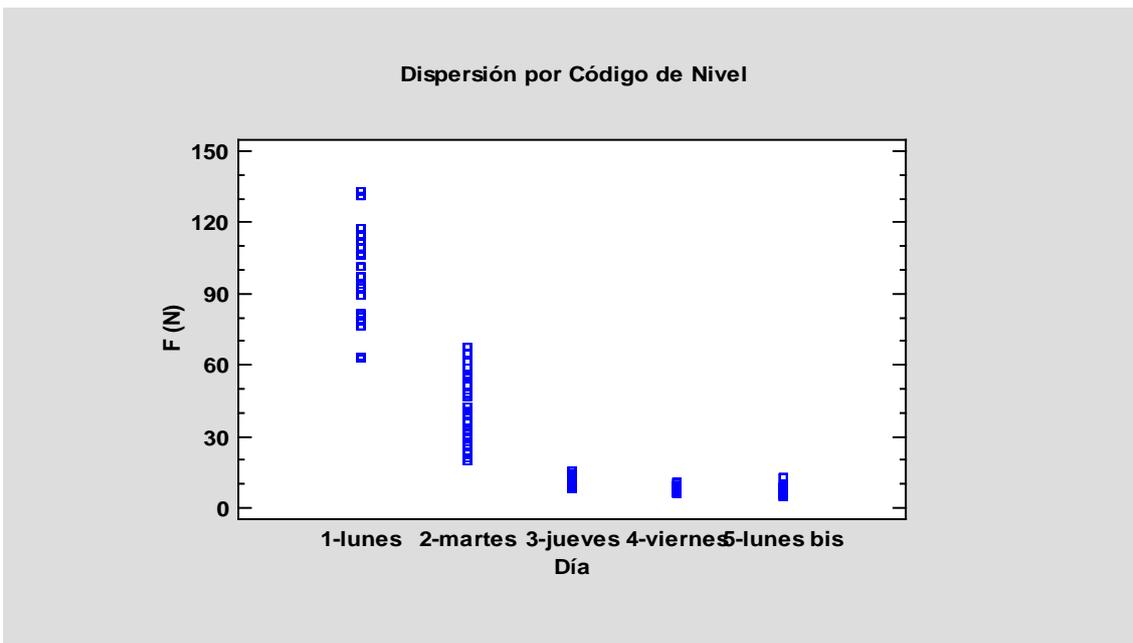


Figura 24: Dispersión de medias de la firmeza destructiva (medida como resistencia a compresión) para los diferentes días de ensayo.

4.3.2 Evolución de la firmeza medida de forma no destructiva

En este apartado se compararon los registros de las tres medidas obtenidas mediante el impactador no destructivo.

4.3.2.1 Evolución del parámetro del impactador Máximo (área máxima de la curva)

El factor día afecta significativamente a la variable Máximo registrada por el impactador, tabla 5. Los valores de Máximo decrecen de forma significativa según avanzan los días de almacenamiento no refrigerado y evoluciona la maduración del fruto, figura 25.

Tabla 5: Análisis de varianza del efecto de los días en que se han tomado las medidas en la firmeza no destructiva (parámetro máximo).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Día	2,3027E6	4	575676,	999,14	0,0000
RESIDUOS	716757,	1244	576,172		
TOTAL (CORREGIDO)	3,01946E6	1248			

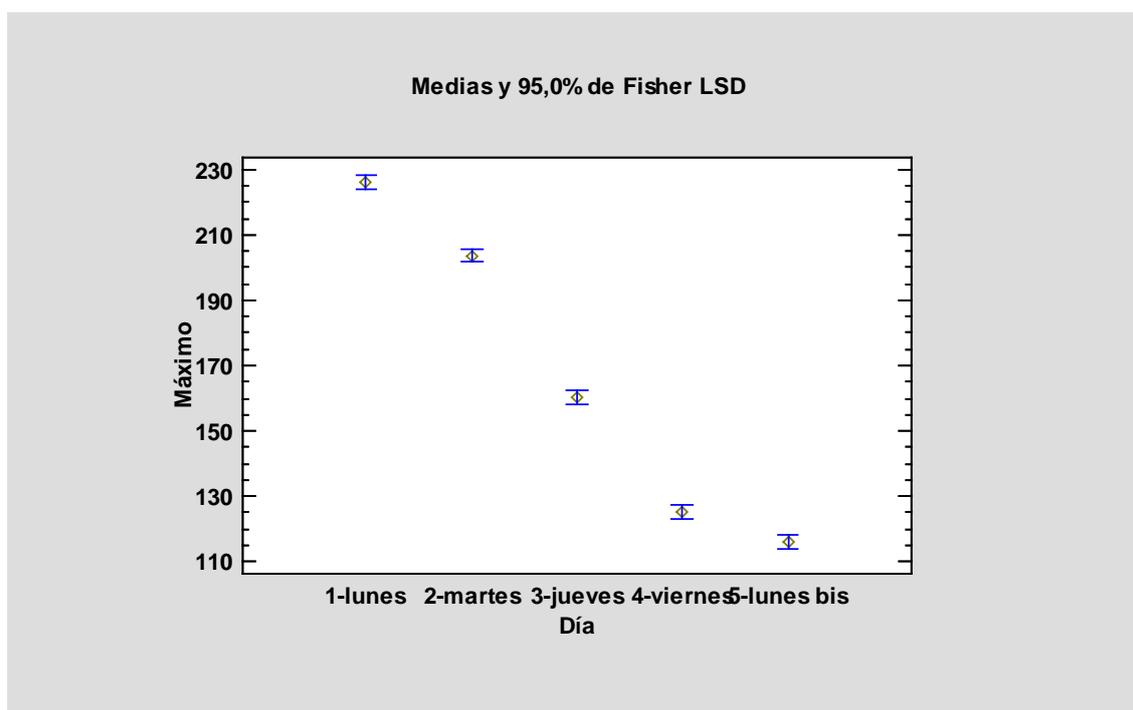


Figura 25: Medias e intervalos LSD de la firmeza no destructiva para los diferentes días de ensayo con el parámetro Máximo.

Como se puede observar, figura 25, la disminución de la variable del impactador Máximo, obtenida de forma no destructiva, mantiene la misma pendiente (decrece al mismo ritmo) a lo largo de los días de almacenamiento. Esta evolución no coincide con la que se registra de forma

destruccion en la que los primeros días la pendiente de bajada es más acusada que los últimos días.

4.3.2.2 Evolución del parámetro del impactador Avslp (pendiente media)

En el segundo parámetro tomado por el impactador no destructivo, Avslp, y mediante su análisis de varianza se observa en la tabla 6 que el factor día afecta significativamente.

Tabla 6: Análisis de varianza del efecto de los días en que se han tomado las medidas en la firmeza no destructiva (parámetro Avslp).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Día	86,2601	4	21,565	597,19	0,0000
RESIDUOS	44,922	1244	0,036111		
TOTAL (CORREGIDO)	131,182	1248			

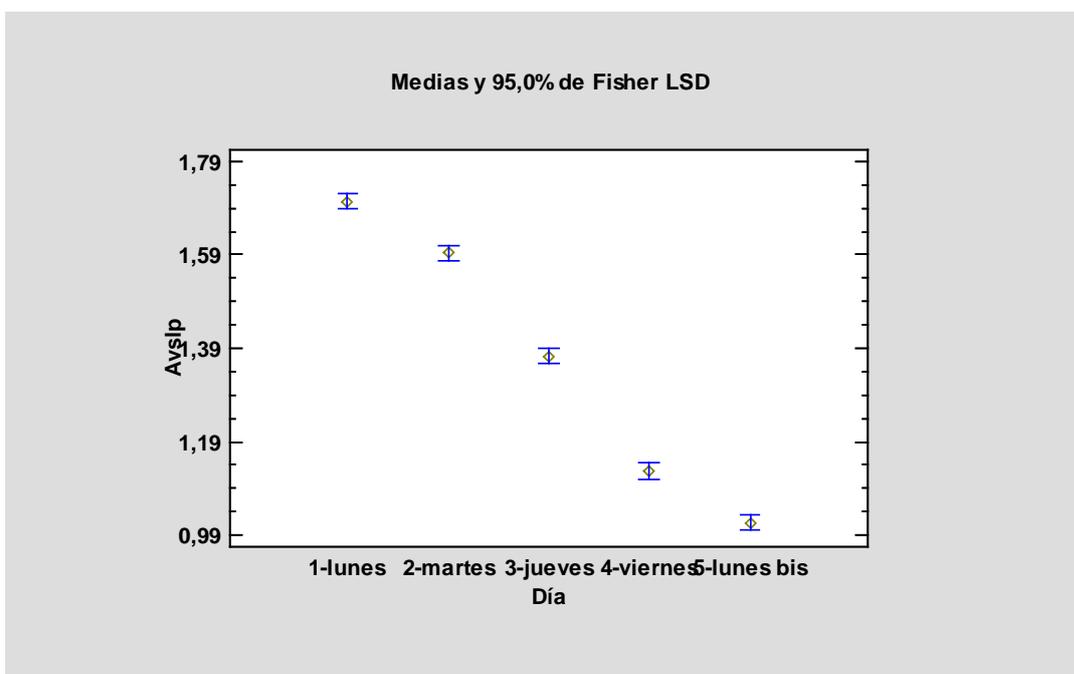


Figura 26: Medias e intervalos LSD de la firmeza no destructiva para los diferentes días de ensayo con el parámetro Avslp.

En la figura 26 se observa como los valores de Avslp decrecen de forma significativa según avanzan los días de almacenamiento no refrigerado y evoluciona la maduración del fruto.

Al igual que el parámetro descrito anteriormente, la disminución de la variable pendiente media decrece al mismo ritmo formando así una recta entre las medias de cada uno de los días.

4.3.2.3 Evolución del parámetro del impactador VE-A (aceleración máxima)

El factor día afecta significativamente en el tercer parámetro registrado por el impactador, VE-A, tabla 7.

Tabla 7: Análisis de varianza del efecto de los días en que se han tomado las medidas en la firmeza no destructiva (parámetro VE-A).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Día	360971,	4	90242,9	912,90	0,0000
RESIDUOS	122974,	1244	98,8533		
TOTAL (CORREGIDO)	483945,	1248			

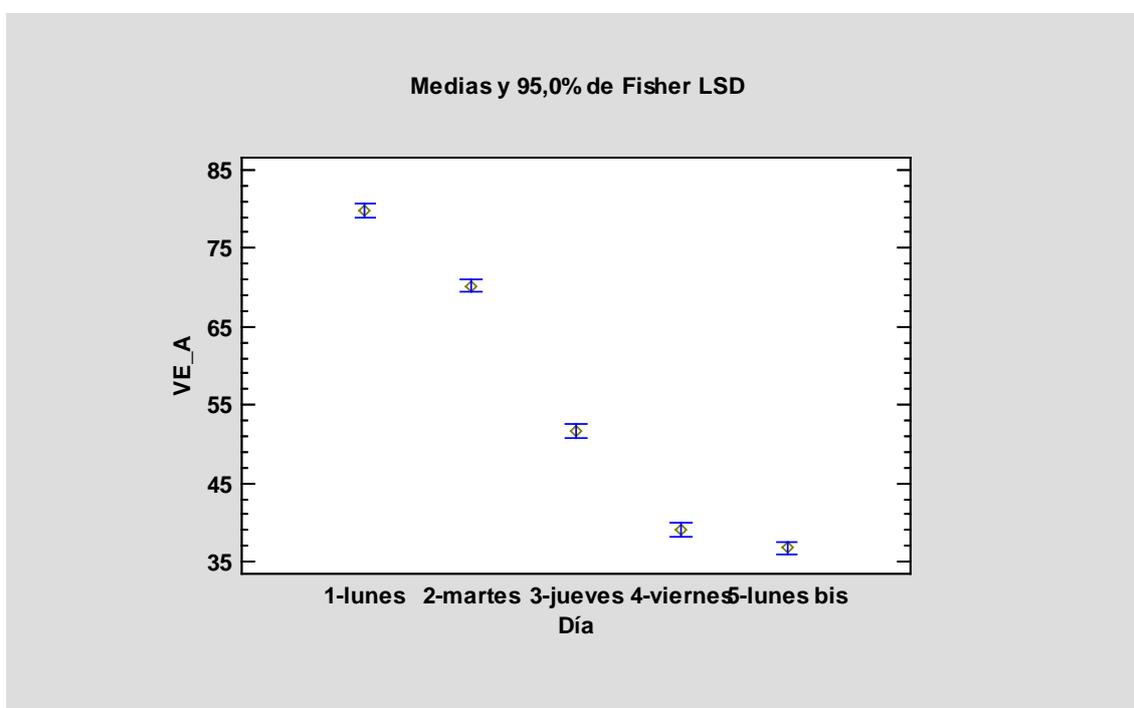


Figura 27: Medias e intervalos LSD de la firmeza no destructiva para los diferentes días de ensayo con el parámetro VE-A.

Los valores de VE-A decrecen de forma significativa según avanzan los días de almacenamiento no refrigerado y evoluciona la maduración del fruto, figura 27.

En este último parámetro, al igual que en los otros dos, la disminución de la variable aceleración máxima mantiene la misma pendiente, formando así una recta entre las medias de cada uno de los días.

4.3.2.4 Comparación entre caras

La tabla 8 muestra el análisis de varianza donde se analizan los efectos principales a) Día y b) cara, sobre los valores del último parámetro registrado VE-A.

En la tabla se muestra que el factor día es estadísticamente significativo, como ya se había comprobado. Sin embargo, la cara del fruto (A o B) donde se ha tomado las muestras no tiene efecto significativo para ninguna de las variables extraídas del impactador.

Se observa que su p-valor es superior a 0,05, siendo este 0,0817.

Tabla 8: Análisis de varianza del efecto de los días y la cara en que se han tomado las medidas en la firmeza no destructiva.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Día	360943,	4	90235,8	919,75	0,0000
B: cara	71,2572	1	71,2572	0,73	0,3941
INTERACCIONES					
AB	1344,7	4	336,176	3,43	0,0085
RESIDUOS	121557,	1239	98,1091		
TOTAL (CORREGIDO)	483945,	1248			

4.3.2.5 Comparación entre repeticiones

De la misma manera que la cara, la repetición no tiene efecto significativo en ninguna de las variables del impactador.

Se observa en la tabla 9, que su p-valor es de 0,99. Al igual que en la cara el día es un factor estadísticamente significativo pero la repetición no.

Tabla 9: Análisis de varianza del efecto de los días y las repeticiones realizadas en la firmeza no destructiva.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Día	360981,	4	90245,2	900,47	0,0000
B:REPETICIÓN	17,6209	4	4,40523	0,04	0,9963
INTERACCIONES					
AB	286,344	16	17,8965	0,18	0,9999
RESIDUOS	122670,	1224	100,22		
TOTAL (CORREGIDO)	483945,	1248			

Por otra parte, en la prueba de rangos múltiples, tabla 10, se puede observar como para las 5 repeticiones que se le realizaron en cada cara del fruto no se observan diferencias significativas, diferenciándose las medias en un máximo de 0,56.

Tabla 10: Prueba de múltiples rangos de las repeticiones realizadas en cada cara del fruto en la firmeza no destructiva.

REPETICIÓN	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1	250	55,3482	0,633152	X
5	249	55,3781	0,634443	X
4	250	55,5317	0,633152	X
2	250	55,5612	0,633152	X
3	250	55,6671	0,633152	X

4.3.3 Comparación de medidas del ensayo de firmeza medida de forma destructiva frente al ensayo de firmeza medida de forma no destructiva.

4.3.3.1 Relación entre la firmeza destructiva y las variables no destructivas

Para evaluar la relación entre la firmeza destructiva y las variables extraídas con el impactador, se realizó un análisis de las correlaciones entre las variables. En todos los casos se obtuvieron correlaciones positivas entre la firmeza destructiva y los parámetros extraídos del impactador (VE-A, AvSlp, Máximo), mayores de 0,8 en todos los casos.

Se comprobó que existe una relación cuadrática entre la firmeza y las distintas variables extraídas con el impactador. En la figura 28 se observa la relación entre la firmeza destructiva (F) y la variable extraída de la curva del impactador (Máximo), ecuación [1].

$$F (N) = -20,1711 + 0,00176413 * \text{Máximo}^2 \quad [1]$$

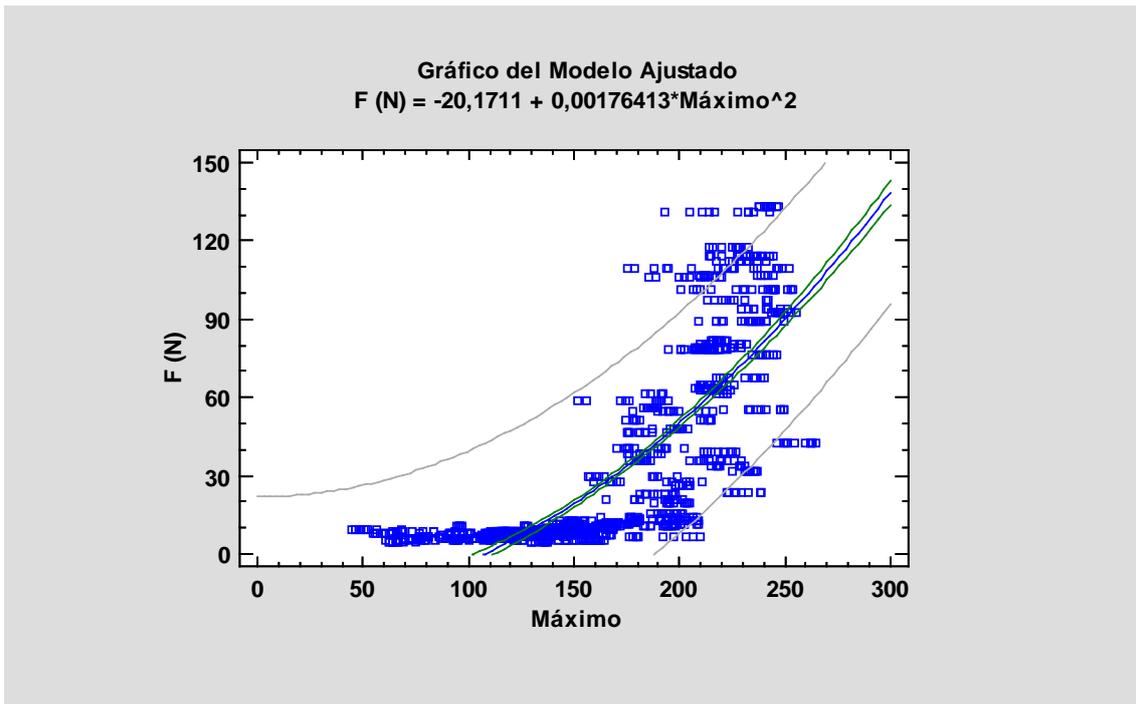


Figura 28: Resultados de ajustar un modelo X-cuadrada para describir la relación entre F (N) y Máximo.

Este modelo explica un 64% de la variabilidad de la firmeza destructiva en función de Máximo.

4.3.3.2 Regresión múltiple de la fuerza en función de 5 valores medidos

Para la evaluación de la correlación la media de firmeza con el equipo destructivo y con el prototipo no destructivo, se realizó una regresión múltiple. En ésta se relaciona la medida tomada con el equipo destructivo (utilizada como referencia de firmeza) con las medias de las tres variables no destructivas extraídas con el impactador, incluyendo además los parámetros calibre y masa, ecuación [2], figura 29.

$$F(N) = -117,078 + 0,60463 * \text{masa} - 0,249032 * \text{calibre} + 0,721578 * \text{VE_A} - 150,813 * \text{Avslp} + 1,12892 * \text{Máximo} [2]$$

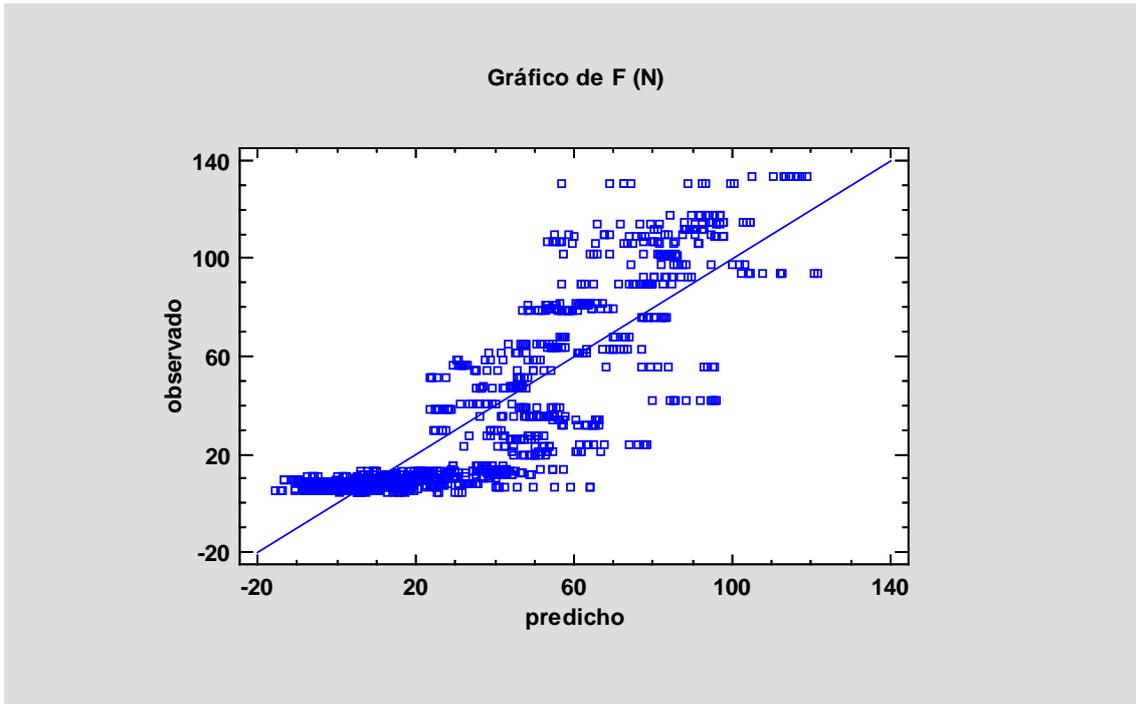


Figura 29: Resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre F (N) con las variables masa, calibre y los tres parámetros medidos por el impactador.

En este caso la regresión múltiple nos explica un 74% la variabilidad de los valores observados de firmeza destructiva frente a los predichos mediante la ecuación de regresión.

5. Conclusiones

El prototipo impactador ensayado es capaz de registrar tres variables extraídas del acelerómetro con fiabilidad, y obtiene una buena repetitibilidad de estas medidas. Mediante el ensayo de calibración se comprobó que la repetitibilidad del equipo era aceptable, el coeficiente de variación obtenido en las medidas de calibración con el cilindro, al igual que con el fruto electrónico, fue bajo (menor de 2,4 %).

El prototipo impactador estudiado es capaz de evaluar la disminución de firmeza de los aguacates durante su proceso de maduración.

Se ha obtenido una alta correlación entre las variables extraídas del impactador y la firmeza destructiva utilizada como referencia, en todos los casos mayor de 0,8. Además se ha podido construir un modelo de regresión múltiple para explicar la firmeza destructiva en función de las variables extraídas del impactador, incluyendo masa y calibre, con una R^2 de 74 %.

El prototipo impactador es capaz de tomar medidas relacionadas directamente con la firmeza del aguacate sin producir daños en la parte externa o interna del fruto.

6. Bibliografía

AGRICULTURALBLOGGER. <http://agriculturablogger.blogspot.com.es>. Fecha de búsqueda: Octubre de 2017.

AGRO-TECNOLOGIA. <http://www.agro-technologie.es>. Fecha de búsqueda: Octubre de 2017.

AGUSTÍ, M. (2010). **Fruticultura**. Ed. **Mundi-Prensa Libros, s. a.** (pp. 467-473)

ARPAIA, M. L. BOREHAM, D., COLLIN, S., FJELD, K., & SIEVERT, J. (2003a). Hass mature project, **California Avocado Research Symposium**, 120–124.

ARPAIA, M. L., SIEVERT, J., COLLIN, S., FJELD, K., COETZER, M., STOTTLEMYER, D. S. (2003b). Avocado postharvest quality, **California Avocado Research Symposium**, 125–139.

ARZATE-VÁZQUEZ, I., CHANONA-PÉREZ, J. J., PEREA-FLORES, M. J., CALDERÓNDOMÍNGUEZ, G., MORENO-ARMENDÁRIZ, M. A., CALVO, H., ET AL. (2011). Image processing applied to classification of avocado variety Hass (*Persea americana* Mill.) during the ripening process, **Food and Bioprocess Technology**, 4, 1307–1313.

BARREIRO, P., RUIZ-ALTISENT, M. (1996). Propiedades mecánicas y calidad de frutos, definiciones y medidas instrumentales, **Fruticultura Profesional**, 77, 48-51.

BELLON V., CHO S.I., KRUTZ G.W., DAVENEL A., (1992). Ripeness sensor development based on nuclear magnetic resonance, **Food Control** (January), 45-48.

CHEN P., RUIZ-ALTISENT M., (1996). A low-mass impact sensor for high-speed firmness sensing of fruits, **Proc Intl Conf Agricultural Engineering. Madrid**. September 23-26, Paper 96F-003.

CHEN, P., MCCARTHY, M. J., KIM, S. -M., & ZION, B. (1996). Evelopment of a high-speed NMR technique for sensing maturit avocados, **Transction of the American Society of Agricultural Engineering**, 39, 2205–2209.

DESMET M., LAMMERTYN J., SCHEERLINCK N., VERLINDEN B.E., (2002). A pendulum for testing puncture injury susceptibility of tomatoes, **Proc Intl Conf Agricultural Engineering. Budapest**. June 30-July 4. Paper 02-PH-038.

DONETTI, M., & TERRY, L. A. (2014). Biochemical markers defining growing area and ripening stage of imported avocado fruit cv. Hass, **Journal of Food Composition and Analysis**, 34, 90–98.

FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2011. Base de datos estadísticos. <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/S>. Fecha de consulta: Julio de 2017.

- FLITSANOV, U., MIZRACH, A., LIBERZON, A., AKERMAN, M., & ZAUBERMAN, G. (2000). Measurement of avocado softening at various temperatures using ultrasound, **Postharvest Biology and Technology**, 20, 279–286.
- GAMBLE, J., HARKER, F. R., JAEGER, S. R., WHITE, A., BAVA, C., BERESFORD, M., ET AL. (2010). The impact of dry matter, ripeness and internal defects on consumer perceptions of avocado quality and intentions to purchase, **Postharvest Biology and Technology**, 57, 35–43.
- GARCÍA-RAMOS, F. J., VALERO, C., HOME, I., ORTIZ-CAÑAVATE, J. AND RUIZ-ALTISENT, M. (2005). Non-destructive fruit firmness sensors: a review. **Spanish Journal of Agricultural Research**, 3(1), 61-73.
- GIROD, D., LANDRY, J. A., DOYON, G., OSUNA-GARCIA, J. A., SALAZAR-GARCIA, S., & GOENAGA-PORTELA, R. J. (2008). Evaluating hass avocado maturity using hyperspectral imaging, **Caribbean Food and Crops Society Proceeding**, 44, 144–154.
- GUERRERO, E. R. & BENAVIDES, G. M. (2014). Automated system for classifying Hass avocados based on image processing techniques, **I.E. Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM), Bogota**, 4–6 June 2014, pp.1–6.
- HUNG Y.C., MCWATERS K.H., PRUSIA S.E., (1998). Peach sorting performance of a nondestructive laser air-puff firmness detector. **Appl Eng in Agr** 14(5), 513-16.
- JARÉN C., (1994). Detección de la textura de frutos por medio de impactos no destructivos: Desarrollo y aplicaciones del procedimiento de clasificación, **Doctoral Thesis. Universidad Politécnica de Madrid**.
- KADER, A. A. (1999). Fruit maturity, ripening, and quality relationships, **Acta Horticulturae**, 485, 203–208.
- KADER, A. A., SOMMER, N. F., & ARPAIA, M. L. (2002). **Postharvest handling systems: tropical fruits, Postharvest technology of horticultural crops**. Ed. A. A. Kader. **Oakland: University of California Press** (pp. 385–398).
- KAISER, C., & WOLSTENHOLME, B. N. (1994). Aspects of delayed harvest of Hass avocado (*Persea americana* Mill.) fruit in a cool subtropical climate I. Fruit lipid and fatty acid accumulation, **Journal of Horticultural Science**, 69, 437–445.
- LEE, S. K., & YOUNG, R. C. (1983). Growth measurement as an indication of avocado maturity, **Jornal of the American Society for Horticultural Science**, 108, 395–397.

LEE, S., YOUNG, R. E., SCHIFFMAN, P. M., & COGGINS JR., C. W. (1983). Maturity studies of avocado fruit based on picking dates and dry weight, **Journal of the American Society for Horticultural Science**, 108, 390–394.

LU R. (2001). Predicting firmness and sugar content of sweet cherries using near-infrared diffuse reflectance spectroscopy, **T ASAE** 44(5), 1265-1271.

LU, R. (2004). Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit, **Postharvest Biology and Technology**, 31, 147-157.

MACNISH A.J., JOYCE D.C., SHORTER A.J., (1997). A simple non-destructive method for laboratory evaluation of fruit firmness. **Aust J Exp Agr** 37, 709-13.

MAFTOONAZAD, N., KARIMI, Y., RAMASWAMY, H., & PRASHER, S. (2011). Artificial neural network modeling of hyperspectral radiometric data for quality changes associated with avocados during storage, **Journal of Food Processing and Preservation**, 35, 432–446.

Magwaza, L. S. & Tesfay, S. Z. (2015). A Review of Destructive and Non-destructive Methods for Determining Avocado Fruit Maturity. **Food and Bioprocess Technology**, 8, 1995–2011

MANS, C. C., DONKIN, D. J., & BOSHOFF, M. (1995). Maturity and storage temperature regimes for KwaZulu Natal avocados, **South African Avocado Growers' Association Yearbook**, 18, 102–105.

MIZRACH, A. (2000). Determination of avocado and mango fruit properties by ultrasonic technique. **Ultrasonics**, 38, 717–722.

MIZRACH, A., GALILI, N., GAN-MOR, S., FLITSANOV, U., & PRIGOZIN, I. (1996). Model of ultrasonic parameters to assess avocado properties and shelf life, **Journal of Agricultural and Engineering Research**, 65, 261–267.

MOHSENIN N., (1970). Physical properties of plant and animal materials, **Gordon and Breach Science Publishers. USA**. 734 pp.

Obenland, D., Collin, S., Sievert, J., Negm, F., Arpaia, M. L., (2012). Influence of maturity and ripening on aroma volatiles and flavor in 'Hass' avocado, **Postharvest Biology and Technology**, 71, 41–50.

PAK, H. A., DIXON, J., & CUTTING, J. (2003). Influence of early season maturity on fruit quality in New Zealand 'Hass' avocados, **Fifth World Avocado Congress**, 635–640.

PELEG, K., BEN-HANAN, U., & HINGA, S. (1990). Classification of avocado by firmness and maturity, **Journal of Texture Studies**, 21, 123–139.

RESERCHGATE. https://www.researchgate.net/figure/248386929_fig1_Fig-8-The-FIRMALON-used-three-piezoelectric-sensors-to-measure-fruit-firmness. Fecha de búsqueda: Octubre de 2017.

SEYMOUR, G. B., & TUCKER, G. A. (1993). **Biochemistry of fruit ripening**. Eds. B. Seymour, J. Taylor, & G. A. Tucker. London: Chapman & Hall (pp. 53–81).

SOTTO, R. C. (2000). Avocado production in Asia and the Pacific: avocado production in the Philippines. **FAO/RAP publication**, 2000(09), 39–48.

TESTERSUPPLY. <http://testersupply.es>. Fecha de búsqueda: Octubre de 2017.

VINHA, A. F., MOREIRA, J., & BARREIRA, S. V. P. (2013). Physicochemical parameters, phytochemical composition and antioxidant activity of the Algarvian avocado (*Persea americana* Mill.), **Journal of Agricultural Science**, 5, 100–109.

WERMAN, M. J., & NEEMAN, I. (1987). Avocado oil production and chemical characteristics, **JAOCS**, 64(2), 229–232.

WILLS, R. B. H., MCGLASSON, W. B., GRAHAM, D., & JOYCE, D. C. (2007). **Postharvest: an introduction to the physiology and handling of fruit, vegetables and ornamentals (5th ed.,)**. Oxfordshire, Oxford: CAB International.

WOOLF, A. B., WHITE, A., ARPAIA, M., & GROSS, K. C. (2004). **Agriculture handbook 66: the storage of fruits, vegetables and florist and nursery stocks**. Eds. K. C. Gross, C. Y. Wang, & M. Salveit

WU, D., & SUN, D. -W. (2013). Colour measurements by computer vision for food quality control—a review, **Trends in Food Science and Technology**, 29, 5–20.