



Facultad de Veterinaria
Universidad Zaragoza



Trabajo Fin de Grado en Ciencia y Tecnología de los alimentos

Medida y correlación de la firmeza de manzanas realizada por métodos ópticos y mecánicos

Measurement and correlation of apple firmness done by optical and mechanical methods

Autor/es

Jorge Andaluz Arbe

Director/es

Fernando Blesa Moreno
Francisco José Torcal Milla

Facultad de Veterinaria

2019/2020

ÍNDICE

1. RESUMEN.	1
2. ABSTRACT.....	1
3. INTRODUCCIÓN.....	2
3.1. Producción y consumo de frutas y hortalizas.	2
3.2. La manzana.....	3
3.3. Producción y consumo de manzanas.	5
3.4. Índices de madurez de las manzanas.	6
4. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.	8
5. METODOLOGÍA.....	8
5.1. Introducción.	8
5.2. Material vegetal.	9
5.3. Equipos.	9
5.3.1. Penetrómetro.....	10
5.3.2. Refractómetro.....	10
5.3.3. Calibre o Pie de Rey.....	11
5.3.4. Balanza de precisión.....	11
5.4. Preparación de las muestras.	11
5.5. Captura de imágenes.....	12
5.6. Software.	13
5.7. Obtención de datos a partir de las imágenes.....	14
5.8. Análisis estadístico.	17
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
6.1. Comparativa de las medidas de firmeza obtenidas con el penetrómetro y el método Vis-NIR.	20
6.2. Comparativa de las medias aritméticas de firmeza obtenidas con penetrómetro y el método Vis-NIR.	23

6.3. Comparativa de las medidas de SST obtenidas con refractómetro y el método Vis-NIR.	26
6.4. Comparativa de las medias aritméticas de SST obtenidas con refractómetro y el método Vis-NIR.	29
6.5. Discusión.	35
7. CONCLUSIÓN.	36
8. CONCLUSSIONS.	37
9. VALORACIÓN PERSONAL.	37
10. BIBLIOGRAFÍA.	38
11. ANEXOS.	41
ANEXO 1: Medidas obtenidas mediante los métodos destructivos durante la fase experimental.	41
A.1.1. Altura, diámetro y peso de las manzanas.	41
A.1.2. Penetrómetro manual.	42
A.1.3. Refractómetro analógico.	44
ANEXO 2: Resultados del ajuste no lineal (MLD-4) mediante la espectroscopía durante la fase experimental.	46
A.2.1. Rayo láser a 670 nm.	46
A.2.2. Rayo láser a 785 nm.	49
ANEXO 3: Resultados obtenidos durante el análisis estadístico.	52
A.3.1. Comparativa de las medidas de firmeza obtenidas con el penetrómetro y el método Vis-NIR.	52
A.3.2. Comparativa de las medias aritméticas de firmeza obtenidas con penetrómetro y el método Vis-NIR.	58
A.3.3. Comparativa de las medidas de SST obtenidas con refractómetro y el método Vis-NIR.	64
A.3.4. Comparativa de las medias aritméticas de SST obtenidas con refractómetro y el método Vis-NIR.	70
ANEXO 4: Script Fiji.	76

1. RESUMEN.

Según el MAPA (2019), España es el principal país europeo productor de frutas y hortalizas y el primer exportador. Dentro de los países europeos que más manzanas producen, España se sitúa en sexto lugar. Las frutas más consumidas en España son los cítricos, las exóticas y las de pepita, como es el caso de la manzana, siendo la variedad Golden Delicious la más consumida.

La manzana debe ser sometida a ciertos procedimientos para determinar su calidad, un aspecto actualmente demandado por el consumidor. Como índices de calidad se encuentran el peso, la forma, el color, la dureza o firmeza y los Sólidos Solubles Totales (SST). La metodología actual para determinar la firmeza y los SST se caracteriza por emplear equipos como el penetrómetro y el refractómetro, respectivamente. Debido a que se tratan de métodos destructivos es imposible aplicarlos a todas las unidades en una industria. Por este motivo, se están buscando otras alternativas a dichos métodos como son la espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS) y el Análisis de Imágenes Multiespectrales.

Con este trabajo se pretende comparar los resultados obtenidos con el penetrómetro y el refractómetro con los obtenidos por un método alternativo. Para ello, se aplicará espectroscopía con haz láser de dos longitudes de onda (670 nm y 785 nm) para la determinación de la firmeza y los SST de las manzanas analizadas y, posteriormente, se analizará la correlación de dichos parámetros con los medidos por métodos convencionales. Las manzanas empleadas en este estudio pertenecen a las variedades Golden Delicious, Fuji y Kanzi®.

Las manzanas pertenecientes a variedades amarillas, como Golden Delicious, mostraron una mayor correlación entre los métodos invasivos y no invasivos respecto a la firmeza, mientras que Fuji y Kanzi®, cuya piel es de color rojo, mostraron una correlación mayor en relación al contenido en SST.

2. ABSTRACT.

According to the MAPA (2019), Spain is the main European producer of fruit and vegetables and the leading exporter. Among European apple-growing countries, Spain is in sixth place. The most consumed fruits in Spain are citrus, exotic fruits and pome fruits, as it is the case of apple, being Golden Delicious the variety which has the most consumption.

Apple must undergo certain procedures to determine its quality, an aspect that is specially demanded by consumers nowadays. Quality indexes include weight, shape, colour, hardness or firmness and Total Soluble Solids (TSS). The current methodology to determine firmness and TSS

is characterised by the used of equipment such as penetrometers and refractometers, respectively. Due to the fact that these are destructive methods, it is impossible to apply them to all units in the industry. Therefore, other alternatives such as Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) and Multispectral Image Analysis are being sought.

The aim of this work is to compare the results obtained with penetrometer and refractometer and those obtained with an alternative method. For this purpose, a two wavelengths (670 nm and 785 nm) laser beam spectroscopy is applied to determine the firmness and the TSS content of the analysed apples and, subsequently, their correlation with these measured parameters will be analysed with those measured by conventional equipment. The apples used in this study belong to Golden Delicious, Fuji and Kanzi[®] varieties.

In general, apples belonging to yellow varieties, as it is the case of Golden Delicious, showed a greater correlation between invasive and non-invasive methods according to firmness, while Fuji and Kanzi[®] varieties, whose skin is red, showed a higher correlation in relation to the TSS content.

3. INTRODUCCIÓN.

3.1. Producción y consumo de frutas y hortalizas.

En la actualidad, España es el primer país europeo en cuanto a producción en el sector hortofrutícola, cuyo volumen representa el 25% de la producción total de Europa y un 2% de la producción mundial. Cabe destacar que entre los años 2013 y 2017, la cuantía económica de la producción de frutas y hortalizas en España fue de 12.888 millones de euros, mientras que la cuantía económica de la producción de frutas y hortalizas en la Unión Europea fue de 65.459 millones de euros. Asimismo, en 2017, 1.755.102 hectáreas fueron destinadas al cultivo de frutas y hortalizas en España, siendo Andalucía la Comunidad Autónoma con mayor producción de este tipo de productos, lo cual representa el 29% del total nacional (MAPA, 2019).

En España, el cultivo de frutas y hortalizas supone el 47% de la producción vegetal y el 29% de la producción agraria. Además, es el principal país exportador a nivel europeo y el tercero a nivel mundial. El 50% de la producción se exporta a otros países y los principales productos son las hortalizas de invernadero (tomate, pimiento y pepino), seguido de los cítricos, el melocotón y la nectarina. Las exportaciones van destinadas en su mayoría a países europeos como Alemania, Francia, Reino Unido y Países Bajos (MAPA, 2019).

En 2018, en España el consumo de fruta fresca disminuyó un 1,8% en volumen respecto al año anterior, lo cual conllevó un descenso del consumo per cápita en un 2,1%. Los tipos de fruta fresca más consumidos per cápita son los cítricos, seguido de las frutas exóticas y las frutas de pepita. Las manzanas pertenecen a este último grupo, con un consumo per cápita anual de 16,3 kg. Los principales canales de distribución son el supermercado y la tienda tradicional y el principal consumidor se corresponde a personas retiradas y a parejas adultas sin hijos, a diferencia de las familias monoparentales y los jóvenes independientes, con un menor consumo. Por otro lado, las Comunidades Autónomas con mayor consumo de fruta fresca son País Vasco y Galicia, mientras que Andalucía y Canarias son las que menos consumen (MAPA, 2019).

3.2. La manzana.

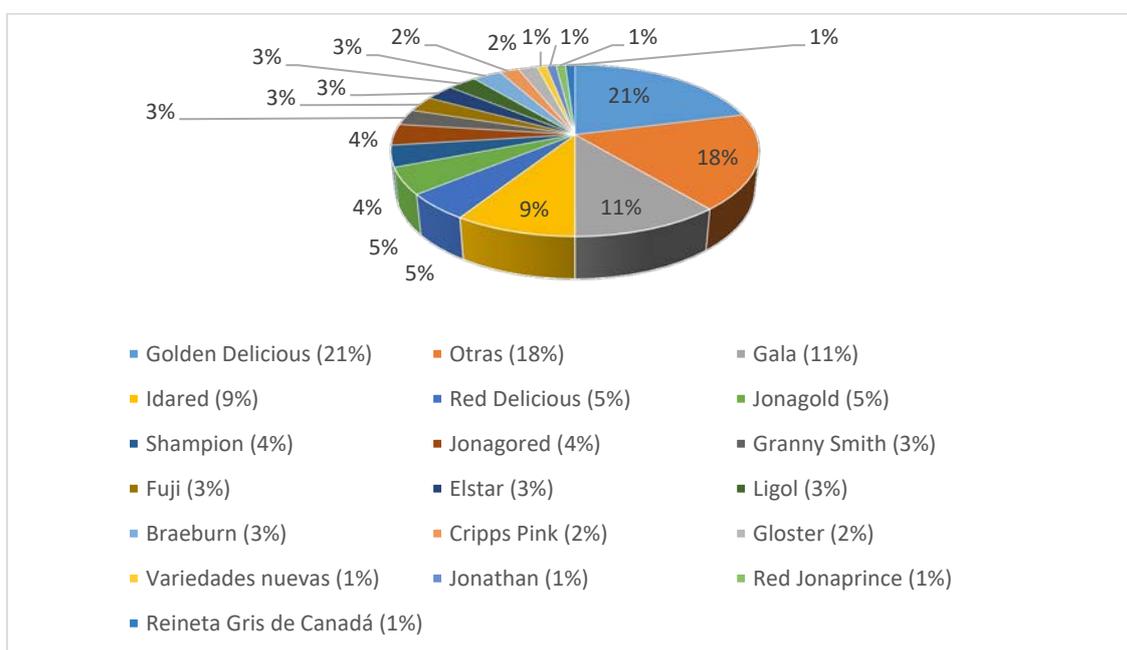
Siguiendo a Agustí (2008), la manzana es una de las frutas más conocidas y estudiadas en todo el mundo. Se trata del fruto comestible procedente del manzano (*Malus domestica*), un árbol caducifolio con unas características muy determinadas, ya que presenta un tronco y ramas de color gris, una corteza agrietada, con lenticelas y una copa con forma redondeada y ramificación abierta. Este árbol es capaz de alcanzar una altura de 10 a 12 metros y sus hojas ovales destacan por su haz de color verde oscuro y un color verde blanquecino en el envés. Sus flores tienen una gran similitud con otras especies, como el peral (*Pyrus communis L.*). Proviene de los bosques Tian Shan, entre China, Kazajistán y Kirguistán, aunque su cultivo se ha extendido por todo el mundo.

El manzano es un árbol frutal que presenta una buena adaptación a los 600-1.000 metros de altitud, hecho que da lugar a una buena coloración y calidad en sus frutos. Además, presenta necesidades de nitrógeno, fósforo y potasio. Las plagas más comunes son el piojo de San José (*Quadraspidiotus perniciosus*), el pulgón negro (*Eriosoma lanigerum*), el pulgón ceniciento (*Dysaphis plataginea*), el pulgón verde (*Aphis pomi*), algunos lepidópteros como son *Cydia pomonella L.* y *Cacoecimorpha pronubana Hb.* También puede estar presente un coleóptero (*Anthonomus pomorum*) y diversos ácaros como *Panonychus ulmi Koch* y *Aculus schlechtendali Nal* (Agustí, 2008).

El fruto obtenido del manzano recibe el nombre de pomo, que puede presentar diversos colores, como rojo, amarillo o verde. Externamente destaca por su forma esférica achatada y troncocónica e, internamente, por su pulpa blanca, jugosa y aromática. Sus semillas son de pequeño tamaño, de color marrón oscuro y con un brillo característico. Al igual que otras frutas, como la pera o el melocotón, la manzana es una fruta climatérica, es decir, aumenta su

producción de etileno antes de la maduración, lo que conlleva a un aumento de su respiración, por lo que es capaz de madurar separada del árbol.

Existen multitud de variedades de manzana en todo el mundo y éstas se clasifican en función del color de su epidermis y su precocidad. En España, las variedades que más se cultivan son Golden Delicious, dentro de las manzanas de epidermis amarilla, Early Red One y Red Chief, dentro de las variedades rojas, Royal Gala, Jonagold, Elstar, Fuji, Braeburn y Pink Lady, del grupo de variedades bicolors, Granny Smith, de color verde y, por último, dentro de las variedades cuya epidermis se encuentra bronceada, como la Reina de Reinetas Gris (Agustí, 2008). La gráfica 1 muestra los porcentajes de producción de las principales variedades de manzana en la UE.



Gráfica 1: Porcentaje de producción de manzanas en la UE por variedad (Fuente: Comisión Europea. Dirección General de Agricultura, 2017).

A continuación, se expondrán las principales características de tres de las variedades más importantes en España y que, asimismo, son las que se han escogido para la parte experimental de este trabajo: Golden Delicious, Fuji y Kanzi®.

Golden Delicious es una variedad originaria de Estados Unidos obtenida a través del cruce entre Golden Reineta y Grimes Golden. Es la variedad más cultivada en España, puesto que representa más del 50% de la superficie cultivada de manzano. Su amplio cultivo es debido a que se trata de un frutal muy productivo y muy adaptable a casi cualquier tipo de suelo o clima. Su maduración tiene lugar a mediados de septiembre. Se trata de un fruto que destaca por su tamaño medio, de forma redonda troncocónica, de piel fina y coloración amarilla dorada con presencia de lenticelas de color gris. Su pulpa presenta una coloración blanco-amarillenta y una

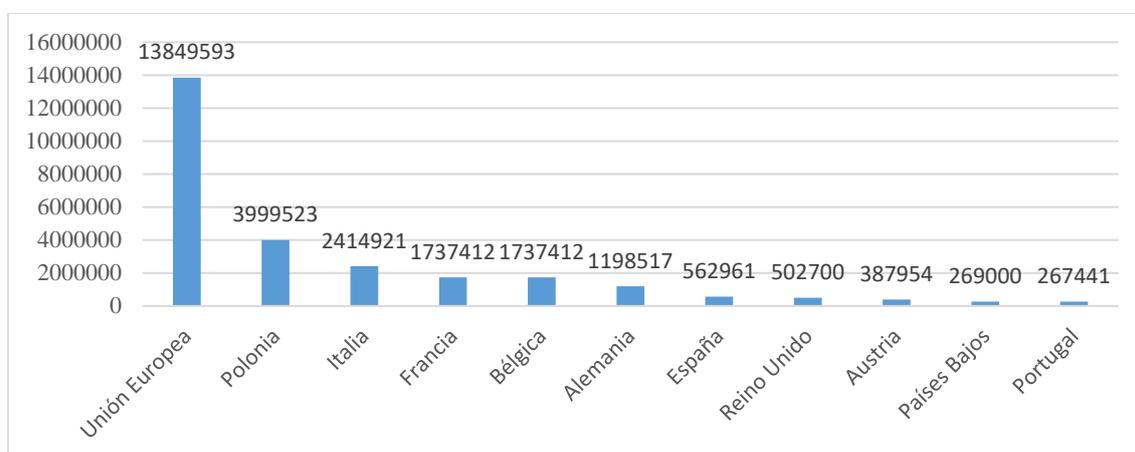
textura firme y jugosa. Es posible su conservación hasta 8 o 9 meses en una atmósfera ULO (Ultra Low Oxygen) (Agustí, 2008).

La manzana de variedad Fuji es originaria de Japón y se obtuvo mediante el cruce entre Rall's Janet y Red Delicious. La maduración de esta manzana tiene lugar a mediados de octubre. Su árbol es bastante productivo y presenta un fruto de tamaño mediano-grande, forma redondeada, ligeramente irregular y aplanada y de color rojo sobre fondo amarillo estriado. La pulpa es dulce, jugosa, de buena calidad gustativa y se caracteriza por un elevado contenido en azúcares y baja concentración de ácidos (Agustí, 2008).

Kanzi® hace referencia a una marca comercial de manzanas obtenidas mediante el cruce de las variedades Royal Gala y Braeburn. Tal y como se detalla en su información corporativa, se trata de una de las tres marcas de manzana más importantes del mundo, ya que se cultiva en once países alrededor de todo el globo, por lo que se encuentran a disposición del consumidor durante todo el año. La recolección de estas manzanas se lleva a cabo en otoño. Su fruto es de color rojo y estriado, con una pulpa dulce y poco acidulada (Kanzi® Apple España, 2020).

3.3. Producción y consumo de manzanas.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la manzana es un fruto bastante cultivado y consumido tanto en España como en el resto del mundo. En 2015, España presentó una superficie total cultivada de manzano de 4.758 hectáreas en producción integrada (MAPA, 2015) y 1.483,38 hectáreas en producción ecológica en 2018 (MAPA, 2019). En 2018, la producción de manzanas fue de 562.961 toneladas, mientras que en la UE, la producción fue de 13.849.593 toneladas (MAPA, 2019). La gráfica 2 indica la producción de manzanas en los principales países europeos. Los países más productores son Polonia, Italia y Francia.



Gráfica 2: Producción de manzanas en la UE en 2018 (Fuente: FAO, 2020).

Volviendo a España, en 2018 la compra de manzanas disminuyó un 3,8% respecto al año anterior, lo cual representa un consumo doméstico total de 431.935,46 kilogramos. El consumo per cápita fue de 9,44 kg, descendiendo un 4,1%. No obstante, el gasto per cápita aumentó un 8,1%. Los supermercados y las tiendas tradicionales fueron los establecimientos donde se vendieron el 65,70% de las manzanas. El precio medio para las manzanas fue de 1,56 €/kg, lo cual supuso un encarecimiento del 12,8% respecto a 2017. La Comunidad Autónoma con mayor consumo per cápita de manzanas es Galicia, al contrario que Andalucía, que es en la que menos se consume. No obstante, La Rioja y Comunidad Foral de Navarra fueron las Comunidades Autónomas que adquirieron un mayor volumen de manzanas (MAPA, 2019).

3.4. Índices de madurez de las manzanas.

Es posible determinar la madurez de las manzanas atendiendo a varios índices, los cuales se pueden clasificar en dos grupos de acuerdo con su naturaleza: física y química.

Dentro de los índices físicos se encuentra el desarrollo de la capa de abscisión, el peso, el tamaño, la forma, el color y la dureza. El peso, el tamaño y la forma se determinan mediante anillos de medida, reglas, calibre o pie de rey y calculando el volumen desplazado. El color se determina visualmente con cartas de color o experimentalmente, con un colorímetro. Y, por último, la dureza o firmeza se puede medir con métodos destructivos, como lo son el penetrómetro y el durómetro, y por métodos no destructivos, como el impacto acústico, la espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS) o el Análisis de Imágenes Multiespectrales (Lafuente, 2015).

Los índices de naturaleza química hacen referencia a los Sólidos Solubles Totales (SST), cuya determinación se realiza con el refractómetro de Abbe, la acidez titulable, determinada mediante una valoración ácido-base, y el contenido en almidón, mediante reacción con yodo.

A pesar de la importancia de todos los índices mencionados, la firmeza es el parámetro clave para la clasificación comercial del producto. Ello es fundamental para el transporte, almacenamiento, distribución y procesado de las manzanas, así como para determinar la madurez y el momento de la cosecha. Por este motivo, su medida es fundamental.

Normalmente, la firmeza se mide con un texturómetro aplicando el test de Magness-Taylor (MT), es decir, una sonda mecánica penetra en el interior de la fruta una profundidad específica y, de esta manera, se obtiene la fuerza de penetración en Newton (N). Sin embargo, presenta el inconveniente de que se trata de un método destructivo, por lo que únicamente se podrá aplicar

a un número limitado de manzanas, resultando imposible para la clasificación comercial de las mismas.

Se han investigado numerosos métodos alternativos de medida no destructivos para medir la firmeza de las frutas, como son los métodos mecánicos que incluyen la fuerza o deformación cuasiestática y dinámica, así como los métodos de impacto y sónicos (Delwiche et al., 1987; Meredith et al., 1990; Delwiche and Sarig, 1991; Zhang et al., 1994; Chen and Tjan, 1996; Galilli et al., 1998; Ozer et al., 1998; Stone et al., 1998; Sugiyama et al., 1998; McGlone et al., 1999; Ruiz-Altisent and Ortiz-Canavate, 2005). Dichos métodos podrían ser válidos a no ser por el hecho de que su relación con el método estándar (MT) no ha sido consistente para frutas firmes como las manzanas y que la industria es todavía muy reacia a aceptar estos métodos no destructivos como sustitutos del test de Magness-Taylor (MT) (Peng et al., 2006).

En los últimos años se han investigado dos técnicas que pueden resultar muy útiles para determinar la firmeza de las manzanas: la espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS) y la espectroscopía de reflectancia resuelta espacialmente (SRRS). La NIRS se puede emplear, además de para medir la firmeza, para determinar el contenido en Sólidos Solubles Totales y el contenido en materia seca (Nicolai et al., 2007; Ruiz-Altisent et al., 2010).

El método basado en la espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS) consiste en medir el poder de absorción de luz aparente de una muestra midiendo el patrón espectral de la luz transmitida a partir de una porción representativa de la pulpa. La firmeza de la fruta puede afectar al poder de absorción de la luz a través de cambios químicos asociados con la degradación de la pared celular, cambios físicos en la estructura intracelular y/o indirectamente a través de cambios correlacionados de absorción de pigmentos como la disminución de la clorofila en la maduración (Rowe et al., 2014). Algunos estudios han obtenido buenas correlaciones entre la NIRS y la técnica MT para la predicción de la firmeza de la fruta. (Lammertyn et al., 1998; McGlone et al., 2002; Mendoza et al., 2014; Penchaiya et al., 2009).

La espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS) se utiliza para la clasificación comercial de la fruta, pero no se suele emplear para la clasificación de la firmeza, puesto que hay otros métodos como los MSI (Sistemas de Imágenes Multiespectrales), que han mostrado un mayor rendimiento, así como otras ventajas en comparación con la NIRS (Sun et al., 2016). En este trabajo se va a aplicar una espectroscopía con haz láser de dos longitudes de onda (670 nm y 785 nm) para la determinación de la firmeza y el contenido en Sólidos Solubles Totales de las manzanas analizadas y su correlación con la firmeza obtenida con el test de Magness-Taylor y el refractómetro.

4. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.

En la actualidad, existe una creciente preocupación por mejorar la calidad de la fruta y evitar generar residuos biológicos, al conllevar pérdidas económicas y un impacto medioambiental.

La medida de la firmeza de las manzanas resulta fundamental para su clasificación en diversas categorías. No obstante, los métodos de medida tradicionales suponen un gran inconveniente al ser destructivos y ser imposible aplicar dichos métodos en todas las unidades. Existen diversas alternativas no destructivas que se encuentran en fase de desarrollo, aunque todavía se desconoce la validez de sus resultados.

Por esta razón, el principal objetivo de este proyecto es el de establecer una correlación, en caso de que exista, entre la medida de firmeza de manzanas realizada por métodos mecánicos y por métodos ópticos. Para conseguir dicho objetivo se analizarán manzanas de diferentes variedades presentes en el mercado (Golden Delicious, Fuji y Kanzi®). Al mismo tiempo, se plantean los siguientes objetivos intermedios:

- Conocer el funcionamiento de equipos de medida tales como el texturómetro, el penetrómetro, la cámara de visión monocromática, etc.
- Aprender a emplear software de análisis estadístico y de tratamiento digital de imagen como, por ejemplo, R, Matrox, Fiji o Matlab.
- Aprender a evaluar críticamente los resultados experimentales, así como extraer conclusiones.
- Perfeccionar la redacción de memorias científicas y su presentación.

5. METODOLOGÍA.

5.1. Introducción.

En este apartado se va a proceder con la explicación de la metodología empleada para la parte experimental, basándose en los equipos, materiales y programas informáticos que se van a utilizar durante el desarrollo del trabajo.

Cabe recordar que se emplearon tres variedades de manzanas, Golden Delicious, Fuji y Kanzi® con la finalidad de comparar la medida de la firmeza entre métodos destructivos y métodos no destructivos, a partir de la medida de la luz dispersada por la muestra al incidir sobre ella con dos haces láser en el rango de luz visible e infrarrojo cercano (Vis-NIR).

5.2. Material vegetal.

Para la realización de este trabajo se adquirieron 44 manzanas del supermercado de El Corte Inglés de las variedades Golden, Fuji y Kanzi® (véase ilustración 1), ya que interesaba hacer el experimento tanto con variedades de colores verdes amarillentos como rojos y ver si el color de la piel influenciaba de alguna manera los resultados en este tipo de test basado en luz.

Las frutas, una vez recolectadas, se conservan en atmósferas modificadas con una baja concentración de oxígeno y una alta concentración de dióxido de carbono para aumentar el tiempo de almacenamiento. Ello presenta el inconveniente de que, una vez se haya retirado la atmósfera, la fruta comenzará a respirar, lo cual aumentará su grado de maduración y disminuirá su vida útil. Por este motivo, se conservaron en la cámara frigorífica del laboratorio para alargar la vida útil de las mismas (Calle, 2018).

Nada más recibir las manzanas se procedió a identificarlas y todas ellas se analizaron durante dicha semana al ser la manzana un producto bastante perecedero, y para garantizar que todas ellas estuvieran en condiciones similares. Cada variedad se hizo en un día diferente, llevando a cabo, en primer lugar, el método no destructivo (Vis-NIR) y posteriormente, los métodos destructivos (penetrómetro y refractómetro) (Calle, 2018).



Ilustración 1: Variedades de manzanas empleadas para el experimento. De izquierda a derecha: Golden Delicious, Fuji y Kanzi®.

5.3. Equipos.

Durante la experimentación se emplearon diversos equipos o instrumentos, como son el penetrómetro, el refractómetro, el calibre o pie de rey, la balanza de precisión, así como la cámara monocromática CCD y las fuentes de luz láser.

5.3.1. Penetrómetro.

Durante la parte experimental se procedió a la medida de la firmeza de cada manzana en tres puntos situados a 120° respectivamente con un penetrómetro manual, muy característico por su facilidad de uso. El modelo del penetrómetro fue el Fruit Pressure Tester FT 327 de la empresa Facchini srl (véase ilustración 2). Las medidas fueron tomadas por la misma persona para asegurar una menor variabilidad en los resultados. Para efectuar la medida es necesario eliminar una parte de la epidermis de la



Ilustración 2: Penetrómetro manual junto con el pelador manual de acero inoxidable.

manzana mediante un pelador manual de acero inoxidable. Posteriormente, se procede a introducir el puntal de 8 mm de diámetro acoplado al instrumento hasta la muesca presente en el mismo. El equipo proporciona la medida de fuerza en kilogramos (kg).

5.3.2. Refractómetro.

El refractómetro es un instrumento de medida que determina el contenido en Sólidos Solubles Totales presentes en un zumo o una fruta (véase ilustración 3). Los sólidos solubles son principalmente azúcares. Como unidad de medida se considera el grado Brix, entendido como el porcentaje en peso de sacarosa disuelta en agua. Existen dos tipos de refractómetros: digital y manual analógico (Lafuente, 2015). En la práctica se empleó uno manual analógico.

En primer lugar se procedió a introducir el penetrómetro en la manzana y, seguidamente, se vertía una gota de líquido procedente de la manzana sobre la superficie de lectura del refractómetro. Al igual que con el penetrómetro, se tomaron tres medidas en lugares situados a 120° respectivamente uno de otro para cada manzana.



Ilustración 3: Refractómetro analógico de Abbe.

5.3.3. Calibre o Pie de Rey.

Al recibir las manzanas, se procedió a medir el diámetro y la altura de las mismas. Para ello, se empleó un calibre o pie de rey modelo Vernier Caliper serie 530, de la marca Mitutoyo, Illinois, Estados Unidos (véase ilustración 4).



Ilustración 4: Calibre o Pie de Rey.

5.3.4. Balanza de precisión.

Al igual que con el calibre, al recibir la muestra, se procedió a pesar las manzanas en una balanza del modelo Serie PCE-LS, de la empresa PCE Ibérica S.L. Instrumentación, Alicante, España (véase ilustración 5).



Ilustración 5: Balanza de precisión modelo Serie PCE-LS (PCE Ibérica S.L.).

5.4. Preparación de las muestras.

Antes de realizar las primeras mediciones en las manzanas (peso, altura y diámetro), se recibieron 44 manzanas¹, siendo 14 de la variedad Golden Delicious, 15 de la variedad Fuji y 15

¹ Dicha cantidad corresponde a una primera remesa. El objetivo era realizar más mediciones y disponer de una mayor muestra. No obstante, la situación creada por la COVID-19 impidió llevarlo a cabo.

de la variedad Kanzi®. Dichas manzanas se agruparon según su variedad y se identificaron realizando unas anotaciones con un rotulador permanente sobre la superficie de las mismas, tal y como se muestra en la ilustración 6. De esta manera, a las manzanas Golden Delicious se les designó con la letra G seguida de su número correspondiente, a las manzanas Fuji, con la letra F y a las Kanzi®, con la letra K.



Ilustración 6: Disposición e identificación de las manzanas para la toma de medidas.

Las medidas de las manzanas se llevaron a cabo a lo largo de cuatro días. El primer día se procedió a la identificación, peso y medida de altura y diámetro de las mismas. Posteriormente, se almacenaron en el frigorífico para evitar disminuir su vida útil y se retiraron durante un tiempo antes de realizar las medidas con los láseres con la finalidad de que se analizaran a temperatura ambiente. Las medidas con los láseres y el penetrómetro y refractómetro se realizaron midiendo una variedad de manzana por día.

5.5. Captura de imágenes.

Para determinar la firmeza y los SST de las manzanas por un método no destructivo se empleó la espectrofotometría de luz visible e infrarrojo cercano (Vis-NIR) con láseres de diodo de longitudes de onda 670 nm (emite dentro del espectro visible, rojo) y 785 nm (infrarrojo cercano) y una potencia de salida aproximada de 4 mW (véase ilustración 7). Las imágenes se tomaron a temperatura ambiente en ausencia de luz.

Para capturar las imágenes se empleó una cámara monocromática CCD (Charge Coupled Device, cuyo significado en español es Dispositivo de Carga Acoplado y consiste en un sensor con células fotoeléctricas que captan la imagen) modelo BASLER A310f, Alemania (véase ilustración 8). Las muestras se disponían en un dispositivo que permitía obtener un área de retrodifusión de hasta 12 mm de diámetro, con un ángulo de incidencia de 15° y una distancia al fruto de 14 cm. El tamaño de las imágenes era de 640 x 480 píxeles (Lafuente, 2015).

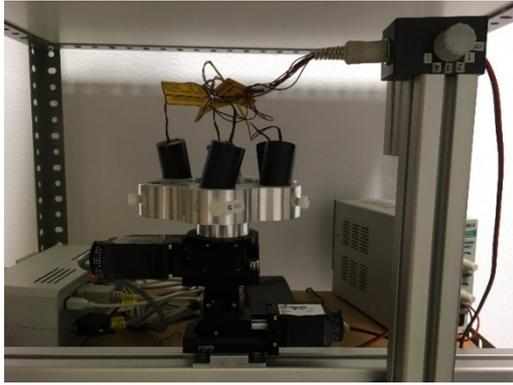


Ilustración 7: Fuentes de luz láser usadas para la medida (670 nm y 785 nm).



Ilustración 8: Cámara monocromática BASLER.

5.6. Software.

Los programas utilizados para el análisis digital de imágenes han sido Matrox 8.0 (Matrox Electronics Systems Ltd. Quebec, Canada) y Fiji, que se trata de un software de código abierto para el procesamiento de imágenes basado en ImageJ (la interfaz se muestra en la ilustración 9).

Matrox Inspector 8.0 es un programa informático comercial que ha sido creado para trabajar interactivamente con aplicaciones de captura, almacenamiento y procesamiento de imágenes. Matrox permite abrir imágenes en color o escala de grises en una variedad de formatos de archivo. Asimismo, es posible guardar las imágenes en un archivo, exportarse a otros programas, imprimirse o copiarse en el portapapeles (Calle, 2018).

Este programa ha sido empleado para capturar las imágenes procedentes de la cámara monocromática BASLER. El programa también presenta la posibilidad de realizar la extracción de datos de las imágenes. No obstante, para llevar a cabo dicha extracción se ha empleado el programa Fiji, debido a su mayor facilidad y potencia de procesamiento.

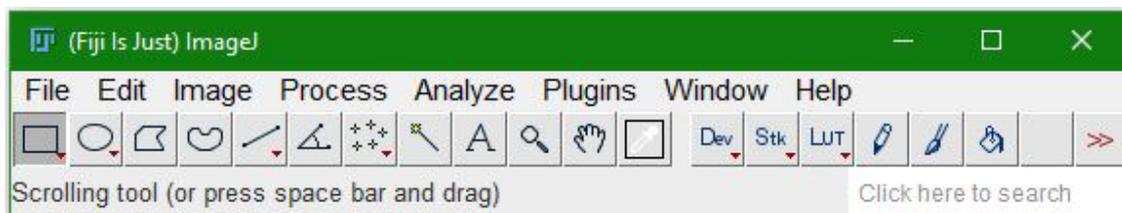


Ilustración 9: Interfaz del software Fiji.

Para la realización del análisis estadístico se ha empleado el programa Microsoft® Excel, puesto que incorpora la herramienta análisis de datos, que proporciona la posibilidad de aplicar una regresión lineal múltiple.

5.7. Obtención de datos a partir de las imágenes.

Una vez capturadas las imágenes con la cámara monocromática BASLER y el software Matrox Inspector 8.0, se va a proceder a extraer los datos contenidos en las mismas con la finalidad de llevar a cabo el análisis estadístico y extraer conclusiones.

El programa informático elegido para este fin es Fiji junto a su complemento específico para calcular círculos concéntricos denominado "Concentric circles.class"². Como parámetros, se ha establecido que el programa haga una medida de 100 círculos concéntricos, con un ancho de línea de 2 píxeles, la coordenada x sea de 320 píxeles, la coordenada y sea de 240 píxeles, el radio interior sea de 2 píxeles y el radio exterior sea de 230 píxeles. Dichos parámetros se muestran en la ilustración 10 y la imagen de los círculos concéntricos se observa en la ilustración 11.

El programa proporciona los resultados del radio del círculo concéntrico, el número de muestras necesarias para hacer el promedio y la media aritmética. Dado que existen diferencias considerables entre los distintos radios, en los más externos, tomará muchas más muestras que en los más internos.

Al representar un gráfico de los resultados anteriores con el programa, estableciendo el radio en el eje x y la media aritmética en el eje y, como resultado se obtiene que el radio central (0) es el punto donde hay más intensidad de luz láser, mientras que, conforme se aleja hacia el exterior, la intensidad de luz va disminuyendo. El gráfico obtenido es posible ajustarlo a una distribución de Lorentz. Dicho gráfico ajusta los datos, mediante cuatro parámetros (a , b , c y d), a la distribución lorentziana (véase gráfica 3), y da el número de minimizaciones completadas, la suma de residuos al cuadrado, la desviación estándar y el coeficiente de correlación (R^2). A continuación se muestra la ecuación que ajusta la curva representada en el gráfico:

$$y = d + \frac{a - d}{1 + \left(\frac{x}{c}\right)^b}$$

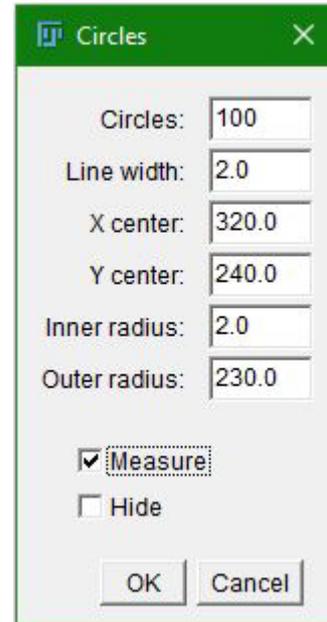


Ilustración 10: Captura de los parámetros establecidos en el complemento "Concentric circles".

² Dicho plugin debe descargarse aparte, ya que no forma parte de los plugins de serie de Fiji. La página web donde está disponible es: <https://imagej.nih.gov/ij/plugins/concentric-circles.html>

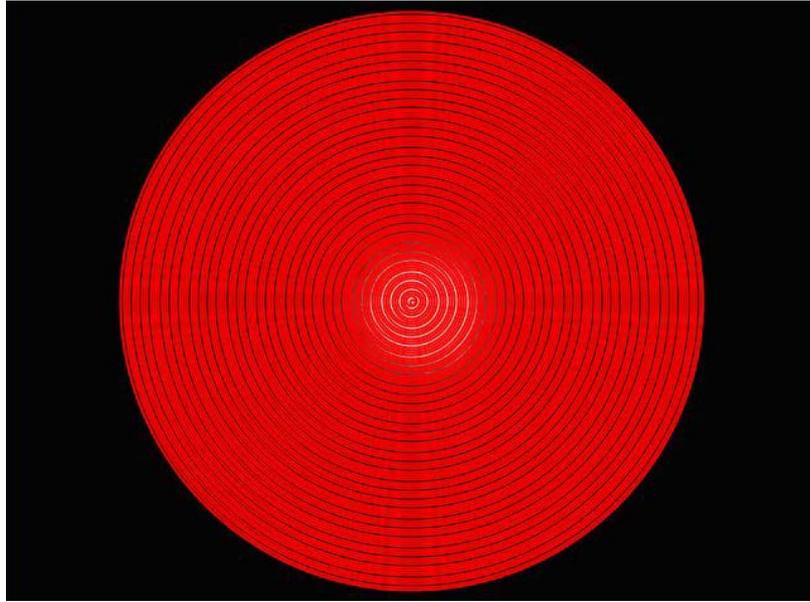
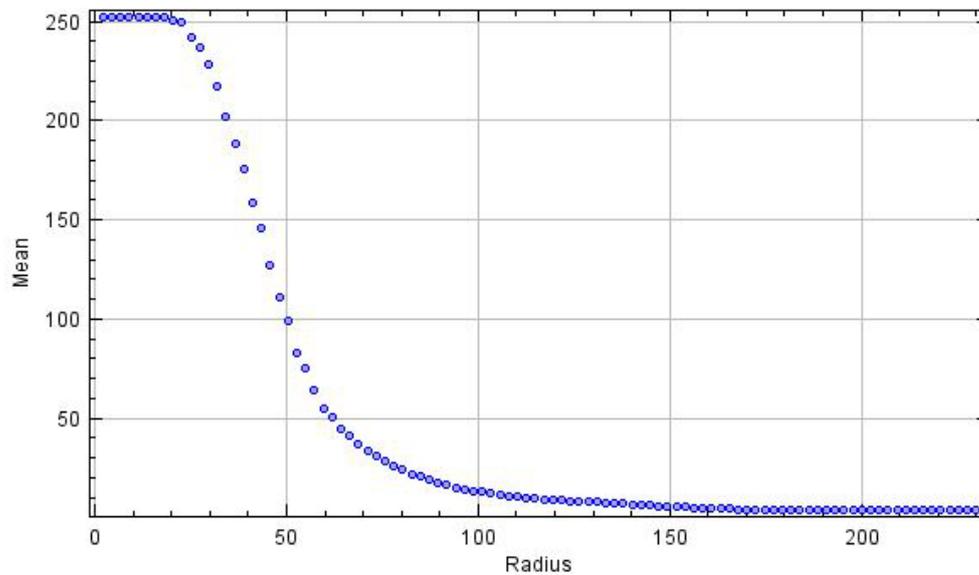


Ilustración 11: Círculos concéntricos.



Gráfica 3: Ajuste a una distribución de Lorentz.

El método anterior se emplearía para extraer los datos contenidos en una imagen de forma individual. No obstante, dado que hay un total de 132 imágenes, el procedimiento sería largo y tedioso.

Por este motivo, se ha diseñado un script o código específico³. De esta manera, una vez ejecutado el script, el programa Fiji procede a calcular los distintos parámetros de ajuste (a , b , c y d), así como el coeficiente de determinación (R^2) de todas las muestras seleccionadas en el

³ Dicho script ha sido diseñado según el lenguaje para macros específico de ImageJ. El script se detalla en el Anexo 4.

mismo que contengan la extensión .jpg. En el script se introdujo que capture los círculos concéntricos desde 2 hasta 230 píxeles. El archivo se exporta en formato .txt para que luego se pueda trabajar importándolo con Microsoft® Excel.

Debido a la curvatura de la superficie de la manzana, la reflectancia (I_C) capturada por la cámara subestima la intensidad de luz aparente en la superficie de la manzana, que debería ser igual a I_R . La relación entre I_C e I_R viene determinada por la ley de Lambert. De esta manera, la reflectancia aparente (I_R) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_R = \frac{I_C}{\cos\varphi} = \frac{I_C R}{\sqrt{R^2 - d^2}}$$

Donde R es el radio de la posición medida en la superficie de la manzana, d es la distancia máxima entre el borde y el centro del perfil de dispersión de la luz y φ es el ángulo de la posición medida en la superficie de la manzana, teniendo en cuenta un ángulo de desviación de 15° (Askoura et al., 2016).

La ley de Lambert puede aplicarse para recalcularse las intensidades capturadas por la cámara monocromática para cada posición en la superficie de la manzana. Este procedimiento es posible realizarlo con el programa Fiji. En el script se introdujo el diámetro promedio para cada variedad de manzana (37,75 mm para Golden Delicious, 38,92 mm para Fuji y 38,82 mm para Kanzi®). Por otro lado, se introdujo el tamaño de la imagen estimado (252 es el escalado, s es el radio de cada manzana y 36 corresponde a la distancia entre el borde y el centro del perfil de dispersión de la luz elevada al cuadrado).

Como se ha mencionado anteriormente, aplicando el complemento “Concentric circles” a la imagen se obtiene un ajuste a una distribución de Lorentz. Sin embargo, en el script se ha establecido una distribución Lorentziana modificada (MLD-4) propuesta por Peng y Lu (2006a, 2006b), que contiene cuatro parámetros para describir los perfiles de dispersión completos, incluyendo la zona de saturación, de las imágenes de dispersión espectral adquiridas:

$$R = a + \frac{b}{1 + \left(\frac{x}{c}\right)^d}$$

Donde R es la intensidad de luz media de cada radio de banda circular, x es la distancia de dispersión (mm), a es el valor asintótico de la intensidad de la luz, b es el valor máximo de intensidad de luz estimada en el punto de incidencia de la luz, c es el ancho de dispersión completo a la mitad del valor máximo (“full scattering width at half maximal value”, FWHM) y d es la pendiente alrededor del área FWHM (Peng y Lu, 2006a, 2006b).

Como alternativa a las distintas funciones de Lorentz modificadas, Peng y Lu (2007) proponen la función de Gompertz modificada (MGF) con tres parámetros. Asimismo, la función MGF con cuatro parámetros permite predecir el contenido en Sólidos Solubles Totales en la fruta. En este estudio, los mejores valores se obtuvieron aplicando la distribución de Lorentz modificada con cuatro parámetros y, por ese motivo fue empleada. A continuación se muestran las dos funciones de Gompertz modificadas propuestas por Peng y Lu (2007):

Función de Gompertz modificada con tres parámetros (MGF-3):

$$R = 1 - (1 - \alpha)e^{-\exp(\varepsilon - \delta x)}$$

Función de Gompertz modificada con cuatro parámetros (MGF-4):

$$R = \alpha + \beta (1 - e^{-\exp(\varepsilon - \delta x)})$$

Para ambos casos, α es el valor asintótico de la intensidad de la luz, β está relacionado con el valor superior de la intensidad de luz estimada en el punto de incidencia de la luz, ε es el ancho de dispersión completo en el punto de inflexión y δ es la pendiente alrededor del punto de inflexión (Peng y Lu, 2007).

5.8. Análisis estadístico.

Finalmente, el tratamiento estadístico fue desarrollado mediante Microsoft® Excel. Se representó una tabla con los valores obtenidos en los métodos no destructivos (penetrómetro y refractómetro) frente a los obtenidos con Fiji usando las medidas realizadas con el láser a una longitud de onda de 670 y 785 nm. Cabe mencionar que se representaron todos los valores tomados en cada manzana, así como sus correspondientes medias aritméticas, puesto que se realizaron tres medidas por cada manzana.

A pesar de la no linealidad de la distribución de Lorentz modificada, su estimación se lleva a cabo a través de una función de regresión lineal múltiple, que se encuentra en la herramienta de análisis de datos, incluida en el propio programa. En este último paso se estableció como eje y los kilogramos o los grados Brix y como eje x las medidas tomadas con el láser a ambas longitudes de onda. De esta manera se consigue ajustar los datos a una función que es lineal en todos los parámetros. También se seleccionó la opción de representar los residuos y el nivel de confianza se mantuvo en el 95%, tal y como se encontraba inicialmente en el programa. Todo ello se refleja en la ilustración 12.

Como resultados, se toman el coeficiente de determinación ajustado, el valor crítico de F del análisis de la varianza, los p -valores y límites de los intervalos de confianza asociados a cada coeficiente de la regresión, los cuales se explicarán con detalle posteriormente.

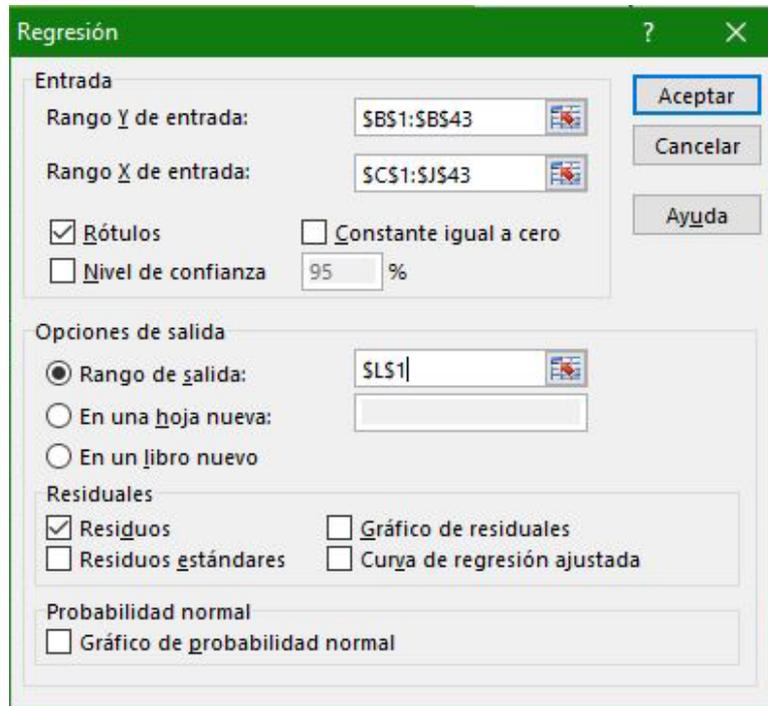


Ilustración 12: Interfaz de la función regresión en el complemento análisis de datos de Microsoft® Excel junto con los parámetros establecidos.

En el apartado de análisis de los residuos, Microsoft® Excel proporciona una serie de valores pronosticados a partir de los datos medidos con el penetrómetro o refractómetro y con el láser a ambas longitudes de onda. Dichos valores estimados se representaron frente a los valores reales obtenidos mediante el penetrómetro o refractómetro dando lugar a una nube de puntos, de la cual fue posible obtener la ecuación de su recta de regresión lineal, así como el valor del coeficiente de determinación (R^2). Los resultados obtenidos se encuentran en el apartado siguiente.

Para clarificar el análisis numérico, recordemos que una regresión consiste en deducir a partir de un conjunto de observaciones, una relación funcional entre una variable dependiente (y) y una serie de variables consideradas como independientes (x_1, x_2, \dots, x_n). El modo más sencillo y habitualmente empleado es suponer la existencia de una relación lineal entre las variables:

$$y = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_nx_n$$

Donde los $a_i, i=1, \dots, n$, son los coeficientes asociados a las variables independientes y a_0 es la intercepción. En este caso, y hace referencia a los kg o °Brix medidos de forma manual, x_1 es el valor asintótico de la intensidad de la lux, x_2 es el valor máximo de intensidad de luz estimada

en el punto de incidencia de la luz, x_3 es el ancho de dispersión completo a la mitad del valor máximo (FWHM) y x_4 es la pendiente alrededor del área FWHM.

A la hora de evaluar el poder explicativo del modelo estimado se utilizan diversos indicadores, algunos de los cuales se detallan a continuación.

El coeficiente de determinación (R^2) es la proporción de la varianza de la variable dependiente explicada por la influencia lineal de la variable independiente. Su fórmula sería la siguiente:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Donde $\sum_{i=1}^n e_i^2$ representa el sumatorio de los residuos al cuadrado, siendo cada residuo la diferencia entre los valores estimado y observado de la variable dependiente y $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ denota el sumatorio de las desviaciones de la variable dependiente respecto de la media al cuadrado (Johnston, 1983).

El coeficiente de determinación no disminuye cuando se añaden a la regresión variables explicativas adicionales, por lo que podría alcanzar un valor próximo a la unidad mediante la inclusión de nuevas variables, aunque ello no significaría que el poder explicativo del modelo estimado fuese mejor. Por ello, es conveniente calcular el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado), que adopta la siguiente fórmula:

$$\bar{R}^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-k} \right) (1 - R^2)$$

Donde \bar{R}^2 es el coeficiente de determinación ajustado, R^2 es el coeficiente de determinación, n es el número de observaciones de la muestra y k es el número de variables independientes.

El coeficiente de determinación ajustado puede tomar valores positivos o negativos. Cuanto más cercano sea a 1, mejores son las estimaciones. Un valor negativo puede deberse a que el número de variables independientes sea muy cercano al tamaño de la muestra, o bien a que el coeficiente de correlación (R^2) sea muy bajo (Johnston, 1983).

Otra medida de la bondad del ajuste la proporciona el parámetro estadístico F , el cual indica si el modelo estimado explica el comportamiento de la variable dependiente dado un determinado nivel de confianza (normalmente el 95%).

Finalmente, es necesario deducir el poder explicativo de cada uno de los coeficientes y del término constante de la regresión. Para ello se calculan los p-valores asociados a cada uno de dichos elementos para un determinado nivel de confianza (95%) (Zaiontz, 2020).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este apartado se va a proceder a mostrar los resultados obtenidos durante la realización de este trabajo. Se muestran divididos en cuatro apartados: comparativa de todas las medidas entre penetrómetro y método Vis-NIR, comparativa de las medias aritméticas entre penetrómetro y método Vis-NIR, comparativa de todas las medidas entre refractómetro y método Vis-NIR y comparativa de las medias aritméticas entre refractómetro y método Vis-NIR.

En el apartado de anexos se muestran todas las medidas y resultados obtenidos durante la elaboración de este trabajo. En el anexo 1 se incorporan las medidas tomadas mediante los métodos destructivos durante la fase experimental. En el anexo 2 se encuentran las medidas de retrodifusión por láser. Finalmente, el anexo 3 contiene los resultados adquiridos durante el análisis estadístico. Un resumen de los resultados se muestra en las tablas 13 y 14.

6.1. Comparativa de las medidas de firmeza obtenidas con el penetrómetro y el método Vis-NIR.

Tras aplicar la herramienta de regresión lineal múltiple, en la cual se estableció como eje x a las medidas obtenidas con el penetrómetro y como eje y a las medidas obtenidas con el rayo láser, los resultados proporcionados por Microsoft® Excel se muestran a continuación:

Para las manzanas Golden Delicious los indicadores de la regresión fueron los siguientes:

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,660033889
Coefficiente de determinación R^2	0,435644735
R^2 ajustado	0,298831337
Error típico	0,258918066
Observaciones	42

Tabla 1: Indicadores de la regresión para Golden Delicious.

A la vista de la tabla 1, como coeficiente de determinación ajustado se obtiene un valor aproximado a 0,3, por lo que se podría considerar que hay cierta correlación entre ambos métodos de medida, aunque no sea un valor muy convincente.

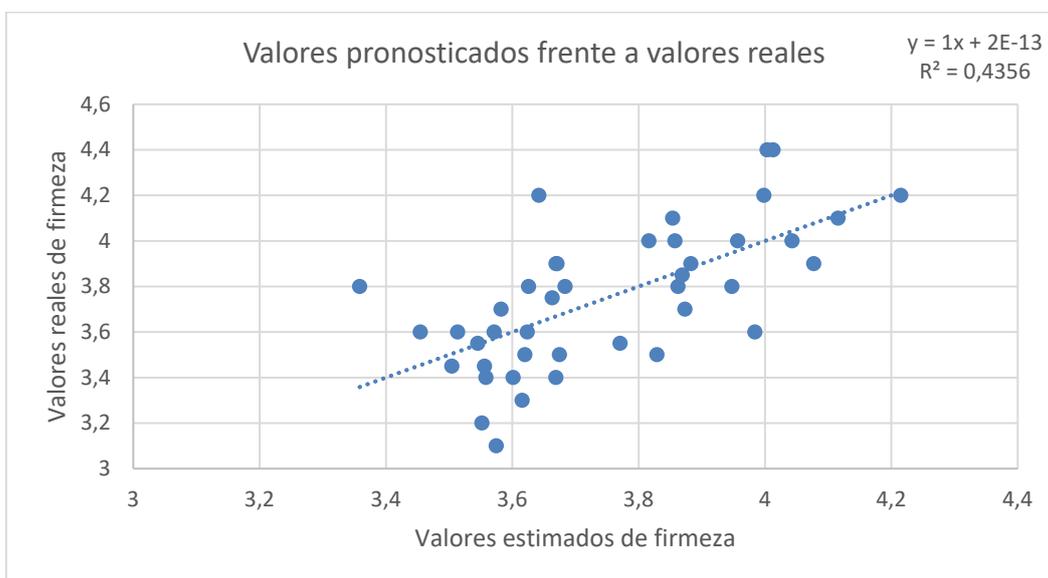
Dentro del análisis de varianza se ha obtenido un valor crítico de F de 0,008686333, el cual es inferior a 0,05 y da a entender que se trata de una correlación significativa de forma global⁴.

De forma específica, la herramienta proporciona los resultados desglosados por los coeficientes de a , b , c y d a ambas longitudes de onda, así como la intercepción de tales valores. La

⁴ Los resultados estadísticos de la regresión se encuentran en el anexo A.3.1.

intercepción presenta un p-valor de 0,008939535, por lo que sería significativo siguiendo el procedimiento anterior. De forma más concreta, se ha obtenido que los valores de b y c para una longitud de onda de 785 nm son los únicos que muestran una correlación significativa con unos valores de 0,016582646 y 0,015360669, respectivamente. Asimismo, teniendo en cuenta los límites inferior y superior dentro del intervalo de confianza al 95%, los valores de la intercepción y los parámetros b y c para una longitud de onda de 785 nm muestran una correlación significativa al encontrarse tanto el límite inferior como el superior en el mismo eje (positivo o negativo).

Microsoft® Excel proporciona unos valores pronosticados de la firmeza de las manzanas teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la regresión múltiple. A partir de tales datos se elaboró la gráfica 4, representando los valores pronosticados de la firmeza en el eje x y los valores reales, obtenidos con el penetrómetro, en el eje y.



Gráfica 4: Valores estimados frente a valores reales para Golden Delicious.

Los valores representados en la nube de puntos se ajustaron a una regresión lineal obteniendo una ecuación con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,4356, por lo que resulta un ajuste bastante adecuado teniendo en cuenta que el tamaño muestral era de 42 unidades.

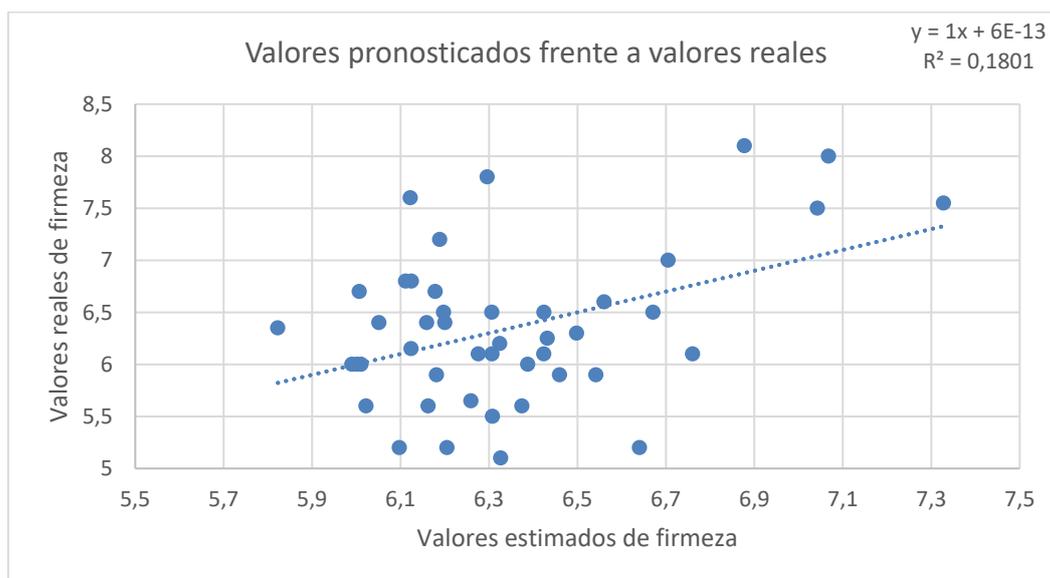
Para las manzanas Fuji los indicadores de la regresión fueron los siguientes:

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,424335272
Coefficiente de determinación R^2	0,180060423
R^2 ajustado	-0,002148372
Error típico	0,739636168
Observaciones	45

Tabla 2: Indicadores de la regresión para Fuji.

Como coeficiente de determinación ajustado se obtiene un valor negativo, por lo que no se puede considerar que haya correlación entre ambos parámetros, tal y como se muestra en la tabla 2.

Teniendo en cuenta el análisis de varianza, el valor crítico de F es de 0,461301947, por lo que no se puede considerar significativo, al igual que los resultados obtenidos en los p-valores y los intervalos de confianza.



Gráfica 5: Valores estimados frente a valores reales para Fuji.

Los valores pronosticados durante el análisis estadístico se representan en la gráfica 5. Los valores obtenidos se han ajustado a una regresión lineal y se ha obtenido una ecuación con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,1801, por lo que indica ausencia de correlación entre los parámetros representados.

Para las manzanas Kanzi[®] los indicadores de la regresión fueron:

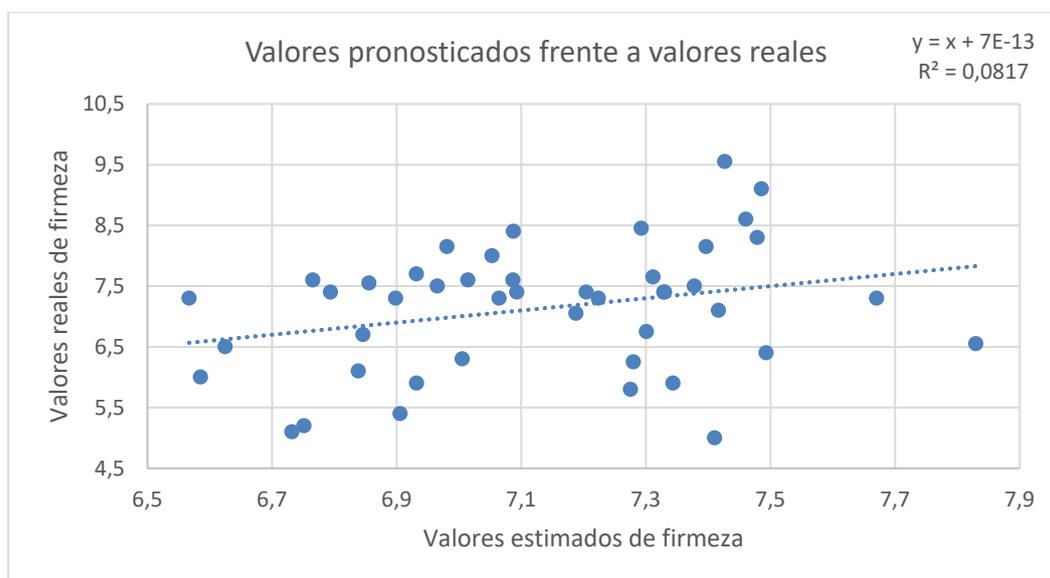
Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,285857852
Coefficiente de determinación R^2	0,081714712
R^2 ajustado	-0,122348686
Error típico	1,097855312
Observaciones	45

Tabla 3: Indicadores de la regresión para Kanzi[®].

Los resultados del análisis de las manzanas de la variedad Kanzi[®] quedan reflejados en la tabla 3. Se obtiene un coeficiente de determinación ajustado negativo, por lo que no se puede considerar que haya correlación entre la firmeza medida con el penetrómetro y la firmeza determinada con el método no destructivo.

De acuerdo al análisis de varianza, el valor crítico de F es de 0,91289395, por lo que no es significativo. Al igual que con las manzanas Fuji, el resto de resultados no son significativos ni en cuanto a p -valores ni en relación al intervalo de confianza.

Los valores pronosticados por el programa se han representado en la gráfica 6.



Gráfica 6: Valores estimados frente a valores reales para Kanzi®.

Tras ajustar los valores a una regresión lineal se ha obtenido un coeficiente de determinación (R^2) de 0,0817, por lo que no existe correlación entre los valores pronosticados y los reales.

6.2. Comparativa de las medias aritméticas de firmeza obtenidas con penetrómetro y el método Vis-NIR.

Con la finalidad de optimizar los resultados, con anterioridad a la aplicación de la herramienta de regresión múltiple, se procedió a realizar la media aritmética de los tres valores medidos por cada manzana. Posteriormente se llevó a cabo la regresión lineal múltiple, cuyos resultados se analizan en este apartado.

Para las manzanas Golden Delicious los indicadores de la regresión resultaron:

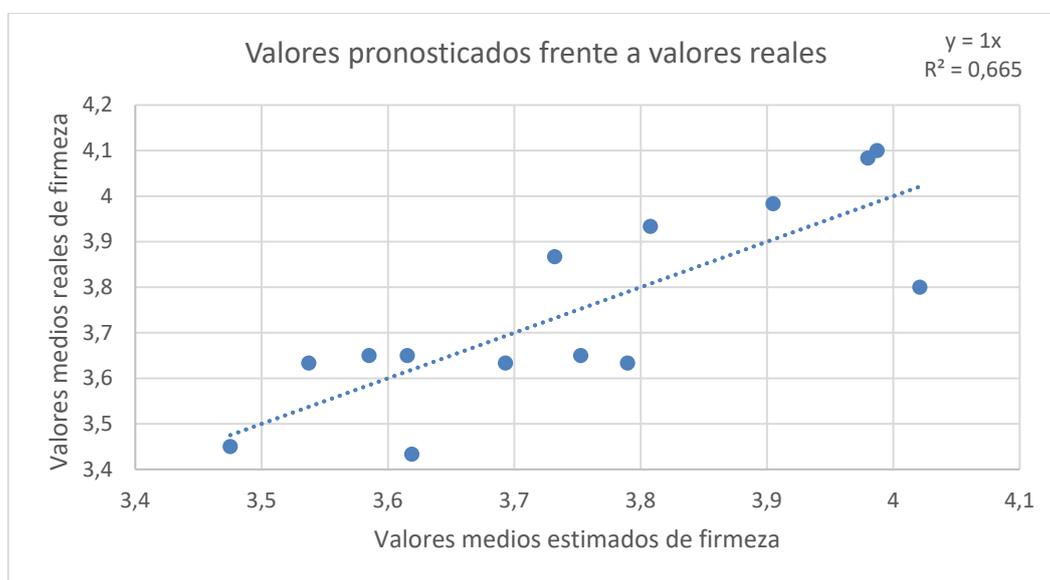
Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,815479528
Coeficiente de determinación R^2	0,665006861
R^2 ajustado	0,129017838
Error típico	0,200311592
Observaciones	14

Tabla 4: Indicadores de la regresión en valores medios para Golden Delicious.

En comparación con los resultados obtenidos en el apartado anterior, el coeficiente de determinación ajustado muestra un valor más cercano a 0, por lo que el hecho de haber calculado las medias aritméticas de las diferentes medidas realizadas en cada manzana no ha mejorado los resultados (véase la tabla 4).

Teniendo en cuenta el análisis de varianza, el valor crítico de F presenta un valor de 0,42395518, por lo que no es significativo. Asimismo, ningún resultado obtenido en los p-valores ni en los intervalos de confianza mostró una correlación significativa. Ello puede ser debido a que el tamaño muestral se ha visto reducido considerablemente⁵.

No obstante, al comparar los valores pronosticados frente a los reales, tal y como se muestra en la gráfica 7, se ha obtenido un resultado favorable al contar con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,665.



Gráfica 7: Valores medios estimados frente a valores reales para Golden Delicious.

Para las manzanas Fuji los indicadores de la regresión resultaron:

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,700316823
Coeficiente de determinación R^2	0,490443653
R^2 ajustado	-0,188964811
Error típico	0,701849809
Observaciones	15

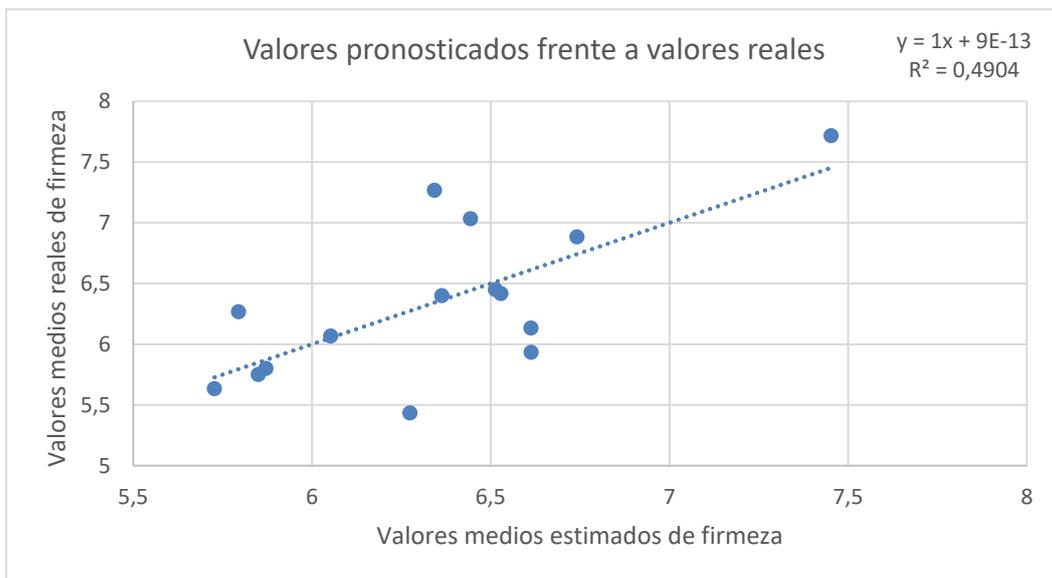
Tabla 5: Indicadores de la regresión en valores medios para Fuji.

Como se deduce de la tabla 5, al igual que con los resultados obtenidos sin realizar el promedio, las manzanas Fuji no muestran correlación entre las medidas obtenidas con el penetrómetro y

⁵ Los resultados estadísticos de la regresión se encuentran en el anexo A.3.2.

el rayo láser, puesto que su coeficiente de determinación ajustado es de -0,189. Asimismo, su análisis de varianza muestra un valor crítico de F de 0,673992619 y el resto de parámetros analizados no revelan resultados significativos ni en cuanto a p-valores ni en cuanto al intervalo de confianza al 95%.

Sin embargo, al representar los valores pronosticados por el programa frente a los valores obtenidos por el penetrómetro en la gráfica 8, se obtiene una mejoría en los resultados finales, puesto que su coeficiente de determinación (R^2) es de 0,4904. En este caso, el empleo de medias aritméticas para las manzanas Fuji también mejora sus resultados.



Gráfica 8: Valores medios estimados frente a valores reales para Fuji.

Para las manzanas Kanzi® los indicadores de la regresión lineal resultaron:

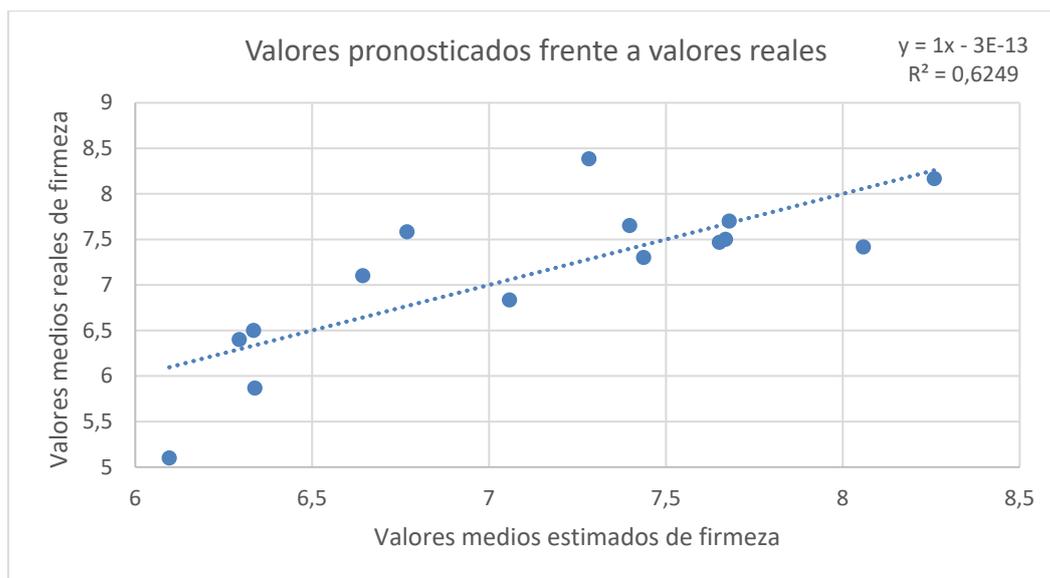
Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,790537657
Coefficiente de determinación R^2	0,624949787
R^2 ajustado	0,124882836
Error típico	0,811813981
Observaciones	15

Tabla 6: Indicadores de la regresión en valores medios para Kanzi®.

En el caso de las manzanas Kanzi®, el hecho de haber contado con las medias aritméticas para aplicar la regresión lineal múltiple mejora significativamente los resultados al obtener un coeficiente de determinación ajustado aproximado a 0,12. No obstante, dicho valor sigue sin ser suficiente para afirmar que existe correlación (véase la tabla 6).

Además, el análisis de varianza proporciona un valor crítico de F de 0,40405699 y el resto de parámetros analizados siguen sin mostrar resultados significativos ni en cuanto a p-valores ni en relación al intervalo de confianza al 95%.

Al representar los valores pronosticados por Microsoft® Excel frente a los valores obtenidos con el penetrómetro en la gráfica 9 se obtienen unos resultados muy favorables, al contar con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,6249.



Gráfica 9: Valores medios estimados frente a valores reales para Kanzi®.

6.3. Comparativa de las medidas de SST obtenidas con refractómetro y el método Vis-NIR.

A continuación se va a proceder a comentar los resultados obtenidos en cuanto a la determinación de los Sólidos Solubles Totales medidos con el refractómetro y mediante espectroscopía Vis-NIR.

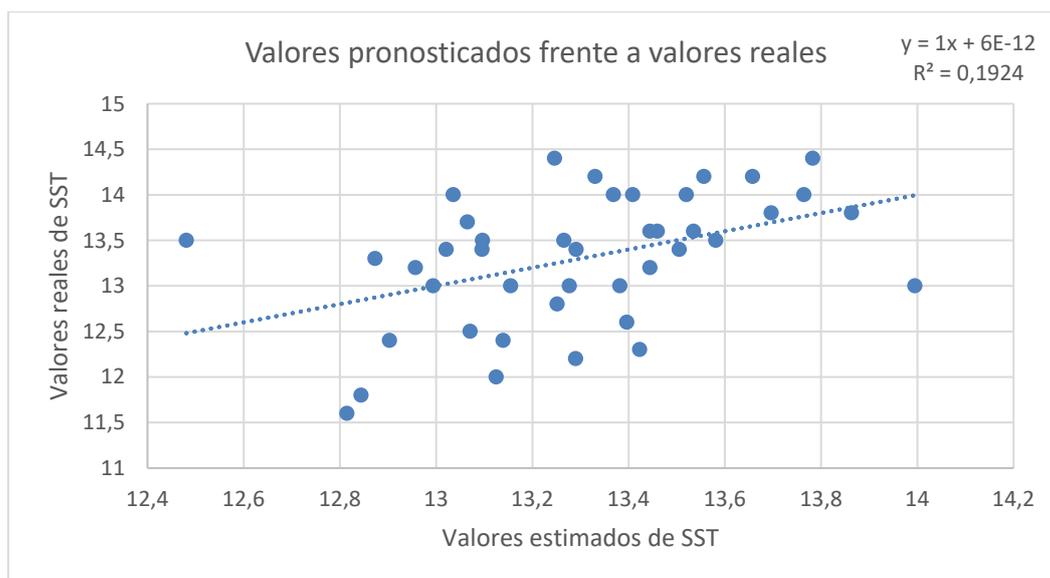
Para las manzanas Golden Delicious los indicadores de la regresión lineal resultaron:

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,438648603
Coefficiente de determinación R^2	0,192412597
R^2 ajustado	-0,003366168
Error típico	0,715840491
Observaciones	42

Tabla 7: Indicadores de la regresión para Golden Delicious.

Como se observa en la tabla 7, al contrario que ocurre con la firmeza, las manzanas Golden Delicious no muestran correlación en relación a los Sólidos Solubles Totales, con un coeficiente de determinación ajustado negativo. Asimismo se obtiene un valor crítico de F de 0,466649203. El resto de parámetros estudiados en el análisis de varianza no demuestran ser significativos ni en los p-valores ni en los intervalos de confianza⁶.

Los valores pronosticados por el programa han mostrado unos resultados poco favorables, siendo su coeficiente de determinación (R^2) de 0,1924. Ello queda reflejado en la gráfica 10.



Gráfica 10: Valores estimados frente a valores reales para Golden Delicious.

Para las manzanas Fuji los indicadores de la regresión resultaron:

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,6261165
Coefficiente de determinación R^2	0,392021871
R^2 ajustado	0,25691562
Error típico	0,942322037
Observaciones	45

Tabla 8: Indicadores de la regresión para Fuji.

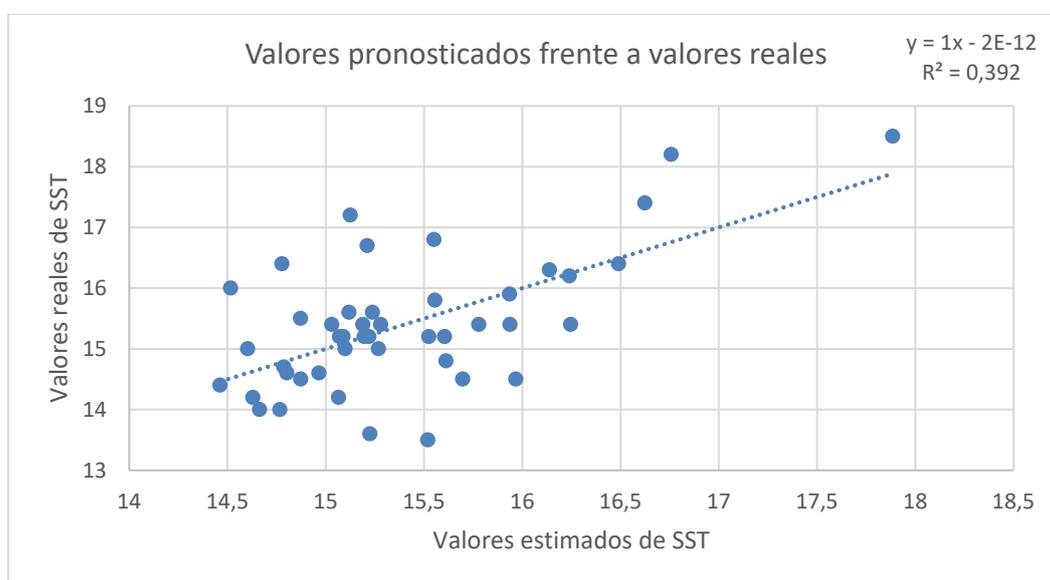
A diferencia de las manzanas Golden Delicious, las manzanas de la variedad Fuji muestran unos resultados bastante mejores en cuanto a los Sólidos Solubles Totales, mostrando un coeficiente de determinación ajustado aproximado de 0,26, por lo que se podría decir que existe cierta correlación (véase la tabla 8).

Dentro del análisis de varianza, los p-valores y los intervalos de confianza al 95% de los coeficientes analizados no muestran ser significativos. No obstante, de forma global, el valor

⁶ Los resultados estadísticos de la regresión se encuentran en el anexo A.3.3.

crítico de F es de 0,013270613, por lo que podría decirse que se trata de una correlación significativa.

De la gráfica 11 se deduce que los valores pronosticados son bastante aceptables al realizar el ajuste a una recta de regresión lineal con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,392.



Gráfica 11: Valores estimados frente a valores reales para Fuji.

Para las manzanas Kanzi® los indicadores de la regresión resultaron:

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,704891544
Coefficiente de determinación R^2	0,496872089
R^2 ajustado	0,385065886
Error típico	0,598448087
Observaciones	45

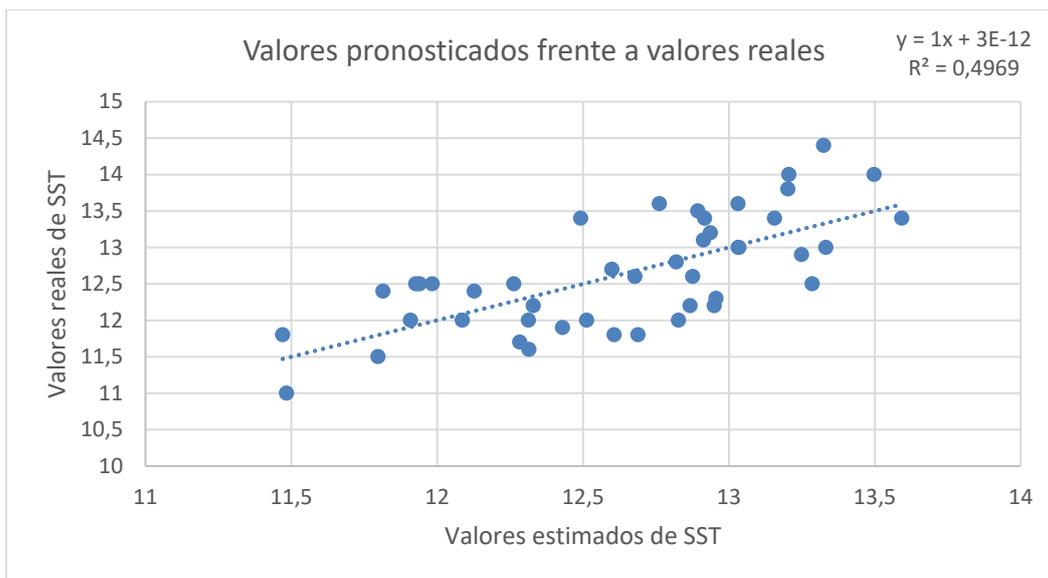
Tabla 9: Indicadores de la regresión para Kanzi®.

Al igual que ocurre con las manzanas de la variedad Fuji y de acuerdo con la tabla 9, las de la variedad Kanzi® también muestran unos mejores resultados en cuanto al análisis de Sólidos Solubles Totales. Su coeficiente de determinación ajustado es cercano a 0,4, por lo que hay cierta correlación entre el método no destructivo y el método convencional. No obstante, como se puede observar, el coeficiente de determinación ajustado tiene un valor bastante cercano al del coeficiente de determinación no ajustado. Ello podría indicar que existe un error de especificación debido a la inclusión de alguna variable irrelevante (“overfitting regression model”) (Minitab, LLC., 2020).

Estudiando el análisis de varianza se obtiene un valor crítico de F de 0,000819444, por lo que es claramente significativo. De forma concreta, los p-valores que hacen referencia a parámetros de

la ecuación de Lorentz modificada en cuanto a una longitud de onda de 785 nm son los siguientes: a (0,019936528), c (0,000729098) y d (0,021729484), por lo que dicha correlación puede ser considerada significativa. Sus respectivos resultados en cuanto al intervalo de confianza al 95% también lo corroboran.

Los valores pronosticados también muestran una buena correlación al contar con un coeficiente de determinación de 0,4969, obtenido al ajustar los datos de la gráfica a una recta de regresión lineal. Como ilustración se adjunta la gráfica 12.



Gráfica 12: Valores estimados frente a valores reales para Kanzi®.

6.4. Comparativa de las medias aritméticas de SST obtenidas con refractómetro y el método Vis-NIR.

Para manzanas Golden Delicious los indicadores de la regresión resultaron:

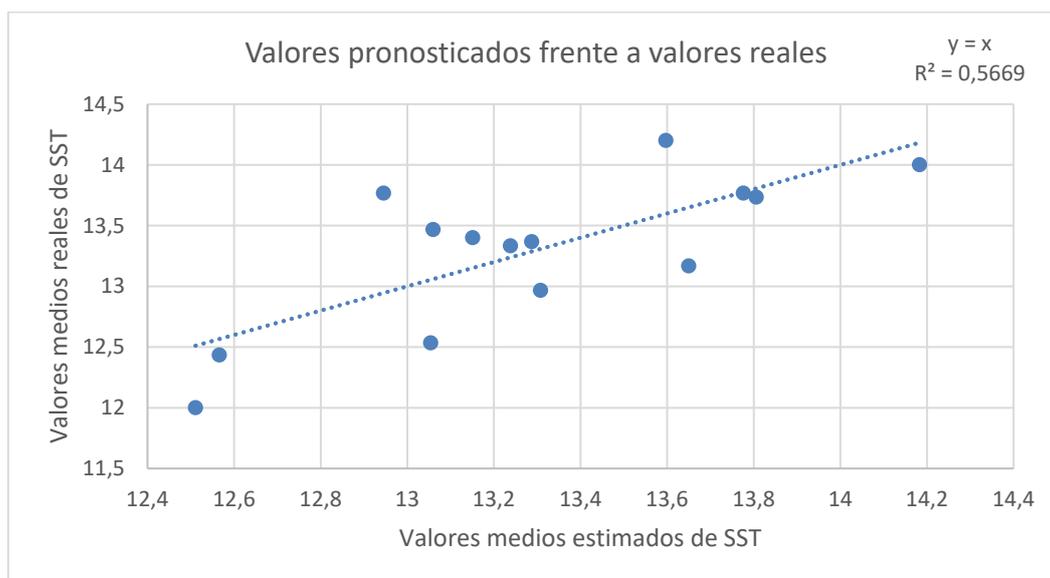
Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,752902935
Coefficiente de determinación R^2	0,56686283
R^2 ajustado	-0,126156643
Error típico	0,666250683
Observaciones	14

Tabla 10: Indicadores de la regresión en valores medios para Golden Delicious.

Las manzanas Golden Delicious presentan un peor coeficiente de determinación ajustado al efectuar la regresión lineal múltiple con las medias aritméticas (véase la tabla 10). Asimismo, de forma global, en el análisis de varianza se obtiene un valor crítico de F de 0,61962046, por lo que

no demuestra ser significativo, al igual que los demás coeficientes analizados de forma específica⁷.

A pesar de lo mencionado en el párrafo anterior, los valores pronosticados son bastante buenos si se comparan con los reales, puesto que, después de ajustar los valores a una recta de regresión lineal, se obtiene un coeficiente de determinación (R^2) de 0,5669. El resultado se muestra en la gráfica 13.



Gráfica 13: Valores medios estimados frente a valores reales para Golden Delicious.

Para las manzanas Fuji los indicadores de la regresión resultaron:

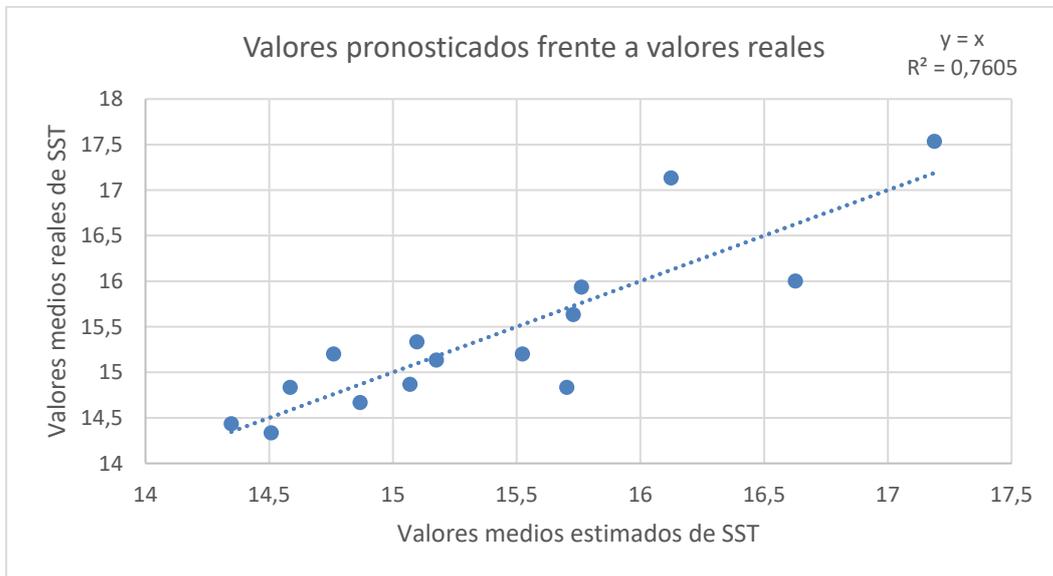
Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,872075463
Coefficiente de determinación R^2	0,760515613
R^2 ajustado	0,441203096
Error típico	0,690527478
Observaciones	15

Tabla 11: Indicadores de la regresión en valores medios para Fuji.

A la luz de la tabla 11, la correlación entre los valores medios obtenidos mediante el refractómetro y el rayo láser para las manzanas Fuji es bastante buena, con un coeficiente de determinación ajustado de 0,44. No obstante, el análisis de varianza muestra un valor crítico de F de 0,153153865 y el resto de parámetros estudiados no muestran ser significativos.

⁷ Los resultados estadísticos de la regresión se encuentran en el anexo A.3.4.

Tal y como se aprecia en la gráfica 14, la relación entre los valores pronosticados por Microsoft® Excel muestra un buen resultado a pesar de contar en este caso con 15 muestras analizadas. Su coeficiente de determinación (R^2) es de 0,7605.



Gráfica 14: Valores medios estimados frente a valores reales para Fuji.

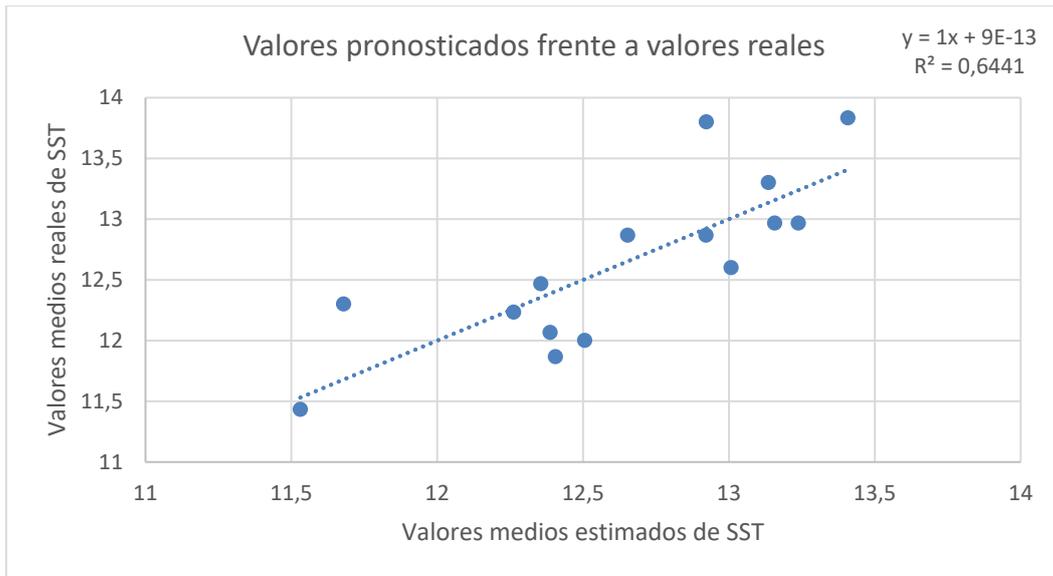
Para las manzanas Kanzi® los indicadores de la regresión resultaron:

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,802564738
Coefficiente de determinación R^2	0,644110158
R^2 ajustado	0,169590369
Error típico	0,626931403
Observaciones	15

Tabla 12: Indicadores de la regresión en valores medios para Kanzi®.

Por último, para las manzanas Kanzi® se ha obtenido un coeficiente de determinación ajustado de aproximadamente 0,17, por lo que no hay gran correlación entre ambos parámetros (véase la tabla 12). Su análisis de varianza muestra un valor crítico de F de 0,3648404, por lo que no es significativa. El resto de parámetros analizados tampoco son significativos ni en relación a los p -valores ni en cuanto al intervalo de confianza.

A pesar de lo anterior, después de haber representado los valores pronosticados en el eje x frente a los reales en el eje y , y haber ajustado dichos valores a una recta de regresión lineal, se ha obtenido un coeficiente de determinación (R^2) de 0,6441, por lo que muestra bastante correlación entre ambos. Dicha representación se muestra en la gráfica 15:



Gráfica 15: Valores medios estimados frente a valores reales para Kanzi®.

Seguidamente, las tablas 13 y 14 muestran el resumen de todos los resultados estadísticos.

FIRMEZA							
		TODAS LAS MEDIDAS			MEDIAS ARITMÉTICAS		
		Golden Delicious	Fuji	Kanzi®	Golden Delicious	Fuji	Kanzi®
R² ajustado		0,298831337	-0,002148372	-0,122348686	0,129017838	-0,188964811	0,124882836
Valor crítico de F		0,008686333*	0,461301947	0,91289395	0,423955177	0,673992619	0,40405699
Intercepción		0,008939535*	0,757859796	0,726982538	0,208328732	0,209144684	0,167812374
670 nm	a	0,470059116	0,600103792	0,771673702	0,219054473	0,977483935	0,089370719
	b	0,923851798	0,446275109	0,484736362	0,980911768	0,810301141	0,25106897
	c	0,164531103	0,383398869	0,890979765	0,098796169	0,443043236	0,065928353
	d	0,263296323	0,333402233	0,788536686	0,113340007	0,50894328	0,074851162
785 nm	a	0,723298259	0,875227917	0,296219253	0,573377389	0,203534349	0,426630544
	b	0,016582646*	0,43367171	0,939263479	0,215984648	0,244983142	0,069198681
	c	0,015360669*	0,559592229	0,238298176	0,459458911	0,445813561	0,101080253
	d	0,190716569	0,891872564	0,361290872	0,819022103	0,469725857	0,116263511
R² recta de regresión		0,4356	0,1801	0,0817	0,665	0,4904	0,6249

Tabla 13: Resultados estimados de firmeza. * Indica que el valor de la probabilidad es significativo a un nivel del 5%.

SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES							
		TODAS LAS MEDIDAS			MEDIAS ARITMÉTICAS		
		Golden Delicious	Fuji	Kanzi®	Golden Delicious	Fuji	Kanzi®
R² ajustado		-0,003366168	0,25691562	0,385065886	-0,126156643	0,441203096	0,169590369
Valor crítico de F		0,466649203	0,013270613*	0,000819444*	0,619620463	0,153153865	0,364840398
Intercepción		0,530888	0,579336228	0,825385244	0,35280081	0,370109481	0,422952527
670 nm	a	0,455449676	0,416017915	0,403443269	0,089742437	0,939442396	0,917013409
	b	0,409876428	0,487476382	0,705370388	0,325961672	0,105730628	0,825694106
	c	0,281925492	0,239838303	0,073117173	0,271239536	0,198747338	0,692719308
	d	0,284479314	0,090099679	0,155025143	0,237599387	0,163731898	0,828291536
785 nm	a	0,784837847	0,520982296	0,019936528*	0,959185038	0,370028846	0,895563397
	b	0,4018439	0,507651006	0,953960639	0,990360829	0,59671991	0,355024921
	c	0,379262059	0,053320666	0,000729098*	0,864675876	0,958275889	0,253356771
	d	0,760365795	0,495791345	0,021729484*	0,55195177	0,480280987	0,60460153
R² recta de regresión		0,1924	0,392	0,4969	0,5669	0,7605	0,6441

Tabla 14: Resultados estimados de Sólidos Solubles Totales. * Indica que el valor de la probabilidad es significativo a un nivel del 5%.

6.5. Discusión.

El presente trabajo ha consistido en evaluar la firmeza y los Sólidos Solubles Totales de tres variedades de manzana mediante los métodos de medida convencionales y a través de un método alternativo, como es la espectroscopía Vis-NIR con dos longitudes de onda. Ello ha permitido estudiar la existencia de correlación entre ambos métodos de medición.

Para llevar a cabo dicha valoración, tanto a nivel global como a nivel particular se realizaron dos estimaciones. Por un lado se estimó la variable dependiente, en kilogramos o grados Brix, mediante el ajuste lineal de una función lorentziana modificada con cuatro parámetros. Por otro lado, con los valores estimados y los valores reales se llevó a cabo una regresión lineal, lo cual permite determinar la diferencia entre el valor estimado y el real, tanto en todos los valores medidos como en media.

En la mayoría de los casos, el láser a 670 nm presentó una menor correlación con los métodos convencionales que el láser a 785 nm. Ello se debe a que el rayo láser a 670 nm emite una luz roja dentro del espectro visible y tiene menor capacidad de penetración que el rayo láser a 785 nm. El láser a 785 nm emite un haz de luz en el infrarrojo cercano, por lo que presenta una mayor profundidad de penetración en el interior de la manzana. Una longitud de onda a 670 nm está relacionada con la capacidad de absorción de la luz de la clorofila, otro motivo por el cual dicha longitud de onda presenta una menor penetración al interior de la manzana (Calle, 2018).

De forma general, el análisis estadístico llevado a cabo con todas las observaciones ha mostrado un mayor coeficiente de determinación ajustado que con las medias aritméticas de las observaciones de cada manzana. Ello es debido a que en el primer caso el tamaño muestral es mucho mayor (126-135 medidas) que en el segundo (42-45 medidas). No obstante, al establecer la correlación entre los valores estimados y los valores reales se ha obtenido que, empleando las medias aritméticas, el coeficiente de determinación proporciona mejores resultados. Ello puede deberse a una reducción de los valores más alejados de los valores medios.

Las manzanas Golden Delicious han mostrado una mayor correlación entre la firmeza medida con el penetrómetro y el rayo láser, puesto que su coeficiente de determinación ajustado muestra un valor aceptable y su análisis de varianza ha demostrado que se trataba de una correlación significativa. Por el contrario, las manzanas de las variedades Fuji y Kanzi® no han demostrado ninguna correlación entre tales variables. Ello podría ser debido a que se trata de variedades de piel roja y el rayo láser empleado emitía luz del mismo color, además de presentar una piel mucho más gruesa que la variedad Golden Delicious.

Por último, en relación a los Sólidos Solubles Totales, se ha obtenido que las manzanas Golden Deliciosos no mostraron ninguna correlación entre los valores obtenidos mediante el refractómetro y la espectroscopía. Por el contrario, para las manzanas Fuji y Kanzi[®] sí que se obtuvo una aceptable correlación entre tales variables. La explicación de este resultado puede obedecer a que las manzanas Fuji y Kanzi[®] presentan un mayor contenido en azúcares, tal y como indica Agustí (2008), hecho que ha favorecido la detección de los mismos mediante espectroscopía.

De forma general, los resultados no han sido lo suficientemente concluyentes, ya que el tamaño muestral considerado es menor que el utilizado en otros estudios, como es el caso de Peng y Lu (2007), cuyos resultados se mostraban muy satisfactorios respecto al uso de predicciones para determinar la firmeza en las manzanas de la variedad Golden Delicious. Teniendo en cuenta tales estudios, el uso de métodos no destructivos puede resultar de utilidad para estimar la firmeza y los Sólidos Solubles Totales en las diferentes variedades de manzanas. No obstante, es necesario seguir investigando sobre el tema.

7. CONCLUSIÓN.

Como conclusiones principales del estudio se mencionan las siguientes:

En primer lugar, se obtiene que el haz láser a 670 nm muestra una menor correlación que el haz láser a 785 nm debido a dos factores. Por un lado, el láser a 670 nm emite una luz roja dentro del espectro visible, por lo que presenta menor capacidad de penetración y, por otro lado, dicha longitud de onda está relacionada con la capacidad de absorción de la luz de la clorofila.

En segundo lugar, el análisis estadístico llevado a cabo con todas las observaciones muestra un mayor coeficiente de determinación ajustado que con las medias aritméticas de las observaciones de cada manzana, al emplearse un tamaño muestral mucho mayor. Sin embargo, la correlación entre los valores medios estimados y los valores medios reales proporciona mejores resultados, ya que los valores se hallan más próximos a la media.

Por último, las manzanas Golden Delicious presentan una piel más fina y ello queda reflejado en una mayor correlación al determinar la firmeza, mientras que las manzanas Fuji y Kanzi[®] muestran una mayor correlación en los SST debido a su mayor contenido en azúcares.

No obstante, los resultados obtenidos en el estudio no han sido lo suficientemente convincentes para afirmar que la espectroscopía Vis-NIR sea un método que pueda sustituir al penetrómetro

y el refractómetro para la determinación de la firmeza y los Sólidos Solubles Totales. Ello se ha debido al hecho de no disponer de un número de muestras lo suficientemente elevado.

A pesar de dicha limitación, el análisis efectuado ha proporcionado resultados interesantes, que pueden ser el inicio para una futura investigación.

8. CONCLUSIONS.

The main conclusions of the study are shown below:

In the first place, it is obtained that the laser beam at 670 nm shows a lower correlation than the laser beam at 785 nm due to two factors. On the one hand, the laser at 670 nm emits red light within the visible spectrum, so it has a lower penetration capability and, on the other hand, such wavelength is related to the absorption capacity of chlorophyll light.

In the second place, the statistical analysis carried out with all observations shows a higher adjusted coefficient of determination than with the averages observations of each apple, due to the fact that a larger sample size was used. However, the correlation between estimated average values and real average values provides better results, given that the values are closer to the average.

Finally, Golden Delicious apples have a thinner skin and it is reflected on a higher correlation when determining its firmness, while Fuji and Kanzi[®] apples show a higher correlation on their TSS due to their higher sugar content.

However, the obtained results in the study have not been sufficiently convincing to state that Vis-NIR spectroscopy is a method which can replace the penetrometer and refractometer for the determination of firmness and Total Soluble Solids. This is due to the fact that the number of samples used was not high enough.

Despite this restriction, the analysis carried out has provided interesting results, which might be the starting point for a further investigation.

9. VALORACIÓN PERSONAL.

La realización del Trabajo Fin de Grado me ha aportado nuevas experiencias que han ampliado mis conocimientos dentro del campo de la Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Por un lado, he aprendido amplios conocimientos sobre las manzanas, sus características, variedades y

consumo, y he experimentado con la espectroscopía Vis-NIR, una herramienta que probablemente tenga múltiples aplicaciones en un futuro en la industria agroalimentaria.

Asimismo, ha sido una oportunidad para aprender nuevos conocimientos del campo de las matemáticas y la informática, como son la extracción de datos a partir de imágenes con ImageJ y la realización de análisis estadístico mediante Microsoft® Excel, así como aprender a interpretar los resultados obtenidos.

La situación ocasionada por la COVID-19 me ha impedido acudir al laboratorio durante más de la mitad del cuatrimestre, por lo que me ha sido imposible obtener resultados con un mayor número de muestras. A pesar de ello, creo que he podido realizar un trabajo bastante completo y obtener buenas conclusiones.

En resumen, la asignatura ofrece la oportunidad de poner en práctica numerosos conocimientos que se han adquirido durante la realización del grado, además de afianzarlos. Por lo tanto, considero que es una asignatura muy necesaria dentro del plan de estudios del grado de Ciencia y Tecnología de los Alimentos.

Por último, quiero agradecer la ayuda y orientación de mis directores Fernando Blesa y Francisco Torcal, sin la cual este trabajo no hubiese podido llevarse a cabo.

10. BIBLIOGRAFÍA.

Agustí, M. (2008). Fruticultura. Madrid: Mundi-Prensa.

Askoura, M.L., Vaudelle, F., L'Huillier, J.P. (2016). "Experimental Study of Light Propagation in Apple Tissues Using a Multispectral Imaging System". *Photonics*, 3, 50.

Calle Berges, S. (2018). *Estudio experimental y modelado del daño sufrido por impacto en manzanas al caer desde diferentes alturas*. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Zaragoza.

Chen, P., Tjan Y. (1996). "A low-mass impact sensor for high-speed firmness sensing of fruits". Ag. Eng, 96—Conference on Agricultural Engineering, Paper 96F-003.

Comisión Europea. Dirección General de Agricultura (2020). *Dashboard: Apples*. Disponible en: https://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/dashboards/apple-dashboard_en.pdf [Consultado: 11/05/2020].

Delwiche, M.J., McDonald, T., Bowers, S.V. (1987). "Determination of peach firmness by analysis of impact forces". *Trans. ASAE*, 30, pp. 249–254.

Delwiche, M.J., Sarig, Y. (1991). "A probe impact sensor for fruit firmness measurement". *Trans. ASAE*, 34, pp. 187–192.

Galili, N., Shmulevich, I., Benichou, N. (1998). "Acoustic testing of avocado for fruit ripeness evaluation". *Trans. ASAE*, 41, pp. 399–407.

Johnston, J. (1983). *Métodos de econometría*. (4ª ed.) Barcelona: Vicens Universidad.

Kanzi® Apple España (2020). Kanzi® Apple España. Disponible en: <https://www.kanziapple.com/es/> [Consultado: 01/04/2020].

Lafuente Rosales, V. (2015). *Aplicación de las técnicas de Espectroscopía Vis/NIR y de imágenes de retrodifusión de luz láser a la evaluación del estado de madurez de melocotón, manzana y cereza*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza.

Lammertyn, J., Nicolai, B., Ooms, K., Smedt, V.D., Baerdemaeker, J.D. (1998). "Nondestructive measurement of acidity, soluble solids, and firmness of Jonagold apples using NIR-spectroscopy". *Trans. ASAE.*, 41, pp. 1089–1094.

McGlone, V.A., Jordan, R.B., Seelye, R., Martinsen, P.J. (2002). "Comparing density and NIR methods for measurement of Kiwifruit dry matter and soluble solids content". *Postharvest Biology and Technology.*, 26, pp. 191–198.

McGlone, V.A., Ko, S.M.W., Jordan, R.B. (1999). "Non-contact fruit firmness measurement by the laser air-puff method". *Trans. ASAE*, 45, pp. 1391–1397.

Mendoza, F., Lu, R., Cen, H. (2014). "Grading of apples based on firmness and soluble solids content using Vis/SWNIR spectroscopy and spectral scattering techniques". *J. Food Eng.*, 125, pp. 59–68.

Meredith, F.I., Leffler, R.G., Lyon, C.E. (1990). "Detection of firmness in peaches by impact force response". *Trans. ASAE*, 33, pp. 186–188.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2015). *Encuesta Producción Integrada a las Comunidades Autónomas*. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/estadisticas/resumenestadistico_tcm30-57722.pdf [Consultado: 31/03/2020].

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2019). *Agricultura Ecológica Estadísticas 2018*. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/alimentacion/temas/produccion-ecologica/estadisticaspe2018_tcm30-513741.pdf [Consultado: 31/03/2020].

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2019). *Cifras del sector de Frutas y Hortalizas*. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/cifras_del_sectorfyh_tcm30-502367.pdf [Consultado: 31/03/2020].

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2019). *Informe del Consumo Alimentario en España 2018*. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/images/es/20190807_informedeconsumo2018pdf_tcm30-512256.pdf [Consultado: 31/03/2020].

Minitab, LLC. (2020). Minitab, LLC. Disponible en: <https://blog.minitab.com/blog> [Consultado: 23/05/2020].

Nicolai, B. M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K. I., Lammertyn, J. (2007). "Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: a review". *Postharvest Biology and Technology*, 43, pp. 99-118.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2018). *Datos sobre Alimentación y Agricultura*. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> [Consultado: 31/03/2020].

Ozer, F., Engel, B.A., Simon, J.E. (1998). "A multiple impact approach non-destructive measurement of fruit firmness and maturity". *Trans. ASAE*, 41, pp. 871–876.

Penchaiya, P., Bobelyn, E., Verlinden, B.E., Nicolai, B.M., Saeys, W. (2009). "Nondestructive measurement of firmness and soluble solids content in bell pepper using NIR spectroscopy". *J. Food Eng.*, 94, pp. 267–273.

- Peng, Y., Lu, R. (2006). "Improving apple fruit firmness predictions by effective correction of multispectral scattering images". *Postharvest Biology and Technology*, 41, pp. 266-274.
- Peng, Y., Lu, R. (2006a). "An LCTF-based multispectral imaging system for estimation of Apple fruit firmness: Part I. Acquisition and characterization of scattering images". *Transactions of the ASAE*, 49 (1), pp. 259-267.
- Peng, Y., Lu, R. (2006b). "An LCTF-based multispectral imaging system for estimation of Apple fruit firmness: Part II. Selection of optimal wavelengths and development of prediction models". *Transactions of the ASAE*, 49 (1), pp. 269-275.
- Peng, Y., Lu, R. (2007). "Prediction of Apple fruit firmness and soluble solid content using characteristics of multispectral scattering images". *Journal of Food Engineering*, 82, pp.142-152.
- Rowe, P.I., Künnemeyer, R., McGlone, A., Talele, S., Martinsen, P., Seelye, R. (2014). "Relationship between tissue firmness and optical properties of 'Royal Gala' apples from 400 to 1050 nm". *Postharvest Biology and Technology*, 94, pp. 89–96.
- Ruiz-Altisent, M., Ortiz-Canavate, J. (2005). "Instrumentation and procedures for commercial non-destructive determination of firmness of various fruits". ASAE Paper No. 056176. St. Joseph, MI.
- Ruiz-Altisent, M., Ruiz-Garcia, L., Moreda, G.P., Lu, R., Hernandez-Sanchez, N., Correa, E.C., Diezma, B., Nicolaï, B., García-Ramos, J. (2010). "Sensors for product characterization and quality of specialty crops: a review". *Comput. Electron. Agric.*, 74, pp. 176–194.
- Stone, M.L., Armstrong, P.R., Chen, D.D., Brusewitz, G.H., Maness, N.O. (1998). "Peach firmness prediction by multiple location impulse testing". *Trans. ASAE*, 41, pp. 115–119.
- Sugiyama, J., Katsurai, T., Hong, J., Koyama, H., Mikuriya, K. (1998). "Melon ripeness monitoring by a portable firmness tester". *Trans. ASAE*, 41, pp. 121–127.
- Sun, J., Künnemeyer, R., McGlone, A., Rowe, P. (2016). "Multispectral scattering imaging and NIR interance for apple firmness predictions". *Postharvest Biology and Technology*, 119, pp. 58-68.
- Zaiontz, C. (2020). Real Statistics Using Excel. Disponible en: www.real-statistics.com [Consultado: 11/05/2020].
- Zhang, X., Stone, M.L., Chen, D., Maness, N.O., Brusewitz, G.H. (1994). "Peach firmness determination by puncture resistance, drop impact, and sonic impulse". *Trans. ASAE*, 37, pp. 495–500.

11. ANEXOS.

ANEXO 1: Medidas obtenidas mediante los métodos destructivos durante la fase experimental.

A.1.1. Altura, diámetro y peso de las manzanas.

GOLDEN DELICIOUS			
Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Peso (g)
G1	75,2	74,7	179,48
G2	76	77,3	200,71
G3	71	74,65	180,07
G4	77,8	77	195,85
G5	69,6	75	187
G6	71,3	76,7	178,18
G7	69,15	71,35	177,05
G8	68,55	77	181,59
G9	71,8	73,15	176,32
G10	72,45	75	180,01
G11	71,5	77,4	193,45
G12	71,2	76	175,08
G13	72,4	73,8	177,07
G14	73	78	195,22

FUJI			
Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Peso (g)
F1	72	78,3	207,54
F2	72,7	80,1	223,25
F3	73,3	76,85	208,46
F4	74,2	78,3	212,72
F5	77	74,8	203,59
F6	80,4	78,5	236,39
F7	73,5	78,7	221,62
F8	73,3	77,8	206,43
F9	75,4	75,5	199,44
F10	80,4	76,8	218,76
F11	73	78,1	209,34
F12	74	79,3	215,92
F13	74,2	77,4	225,02
F14	70,8	77,6	204,82
F15	70	79,8	214,12

KANZI®			
Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Peso (g)
K1	72,45	77	209,56
K2	72,6	77,8	210,51
K3	73,1	73,9	192,43
K4	69,4	77,55	201,83
K5	68,3	82,2	207,07
K6	66	77,3	192,84
K7	69,6	75	203,2
K8	67	76,6	194,89
K9	69	77,8	198,98
K10	68,5	81,5	210,31
K11	63,2	80,4	197,7
K12	71,2	76	194,9
K13	69	78,7	197,02
K14	69,3	76,6	189,25
K15	67,5	76,3	193,4

A.1.2. Penetrómetro manual.

GOLDEN DELICIOUS				
Muestra	Medida 1 (kg)	Medida 2 (kg)	Medida 3 (kg)	Promedio (kg)
G1	3,1	3,3	3,9	3,433333333
G2	3,4	3,4	3,55	3,45
G3	3,4	3,45	4,1	3,65
G4	3,6	3,55	3,8	3,65
G5	3,85	3,5	3,6	3,65
G6	3,8	3,7	3,9	3,8
G7	3,7	4	3,2	3,633333333
G8	3,8	3,5	3,6	3,633333333
G9	3,9	3,8	3,9	3,866666667
G10	3,45	4,4	4,4	4,083333333
G11	3,8	3,5	3,6	3,633333333
G12	4,2	3,6	4	3,933333333
G13	4	4,1	4,2	4,1
G14	3,75	4	4,2	3,983333333
Promedio (kg)				3,75

FUJI				
Muestra	Medida 1 (kg)	Medida 2 (kg)	Medida 3 (kg)	Promedio (kg)
F1	6,4	8	6,25	6,883333333
F2	5,2	5,1	6	5,433333333
F3	5,6	6,8	6,4	6,266666667
F4	5,9	5,9	5,6	5,8
F5	5,2	5,6	6,1	5,633333333
F6	6,1	5,65	5,5	5,75
F7	6,7	6,3	6,35	6,45
F8	6,5	7,6	7	7,033333333
F9	6,1	6,6	6,5	6,4
F10	6,15	6,7	6,4	6,416666667
F11	7,5	8,1	7,55	7,716666667
F12	6	6,2	6	6,066666667
F13	6,8	7,2	7,8	7,266666667
F14	6,5	6,1	5,2	5,933333333
F15	6	5,9	6,5	6,133333333
Promedio (kg)				6,345555556

KANZI®				
Muestra	Medida 1 (kg)	Medida 2 (kg)	Medida 3 (kg)	Promedio (kg)
K1	7,3	6,5	8,6	7,466666667
K2	9,55	8,15	5,4	7,7
K3	9,1	8	7,4	8,166666667
K4	7,7	7,3	7,5	7,5
K5	7,65	7,3	7,3	7,416666667
K6	6,55	6,25	6,4	6,4
K7	7,6	7,6	7,55	7,583333333
K8	6,3	7,6	7,4	7,1
K9	7,5	8,15	7,3	7,65
K10	7,4	6	6,1	6,5
K11	7,1	7,4	7,4	7,3
K12	6,7	6,75	7,05	6,833333333
K13	5	5,1	5,2	5,1
K14	5,9	5,9	5,8	5,866666667
K15	8,4	8,3	8,45	8,383333333
Promedio (kg)				7,131111111

A.1.3. Refractómetro analógico.

GOLDEN DELICIOUS				
Muestra	Medida 1 (°Brix)	Medida 2 (°Brix)	Medida 3 (°Brix)	Promedio (°Brix)
G1	14,2	14,4	14	14,2
G2	14,2	14	13	13,73333333
G3	12,4	12,3	12,6	12,43333333
G4	13,6	13,2	13,4	13,4
G5	14	12,5	12,4	12,96666667
G6	13,6	13,7	14	13,76666667
G7	13,5	13,4	13,5	13,46666667
G8	13,3	12,8	13,4	13,16666667
G9	13,5	13	13,6	13,36666667
G10	11,6	13	13	12,53333333
G11	14,4	13,5	13,4	13,76666667
G12	13	13,2	13,8	13,33333333
G13	12	12,2	11,8	12
G14	13,8	14,2	14	14
Promedio (°Brix)				13,2952381

FUJI				
Muestra	Medida 1 (°Brix)	Medida 2 (°Brix)	Medida 3 (°Brix)	Promedio (°Brix)
F1	16,7	18,5	17,4	17,53333333
F2	15	15,4	15,2	15,2
F3	15,2	15,6	15,2	15,33333333
F4	14,8	14,7	15	14,83333333
F5	13,6	14,5	15,2	14,43333333
F6	15,9	14,5	14,2	14,86666667
F7	14,4	14,6	14	14,33333333
F8	16,8	16,4	18,2	17,13333333
F9	13,5	15,2	15,8	14,83333333
F10	15,4	15,4	14,6	15,13333333
F11	15,2	17,2	15,4	15,93333333
F12	15,6	16,3	15	15,63333333
F13	16	14,2	15,4	15,2
F14	15,5	14,5	14	14,66666667
F15	15,4	16,4	16,2	16
Promedio (°Brix)				15,40444444

KANZI®				
Muestra	Medida 1 (°Brix)	Medida 2 (°Brix)	Medida 3 (°Brix)	Promedio (°Brix)
K1	7,3	6,5	8,6	7,466666667
K2	9,55	8,15	5,4	7,7
K3	9,1	8	7,4	8,166666667
K4	7,7	7,3	7,5	7,5
K5	7,65	7,3	7,3	7,416666667
K6	6,55	6,25	6,4	6,4
K7	7,6	7,6	7,55	7,583333333
K8	6,3	7,6	7,4	7,1
K9	7,5	8,15	7,3	7,65
K10	7,4	6	6,1	6,5
K11	7,1	7,4	7,4	7,3
K12	6,7	6,75	7,05	6,833333333
K13	5	5,1	5,2	5,1
K14	5,9	5,9	5,8	5,866666667
K15	8,4	8,3	8,45	8,383333333
Promedio (°Brix)				7,131111111

ANEXO 2: Resultados del ajuste no lineal (MLD-4) mediante la espectroscopía durante la fase experimental.

A.2.1. Rayo láser a 670 nm.

GOLDEN DELICIOUS					
Muestra	a	b	c	d	R^2
G1	0,01492	0,9963	33,5884	10,1985	0,9991
	0,01342	0,9995	35,2001	10,458	0,9986
	0,01357	0,9992	36,0475	11,1497	0,999
G2	0,01398	0,997	33,1882	10,0696	0,9993
	0,01515	0,9958	31,6716	9,7759	0,9993
	0,01155	0,9965	31,5237	9,0241	0,9997
G3	0,01364	0,9975	32,5887	9,529	0,999
	0,0123	0,9991	32,8756	9,4357	0,9993
	0,0156	0,996	30,3068	9,1131	0,9991
G4	0,01382	0,997	36,3307	11,2743	0,999
	0,01339	0,9995	34,4097	10,3871	0,999
	0,01107	1,0006	33,1039	9,4593	0,9993
G5	0,009737	1,0045	34,7191	9,8795	0,9989
	0,01049	1,0035	33,2592	9,3329	0,9988
	0,009814	1,001	33,6267	9,5025	0,9995
G6	0,01123	1,0003	35,6139	10,3188	0,9993
	0,01025	1,0029	36,0816	10,618	0,9991
	0,01278	0,9993	32,6407	9,1574	0,999
G7	0,01124	0,9998	33,0361	9,5087	0,9995
	0,01269	0,9995	34,4764	10,4004	0,9993
	0,0116	1,0014	33,1338	9,2759	0,999
G8	0,01494	0,9983	35,93	11,1325	0,9989
	0,01487	0,9975	36,5193	11,6067	0,9991
	0,01261	0,9988	35,5431	10,671	0,9992
G9	0,0154	0,9994	34,4395	10,8184	0,9984
	0,01274	0,9989	32,1494	9,3789	0,9994
	0,01348	0,997	31,5697	9,2796	0,9994
G10	0,01446	0,9989	36,625	11,4049	0,9989
	0,01107	1,002	34,6941	9,7115	0,9991
	0,01537	0,9982	36,8368	11,6999	0,9989
G11	0,01164	1,0028	39,4964	12,5087	0,9987
	0,01463	0,9994	35,9674	11,1682	0,9989
	0,01146	1,0014	37,2394	11,3719	0,999
G12	0,01371	1,0008	38,4931	12,1069	0,9987
	0,01468	0,9995	37,0659	11,6834	0,9988
	0,01191	1,0007	38,0481	11,5821	0,9992
G13	0,01113	1,0012	34,6783	10,1074	0,9991
	0,01252	0,9997	34,504	9,8438	0,9992
	0,01132	1,0009	33,9549	9,6864	0,9992
G14	0,008076	0,9961	31,9571	8,6915	0,9998
	0,01024	0,9997	29,758	7,9521	0,9996
	0,01317	0,9995	34,3657	9,962	0,999

FUJI					
Muestra	a	b	c	d	R ²
F1	0,009683	1,0066	31,1624	7,7481	0,9984
	0,008356	1,0033	30,737	7,4551	0,9994
	0,005927	1,008	36,9493	10,0222	0,9989
F2	0,006435	1,0055	29,7446	6,9651	0,9994
	0,01336	1,0004	30,9617	8,4775	0,9987
	0,007302	1,0065	35,5555	9,2723	0,9991
F3	0,006988	1,0096	35,0973	8,912	0,9982
	0,008457	1,0061	34,1941	8,5223	0,9987
	0,004845	1,0053	30,9916	7,2296	0,9995
F4	0,01105	1,0029	30,1828	7,5501	0,9988
	0,006355	1,0021	35,4639	9,6789	0,9997
	0,006828	1,0058	31,3034	7,5476	0,9992
F5	0,008871	1,0032	34,5687	8,9716	0,9991
	0,008122	0,9961	31,4462	7,9885	0,9998
	0,008537	0,9984	31,6492	7,934	0,9993
F6	0,006642	1,0046	37,2622	10,0598	0,9993
	0,006921	1,0045	37,9445	10,4192	0,9994
	0,004859	1,0014	33,8293	8,5456	0,9998
F7	0,006531	1,0051	34,3835	8,8889	0,9994
	0,01044	0,9963	33,7389	9,0154	0,9994
	0,006002	1,0082	34,0207	8,4908	0,9989
F8	0,009773	1,0036	35,6227	9,3612	0,9989
	0,009013	1,0037	34,1725	8,6781	0,9992
	0,01059	1,0035	39,065	11,4508	0,9986
F9	0,009179	1,0043	32,7907	8,3402	0,9989
	0,01225	1,0006	31,5334	8,2973	0,9988
	0,009212	0,9993	28,8665	7,1149	0,9996
F10	0,005778	1,0104	39,685	10,7902	0,9984
	0,007819	1,007	36,9575	9,8389	0,9987
	0,007766	1,0069	33,1098	8,3004	0,9989
F11	0,01032	0,9927	24,5011	6,249	0,9995
	0,009259	0,9918	27,686	7,0589	0,9995
	0,01263	0,9953	25,0943	6,7268	0,9996
F12	0,009467	1,0069	35,1017	9,2631	0,9982
	0,005454	1,0048	36,4134	9,3712	0,9996
	0,007855	1,0042	37,9312	10,1956	0,9992
F13	0,005096	1,0033	32,7921	7,9528	0,9996
	0,00843	0,9994	35,2524	9,2852	0,9996
	0,01119	1,0007	34,991	9,6725	0,9989
F14	0,007172	0,9963	31,3997	7,6954	0,9997
	0,007988	0,9985	30,3133	7,514	0,9997
	0,01206	0,9959	31,9774	8,3231	0,9993
F15	0,008541	1,0048	38,5863	10,7	0,999
	0,005649	1,007	37,7853	10,0071	0,9992
	0,01071	1,0048	39,5325	11,2069	0,9982

KANZI®					
Muestra	a	b	c	d	R ²
K1	0,008956	1,0022	35,0346	9,8404	0,9993
	0,01568	0,9988	36,789	11,5955	0,9986
	0,01278	0,9999	36,6012	11,0179	0,9991
K2	0,01319	0,9974	35,3018	11,0267	0,9993
	0,01319	1,0001	37,89	12,0622	0,9989
	0,01341	0,9978	36,8087	11,4811	0,9991
K3	0,0144	0,9955	30,193	9,3262	0,9994
	0,01263	0,9959	33,5882	9,912	0,9995
	0,01317	0,9985	32,497	9,6559	0,9993
K4	0,0142	0,9973	35,9038	11,3222	0,9992
	0,01426	0,997	34,2981	10,3135	0,9991
	0,01394	0,9998	36,7921	11,3559	0,9989
K5	0,01501	1,0001	38,1422	12,28	0,9984
	0,01219	1,0008	37,7561	11,4816	0,9991
	0,01507	0,9996	38,0754	12,2223	0,9986
K6	0,01455	0,9986	34,9912	10,9162	0,9989
	0,01489	0,9973	36,1616	11,5968	0,999
	0,01254	0,9994	36,1329	11,0125	0,9992
K7	0,01444	0,9983	39,8481	13,221	0,999
	0,01632	0,9971	39,6819	12,9179	0,999
	0,01433	1,0001	38,8394	12,1542	0,9987
K8	0,01378	0,9969	30,4831	8,7459	0,9994
	0,01412	0,9983	34,691	10,8434	0,9991
	0,01337	0,9997	33,35	9,9944	0,999
K9	0,01179	1,003	37,5636	11,3017	0,9986
	0,01451	0,9992	37,5061	11,9404	0,9988
	0,01385	0,9999	38,7986	12,341	0,9988
K10	0,01261	0,9963	30,4817	8,8386	0,9996
	0,01452	0,9949	31,4745	9,5161	0,9994
	0,01688	0,9962	33,2176	10,7489	0,9987
K11	0,01295	1,0013	39,037	12,2886	0,9987
	0,01108	1,0018	38,7377	11,6989	0,9992
	0,01453	0,9999	39,7415	12,9268	0,9987
K12	0,01533	0,9986	37,0133	11,6028	0,9987
	0,012	0,9992	36,3497	10,92	0,9992
	0,01097	1,0014	38,0295	11,2945	0,9992
K13	0,01142	0,9995	34,4421	9,7969	0,9993
	0,01694	0,9969	39,1454	13,2436	0,9988
	0,01586	0,9984	38,8036	12,9846	0,9986
K14	0,01036	0,9996	35,9572	10,5438	0,9994
	0,0142	0,9985	39,6714	13,4254	0,9991
	0,01372	0,9998	37,6436	12,0046	0,9989
K15	0,01291	0,9991	38,12	11,8903	0,9992
	0,0121	1,0015	40,0458	12,9672	0,9988
	0,0137	1,0001	37,2342	11,5247	0,9988

A.2.2. Rayo láser a 785 nm.

GOLDEN DELICIOUS					
Muestra	a	b	c	d	R ²
G1	0,007716	1,0029	37,1461	10,4951	0,9993
	0,005626	1,0041	37,1384	10,1953	0,9996
	0,006865	1,0039	37,0763	10,2862	0,9994
G2	0,005031	1,005	36,4951	9,7223	0,9996
	0,004419	1,006	36,7537	9,8683	0,9996
	0,00438	1,0054	36,6156	9,7	0,9996
G3	0,003959	1,0067	37,0484	9,8825	0,9994
	0,004789	1,0045	36,6828	9,6752	0,9996
	0,004501	1,0071	36,3242	9,6152	0,9994
G4	0,004662	1,0036	36,6972	9,7069	0,9997
	0,007173	1,0051	36,7214	9,879	0,999
	0,004547	1,0062	37,0086	9,9034	0,9995
G5	0,003113	1,0067	36,5398	9,537	0,9996
	0,002821	1,0082	37,3649	9,9785	0,9995
	0,004538	1,0062	37,4375	10,2485	0,9994
G6	0,006384	1,004	36,5672	9,8543	0,9994
	0,004012	1,0082	37,4247	10,1771	0,9993
	0,003941	1,0076	36,4754	9,6087	0,9994
G7	0,005333	1,0063	37,3091	10,1554	0,9994
	0,003267	1,0084	37,1551	9,9769	0,9994
	0,0007219	1,0098	37,3277	9,5225	0,9995
G8	0,005797	1,0046	37,6743	10,3801	0,9995
	0,007148	1,0043	37,3047	10,4139	0,9994
	0,004353	1,0056	37,2612	10,1698	0,9996
G9	0,007655	1,0043	37,0946	10,3488	0,9992
	0,004318	1,0067	36,8632	9,8564	0,9994
	0,006369	1,0058	36,5	9,8883	0,9992
G10	0,006988	1,0052	37,8451	10,6564	0,9993
	0,005723	1,0067	36,948	9,9477	0,9993
	0,008972	1,0022	36,392	10,2096	0,9994
G11	0,005801	1,0057	36,9466	10,0934	0,9993
	0,006723	1,0053	37,1293	10,2856	0,9993
	0,007013	1,0056	37,0357	10,2686	0,9992
G12	0,006232	1,0063	37,3785	10,4723	0,9992
	0,006491	1,0051	37,8181	10,6076	0,9994
	0,003487	1,0049	36,2117	9,5921	0,9997
G13	0,005075	1,0071	37,2391	10,1885	0,9992
	0,0035	1,0066	36,1152	9,3387	0,9995
	0,001986	1,0082	37,1907	9,7387	0,9996
G14	0,003612	1,0044	36,164	9,5101	0,9996
	0,007615	1,0054	36,4186	9,9293	0,999
	0,006513	1,0059	36,133	9,5632	0,9991

FUJI					
Muestra	a	b	c	d	R ²
F1	0,004684	1,0086	37,3157	9,4825	0,9991
	0,006955	1,0076	34,0785	8,2653	0,9988
	0,00007174	1,0104	37,7774	9,4479	0,9995
F2	0,003587	1,0085	37,523	9,3486	0,9993
	0,006701	1,0032	37,4636	9,8584	0,9995
	0,002227	1,0083	38,2787	9,7126	0,9995
F3	0,002764	1,0105	38,0523	9,5467	0,9992
	0,003023	1,0096	37,2862	9,1047	0,9992
	-0,0008354	1,0088	36,8556	8,8216	0,9998
F4	0,003104	1,0101	36,703	8,9152	0,9991
	-0,000687	1,01	39,9529	10,8373	0,9996
	0,003448	1,0077	37,0223	9,1637	0,9994
F5	0,004744	1,0074	37,7484	9,8047	0,9993
	0,006208	1,0034	37,1731	9,5802	0,9996
	0,002783	1,0081	37,4533	9,5159	0,9994
F6	0,002252	1,0081	37,8853	9,5762	0,9995
	0,008517	1,0045	37,9598	10,1862	0,9991
	0,001296	1,0095	38,1979	9,746	0,9995
F7	-0,000637	1,0113	39,3766	10,163	0,9995
	0,005601	1,0074	38,0292	9,8978	0,999
	0,007632	1,0049	37,9099	9,9709	0,999
F8	0,00259	1,0078	37,3864	9,2561	0,9995
	0,001953	1,0102	38,0407	9,457	0,9993
	0,00303	1,0091	37,9903	9,6755	0,9992
F9	0,002198	1,0086	37,1534	9,1036	0,9995
	0,001873	1,0096	37,1675	9,1309	0,9994
	0,001249	1,0097	36,7311	8,8415	0,9994
F10	0,003199	1,0104	38,5504	9,7755	0,9989
	-0,006185	1,0177	39,6866	9,6721	0,9994
	0,003345	1,0087	37,7894	9,4752	0,9993
F11	0,0037	1,0071	36,9611	9,3067	0,9995
	0,003598	1,0065	37,0865	9,3882	0,9995
	0,004458	1,0088	36,311	9,0322	0,9991
F12	0,008468	1,0051	37,918	10,2249	0,9989
	0,002063	1,0085	37,1162	9,187	0,9996
	0,005338	1,0054	38,2344	9,9515	0,9995
F13	0,003825	1,0086	37,9488	9,5524	0,9991
	0,005016	1,0063	38,1539	9,7786	0,9994
	0,004791	1,0057	38,1433	10,062	0,9994
F14	0,006088	1,0048	36,7118	9,0631	0,9993
	-0,0005383	1,0104	36,4493	8,4924	0,9996
	0,001425	1,012	37,8223	9,2064	0,9991
F15	0,001763	1,0108	38,5366	9,9748	0,9993
	0,002589	1,0106	37,3898	9,337	0,9991
	0,007214	1,0051	37,6511	9,9415	0,9992

KANZI®					
Muestra	a	b	c	d	R ²
K1	0,004963	1,0067	38,285	10,3482	0,9993
	0,007922	1,0046	39,0401	11,0239	0,9991
	0,006357	1,0064	38,0643	10,4277	0,9992
K2	0,00538	1,005	38,7445	10,9543	0,9995
	0,005198	1,0057	38,7412	10,809	0,9994
	-0,00295	1,0118	39,9217	10,3745	0,9997
K3	0,007749	1,0042	37,977	10,7495	0,9993
	0,00164	1,0092	38,9921	10,4437	0,9995
	0,006504	1,0066	38,7113	10,8159	0,9991
K4	0,004878	1,0066	38,9985	10,8413	0,9994
	0,005607	1,0038	38,5521	10,499	0,9996
	0,006668	1,0074	38,4913	10,5739	0,9989
K5	0,007713	1,0051	38,7635	11,112	0,9992
	0,007633	1,0051	38,9763	11,0942	0,9991
	0,006748	1,0051	38,9424	11,0837	0,9993
K6	0,007668	1,0032	38,1035	10,8572	0,9994
	0,008245	1,0046	38,0066	10,7643	0,9991
	0,007697	1,0039	38,2836	10,8437	0,9992
K7	0,006943	1,004	38,659	11,0356	0,9994
	0,01043	1,0006	38,4837	11,2176	0,9993
	0,01035	1,0038	38,9211	11,3834	0,9987
K8	0,005839	1,0064	38,0442	10,1382	0,9992
	0,005019	1,0057	39,1125	10,8817	0,9994
	0,00657	1,0063	39,0102	11,039	0,9991
K9	0,005687	1,0063	39,4461	11,1546	0,9993
	0,006149	1,0048	39,2171	11,1055	0,9994
	0,006675	1,0065	39,3434	11,0943	0,9991
K10	0,006932	1,0049	38,4975	10,6261	0,9993
	0,006569	1,0058	38,616	10,6599	0,9992
	0,007334	1,0064	38,6667	10,8886	0,9989
K11	0,007886	1,0047	38,7665	11,157	0,9991
	0,00353	1,0073	38,9739	10,5973	0,9994
	0,005479	1,006	39,0222	10,9524	0,9994
K12	0,007712	1,0028	38,7416	10,8817	0,9995
	0,004899	1,0058	38,7068	10,6766	0,9995
	0,004594	1,0068	39,0054	10,7016	0,9993
K13	0,007034	1,0047	38,5907	10,8457	0,9993
	0,007534	1,0038	38,6492	10,9732	0,9994
	0,009127	1,0032	39,1237	11,4802	0,9991
K14	0,005449	1,0063	38,9092	10,9241	0,9993
	0,007784	1,0034	39,1462	11,4782	0,9993
	0,006174	1,0065	38,9713	11,0735	0,9992
K15	0,005202	1,0064	38,921	10,847	0,9994
	0,005537	1,0058	39,0343	11,1318	0,9994
	0,007156	1,005	38,8611	11,0561	0,9993

ANEXO 3: Resultados obtenidos durante el análisis estadístico.

A.3.1. Comparativa de las medidas de firmeza obtenidas con el penetrómetro y el método Vis-NIR.

Manzanas Golden Delicious:

ANÁLISIS DE VARIANZA							
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F		
Regresión	8	1,707727361	0,21346592	3,184225687	0,008686333		
Residuos	33	2,212272639	0,067038565				
Total	41	3,92					
	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Inferior 95%	
Intercepción	-114,8715427	41,34204665	-2,778564487	0,008939535	-198,982569	-30,76051632	
670 nm	a	36,97612014	50,59683553	0,730799066	0,470059116	-65,96391576	139,916156
	b	3,94820938	40,99205103	0,096316463	0,923851798	-79,45074552	87,34716428
	c	0,172503091	0,121346161	1,421578479	0,164531103	-0,07437753	0,419383711
	d	-0,317351783	0,278856609	-1,138046483	0,263296323	-0,884689819	0,249986253
785 nm	a	25,44362339	71,25277905	0,357089558	0,723298259	-119,5212456	170,4084923
	b	132,7517605	52,58865445	2,524342216	0,016582646	25,75933855	239,7441825
	c	-0,801542609	0,313533028	-2,556485399	0,015360669	-1,439430352	-0,163654867
	d	0,747443008	0,559497725	1,335917869	0,190716569	-0,390863672	1,885749689

ANÁLISIS DE LOS RESIDUALES

Observación	Pronóstico (kg)	Residuos	Valor real (kg)
1	3,574703515	-0,474703515	3,1
2	3,615757453	-0,315757453	3,3
3	3,669478962	0,230521038	3,9
4	3,669223467	-0,269223467	3,4
5	3,558363731	-0,158363731	3,4
6	3,545340326	0,004659674	3,55
7	3,601419734	-0,201419734	3,4
8	3,504452303	-0,054452303	3,45
9	3,853899209	0,246100791	4,1
10	3,454341012	0,145658988	3,6
11	3,770742058	-0,220742058	3,55
12	3,625731491	0,174268509	3,8
13	3,868905894	-0,018905894	3,85
14	3,674769309	-0,174769309	3,5
15	3,571275751	0,028724249	3,6
16	3,862469627	-0,062469627	3,8
17	3,873383351	-0,173383351	3,7
18	4,07727775	-0,17727775	3,9
19	3,582251925	0,117748075	3,7
20	3,816387609	0,183612391	4
21	3,551956207	-0,351956207	3,2
22	3,358387056	0,441612944	3,8
23	3,619870545	-0,119870545	3,5
24	3,623864358	-0,023864358	3,6
25	3,671011448	0,228988552	3,9
26	3,683594304	0,116405696	3,8
27	3,88264002	0,01735998	3,9
28	3,556019904	-0,106019904	3,45
29	4,003520068	0,396479932	4,4
30	4,012810702	0,387189298	4,4
31	3,947727659	-0,147727659	3,8
32	3,829084032	-0,329084032	3,5
33	3,984067559	-0,384067559	3,6
34	3,998448565	0,201551435	4,2
35	3,513443492	0,086556508	3,6
36	4,042924438	-0,042924438	4
37	3,857483408	0,142516592	4
38	4,115771625	-0,015771625	4,1
39	3,642167153	0,557832847	4,2
40	3,663364795	0,086635205	3,75
41	3,95675098	0,04324902	4
42	4,214917205	-0,014917205	4,2

Manzanas Fuji:

ANÁLISIS DE VARIANZA							
		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión		8	4,324891309	0,540611414	0,988209286	0,461301947	
Residuos		36	19,6942198	0,547061661			
Total		44	24,01911111				
		Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Inferior 95%
Intercepción		-29,16807639	93,89431284	-0,310647956	0,757859796	-219,594569	161,2584162
670 nm	a	-47,30757745	89,44099631	-0,528924983	0,600103792	-228,7023255	134,0871706
	b	-32,77851902	42,56494041	-0,770082578	0,446275109	-119,1042193	53,54718127
	c	-0,207801964	0,235488348	-0,882429918	0,383398869	-0,68539447	0,269790542
	d	0,609992657	0,622149033	0,980460668	0,333402233	-0,651784065	1,871769378
785 nm	a	17,87722316	113,0447019	0,158142955	0,875227917	-211,3880585	247,1425049
	b	79,94737251	100,9708986	0,791786283	0,43367171	-124,8311013	284,7258463
	c	-0,306693817	0,520772994	-0,588920356	0,559592229	-1,362870401	0,749482767
	d	0,136705942	0,998582067	0,136900057	0,891872564	-1,888512357	2,161924242

ANÁLISIS DE LOS RESIDUALES

Observación	Pronóstico (kg)	Residuos	Valor real (kg)
1	6,200139741	0,199860259	6,4
2	7,067839669	0,932160331	8
3	6,4317125	-0,1817125	6,25
4	6,097359893	-0,897359893	5,2
5	6,32642139	-1,22642139	5,1
6	6,001114278	-0,001114278	6
7	6,022030206	-0,422030206	5,6
8	6,124444459	0,675555541	6,8
9	6,158916055	0,241083945	6,4
10	6,541568127	-0,641568127	5,9
11	6,181300401	-0,281300401	5,9
12	6,162175314	-0,562175314	5,6
13	6,204966671	-1,004966671	5,2
14	6,374438616	-0,774438616	5,6
15	6,423784341	-0,323784341	6,1
16	6,306794184	-0,206794184	6,1
17	6,2590535	-0,6090535	5,65
18	6,307923214	-0,807923214	5,5
19	6,006646029	0,693353971	6,7
20	6,497993091	-0,197993091	6,3
21	5,822340988	0,527659012	6,35
22	6,19731139	0,30268861	6,5
23	6,121936083	1,478063917	7,6
24	6,705182546	0,294817454	7
25	6,275721816	-0,175721816	6,1
26	6,560366455	0,039633545	6,6
27	6,670748522	-0,170748522	6,5
28	6,123700683	0,026299317	6,15
29	6,178341772	0,521658228	6,7
30	6,050998532	0,349001468	6,4
31	7,042625934	0,457374066	7,5
32	6,877414749	1,222585251	8,1
33	7,327624985	0,222375015	7,55
34	6,010669636	-0,010669636	6
35	6,324053661	-0,124053661	6,2
36	5,989889123	0,010110877	6
37	6,111550703	0,688449297	6,8
38	6,188595307	1,011404693	7,2
39	6,295986527	1,504013473	7,8
40	6,424267325	0,075732675	6,5
41	6,760389473	-0,660389473	6,1
42	6,640250558	-1,440250558	5,2
43	6,387625358	-0,387625358	6
44	6,459414123	-0,559414123	5,9
45	6,30637207	0,19362793	6,5

Manzanas Kanzi®:

ANÁLISIS DE VARIANZA							
		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión		8	3,861138151	0,482642269	0,400437867	0,91289395	
Residuos		36	43,39030629	1,205286286			
Total		44	47,25144444				
		Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Inferior 95%
Intercepción		-78,79271927	223,9216846	-0,351876235	0,726982538	-532,9269445	375,341506
670 nm	a	82,04648346	280,6147721	0,292381199	0,771673702	-487,0666524	651,1596193
	b	142,6321833	202,0305137	0,705993272	0,484736362	-267,1046895	552,369056
	c	0,070274568	0,509096536	0,138037805	0,890979765	-0,962221062	1,102770198
	d	-0,326683626	1,208969256	-0,270216653	0,788536686	-2,778586923	2,12521967
785 nm	a	-319,346015	301,2789197	-1,059968003	0,296219253	-930,3679846	291,6759547
	b	-16,27120468	212,0589089	-0,076729644	0,939263479	-446,3466058	413,8041964
	c	-1,583340286	1,320371024	-1,199163158	0,238298176	-4,261176838	1,094496266
	d	2,137392172	2,311500736	0,924677262	0,361290872	-2,550548605	6,825332948

ANÁLISIS DE LOS RESIDUALES

Observación	Pronóstico (kg)	Residuos	Valor real (kg)
1	7,670249734	-0,370249734	7,3
2	6,624788447	-0,124788447	6,5
3	7,460442529	1,139557471	8,6
4	7,426654937	2,123345063	9,55
5	7,396758646	0,753241354	8,15
6	6,90554969	-1,50554969	5,4
7	7,485398834	1,614601166	9,1
8	7,053119908	0,946880092	8
9	7,204394188	0,195605812	7,4
10	6,931612969	0,768387031	7,7
11	6,898361895	0,401638105	7,3
12	6,965162198	0,534837802	7,5
13	7,311583633	0,338416367	7,65
14	7,064313562	0,235686438	7,3
15	7,223766763	0,076233237	7,3
16	7,829672864	-1,279672864	6,55
17	7,279874912	-1,029874912	6,25
18	7,492972762	-1,092972762	6,4
19	7,086508355	0,513491645	7,6
20	6,765262767	0,834737233	7,6
21	6,855475184	0,694524816	7,55
22	7,005342168	-0,705342168	6,3
23	7,014334705	0,585665295	7,6
24	7,32872021	0,07127979	7,4
25	7,377695422	0,122304578	7,5
26	6,980673858	1,169326142	8,15
27	6,566774404	0,733225596	7,3
28	6,793853617	0,606146383	7,4
29	6,585214329	-0,585214329	6
30	6,838509706	-0,738509706	6,1
31	7,416492949	-0,316492949	7,1
32	7,330077208	0,069922792	7,4
33	7,092803022	0,307196978	7,4
34	6,845964276	-0,145964276	6,7
35	7,300982006	-0,550982006	6,75
36	7,187747858	-0,137747858	7,05
37	7,410380722	-2,410380722	5
38	6,731838728	-1,631838728	5,1
39	6,751175398	-1,551175398	5,2
40	7,343554837	-1,443554837	5,9
41	6,931951098	-1,031951098	5,9
42	7,275269905	-1,475269905	5,8
43	7,087342605	1,312657395	8,4
44	7,478850003	0,821149997	8,3
45	7,292526191	1,157473809	8,45

A.3.2. Comparativa de las medias aritméticas de firmeza obtenidas con penetrómetro y el método Vis-NIR.

Manzanas Golden Delicious:

ANÁLISIS DE VARIANZA							
		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión		8	0,39826522	0,049783152	1,240709851	0,423955177	
Residuos		5	0,200623669	0,040124734			
Total		13	0,598888889				
		Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Inferior 95%
Intercepción		-161,8669062	112,0919514	-1,444054672	0,208328732	-450,0084405	126,2746281
670 nm	a	193,6352598	137,8375346	1,404807917	0,219054473	-160,6874028	547,9579225
	b	-2,44745407	97,33247945	-0,025145297	0,980911768	-252,6485577	247,7536496
	c	0,478213549	0,236208127	2,024543166	0,098796169	-0,128978771	1,085405869
	d	-1,052966966	0,549231403	-1,917164531	0,113340007	-2,464811234	0,358877303
785 nm	a	96,35518505	160,036347	0,602083132	0,573377389	-315,0313416	507,7417117
	b	177,2176822	125,1669067	1,415850937	0,215984648	-144,5340947	498,9694591
	c	-0,589852041	0,736348631	-0,80104996	0,459458911	-2,482696456	1,302992373
	d	0,296475449	1,229467396	0,241141368	0,819022103	-2,863971105	3,456922004

ANÁLISIS DE LOS RESIDUALES

Observación	Pronóstico (kg)	Residuos	Valor real (kg)
1	3,618900936	-0,185567602	3,433333333
2	3,475187306	-0,025187306	3,45
3	3,752689081	-0,102689081	3,65
4	3,615427238	0,034572762	3,65
5	3,585059369	0,064940631	3,65
6	4,021043758	-0,221043758	3,8
7	3,692994418	-0,059661085	3,633333333
8	3,537361885	0,095971448	3,633333333
9	3,731989325	0,134677341	3,866666667
10	3,979924617	0,103408716	4,083333333
11	3,789714595	-0,156381262	3,633333333
12	3,807717599	0,125615734	3,933333333
13	3,987093178	0,112906822	4,1
14	3,904896692	0,078436641	3,983333333

Manzanas Fuji:

ANÁLISIS DE VARIANZA							
		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión		8	2,844700337	0,355587542	0,721868624	0,673992619	
Residuos		6	2,955558922	0,492593154			
Total		14	5,800259259				
		Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Inferior 95%
Intercepción		-601,7879627	427,8037463	-1,406691661	0,209144684	-1648,58602	445,0100942
670 nm	a	9,248044073	314,3474624	0,029419815	0,977483935	-759,9324872	778,4285753
	b	27,91121687	111,2674932	0,250847899	0,810301141	-244,3505308	300,1729646
	c	-0,565939082	0,689340328	-0,820986469	0,443043236	-2,2526941	1,120815936
	d	1,344399366	1,914921013	0,70206518	0,50894328	-3,341243554	6,030042286
785 nm	a	858,030806	601,3608157	1,426815289	0,203534349	-613,4461009	2329,507713
	b	555,4405434	431,033693	1,288624422	0,244983142	-499,2609083	1610,141995
	c	1,288929154	1,580063808	0,815745002	0,445813561	-2,577347703	5,15520601
	d	-2,525988453	3,274367334	-0,771443212	0,469725857	-10,53807669	5,48609978

ANÁLISIS DE LOS RESIDUALES

Observación	Pronóstico (kg)	Residuos	Valor real (kg)
1	6,741546485	0,141786849	6,883333333
2	6,274635125	-0,841301791	5,433333333
3	5,794618808	0,472047859	6,266666667
4	5,871164395	-0,071164395	5,8
5	5,72730965	-0,093976316	5,633333333
6	5,850198562	-0,100198562	5,75
7	6,513590785	-0,063590785	6,45
8	6,443586083	0,58974725	7,033333333
9	6,363503414	0,036496586	6,4
10	6,528760909	-0,112094242	6,416666667
11	7,452830242	0,263836424	7,716666667
12	6,052609323	0,014057344	6,066666667
13	6,34296038	0,923706286	7,266666667
14	6,613183037	-0,679849703	5,933333333
15	6,612836136	-0,479502803	6,133333333

Manzanas Kanzi®:

ANÁLISIS DE VARIANZA							
		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión		8	6,589007626	0,823625953	1,249732232	0,40405699	
Residuos		6	3,954251634	0,659041939			
Total		14	10,54325926				
		Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Inferior 95%
Intercepción		-1075,826458	685,8942157	-1,568502013	0,167812374	-2754,149143	602,4962272
670 nm	a	1847,053292	912,4557143	2,024266234	0,089370719	-385,6454089	4079,751993
	b	-721,9063059	568,3721664	-1,270129589	0,25106897	-2112,662896	668,8502839
	c	4,832981895	2,15315515	2,244604572	0,065928353	-0,435598959	10,10156275
	d	-11,29960084	5,249609385	-2,152465071	0,074851162	-24,14493225	1,54573058
785 nm	a	-634,4902113	744,2364757	-0,85253845	0,426630544	-2455,571264	1186,590841
	b	1825,554846	826,2603323	2,209418478	0,069198681	-196,2313532	3847,341045
	c	-6,218514418	3,21298755	-1,935430599	0,101080253	-14,08041173	1,643382895
	d	12,93012189	7,048370495	1,834483857	0,116263511	-4,316619404	30,17686319

ANÁLISIS DE LOS RESIDUALES			
Observación	Pronóstico (kg)	Residuos	Valor real (kg)
1	7,651362905	-0,184696238	7,466666667
2	7,679278167	0,020721833	7,7
3	8,258838781	-0,092172115	8,166666667
4	7,6688134	-0,1688134	7,5
5	8,058147238	-0,641480571	7,416666667
6	6,294126318	0,105873682	6,4
7	6,768164176	0,815169157	7,583333333
8	6,643101238	0,456898762	7,1
9	7,397823103	0,252176897	7,65
10	6,334437109	0,165562891	6,5
11	7,437231675	-0,137231675	7,3
12	7,057933974	-0,224600641	6,833333333
13	6,096400139	-0,996400139	5,1
14	6,338250215	-0,471583549	5,866666667
15	7,282758228	1,100575106	8,383333333

A.3.3. Comparativa de las medidas de SST obtenidas con refractómetro y el método Vis-NIR.

Manzanas Golden Delicious:

ANÁLISIS DE VARIANZA							
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	<i>F</i>	Valor crítico de <i>F</i>		
Regresión	8	4,028936521	0,503617065	0,982806266	0,466649203		
Residuos	33	16,9101111	0,512427609				
Total	41	20,93904762					
	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Inferior 95%	
Intercepción	72,38872271	114,2999075	0,633322671	0,530888	-160,1561877	304,9336331	
670 nm	a	-105,6511203	139,8869696	-0,755260626	0,455449676	-390,2532999	178,9510593
	b	94,60097731	113,3322615	0,8347224	0,409876428	-135,9752425	325,1771971
	c	-0,366988279	0,335490284	-1,09388646	0,281925492	-1,049548394	0,315571836
	d	0,83880749	0,770965328	1,087996385	0,284479314	-0,729733264	2,407348245
785 nm	a	-54,22357763	196,9952317	-0,275253249	0,784837847	-455,01339	346,5662347
	b	-123,4803057	145,3938261	-0,84928163	0,4018439	-419,286269	172,3256577
	c	-0,772544222	0,866836528	-0,891222506	0,379262059	-2,536136398	0,991047954
	d	0,475721038	1,546864353	0,307538949	0,760365795	-2,671398151	3,622840226

ANÁLISIS DE LOS RESIDUALES

Observación	Pronóstico (kg)	Residuos	Valor real (kg)
1	13,33033801	0,869661987	14,2
2	13,24621169	1,15378831	14,4
3	13,51993209	0,480067911	14
4	13,55618791	0,643812091	14,2
5	13,40865145	0,591348551	14
6	13,38170567	-0,381705671	13
7	12,90293287	-0,50293287	12,4
8	13,42279356	-1,122793559	12,3
9	13,39606072	-0,796060718	12,6
10	13,45976644	0,140233558	13,6
11	13,4442935	-0,244293504	13,2
12	13,29072855	0,109271445	13,4
13	13,76409375	0,235906251	14
14	13,07042892	-0,570428919	12,5
15	13,13895689	-0,738956889	12,4
16	13,53494962	0,065050383	13,6
17	13,06488816	0,635111838	13,7
18	13,03554951	0,964450492	14
19	13,09617038	0,403829622	13,5
20	13,02076026	0,379239744	13,4
21	12,4807645	1,019235499	13,5
22	12,87290614	0,427093864	13,3
23	13,25151701	-0,451517005	12,8
24	13,09516427	0,304835732	13,4
25	13,58114479	-0,081144794	13,5
26	13,2769658	-0,2769658	13
27	13,44417492	0,155825084	13,6
28	12,81463627	-1,214636272	11,6
29	12,99351595	0,006484048	13
30	13,99488635	-0,994886349	13
31	13,78254508	0,617454921	14,4
32	13,26537284	0,23462716	13,5
33	13,50499879	-0,104998793	13,4
34	13,1549421	-0,154942102	13
35	12,95689702	0,243102979	13,2
36	13,86314872	-0,063148724	13,8
37	13,12478916	-1,124789162	12
38	13,29002604	-1,090026043	12,2
39	12,84375664	-1,043756637	11,8
40	13,69652274	0,10347726	13,8
41	13,65748211	0,542517887	14,2
42	13,3684428	0,631557196	14

Manzanas Fuji:

ANÁLISIS DE VARIANZA							
		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión		8	20,61216153	2,576520191	2,901582043	0,013270613	
Residuos		36	31,96694958	0,887970822			
Total		44	52,57911111				
		Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Inferior 95%
Intercepción		-66,92091986	119,6245992	-0,559424402	0,579336228	-309,5308519	175,6890121
670 nm	a	-93,76306416	113,95092	-0,822837272	0,416017915	-324,8662415	137,3401132
	b	38,04399273	54,22920496	0,701540669	0,487476382	-71,93793252	148,025918
	c	-0,358572569	0,300020293	-1,195161052	0,239838303	-0,967041926	0,249896787
	d	1,3805451	0,792639367	1,741706453	0,090099679	-0,227002045	2,988092246
785 nm	a	-93,35258174	144,0228566	-0,648178935	0,520982296	-385,4444731	198,7393097
	b	86,08334185	128,640414	0,669178054	0,507651006	-174,8115101	346,9781938
	c	-1,325602831	0,66348279	-1,997946067	0,053320666	-2,671208297	0,020002635
	d	0,875437918	1,272228061	0,688113983	0,495791345	-1,70476018	3,455636015

ANÁLISIS DE LOS RESIDUALES

Observación	Pronóstico (kg)	Residuos	Valor real (kg)
1	15,21081274	1,489187265	16,7
2	17,8852996	0,614700403	18,5
3	16,62391782	0,776082179	17,4
4	14,60270499	0,397295006	15
5	15,18898656	0,211013445	15,4
6	15,08766491	0,112335091	15,2
7	15,19606479	0,003935213	15,2
8	15,23798463	0,362015368	15,6
9	15,52421266	-0,32421266	15,2
10	15,61196863	-0,811968628	14,8
11	14,78689172	-0,086891719	14,7
12	15,26846411	-0,26846411	15
13	15,22486654	-1,624866543	13,6
14	14,87249364	-0,372493638	14,5
15	15,06965294	0,130347062	15,2
16	15,93500035	-0,035000347	15,9
17	15,69705566	-1,197055661	14,5
18	15,06498916	-0,864989156	14,2
19	14,46217041	-0,062170411	14,4
20	14,80253097	-0,202530971	14,6
21	14,66342674	-0,663426735	14
22	15,55055252	1,24944748	16,8
23	14,77716759	1,62283241	16,4
24	16,75807671	1,441923294	18,2
25	15,51964161	-2,019641606	13,5
26	15,60417176	-0,404171756	15,2
27	15,5554891	0,244510901	15,8
28	15,77867044	-0,378670438	15,4
29	15,03040338	0,369596617	15,4
30	14,96543925	-0,365439248	14,6
31	15,22014917	-0,020149165	15,2
32	15,12446744	2,075532563	17,2
33	16,24643718	-0,846437185	15,4
34	15,11845632	0,481543681	15,6
35	16,13859038	0,161409619	16,3
36	15,09891394	-0,098913941	15
37	14,51573443	1,484265574	16
38	14,6289673	-0,428967304	14,2
39	15,27955925	0,120440754	15,4
40	14,87174383	0,62825617	15,5
41	15,96705956	-1,467059562	14,5
42	14,76610462	-0,766104621	14
43	15,93725099	-0,537250987	15,4
44	16,4902686	-0,090268602	16,4
45	16,2395251	-0,039525099	16,2

Manzanas Kanzi®:

ANÁLISIS DE VARIANZA							
		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión		8	12,73273373	1,591591717	4,444047629	0,000819444	
Residuos		36	12,89304404	0,358140112			
Total		44	25,62577778				
		Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Inferior 95%
Intercepción		27,12653162	122,0611698	0,222237192	0,825385244	-220,4249947	274,6780579
670 nm	a	129,32442	152,9649414	0,845451375	0,403443269	-180,9028599	439,5517
	b	41,96962191	110,1281499	0,381098039	0,705370388	-181,3806182	265,319862
	c	0,512307102	0,27751184	1,846072954	0,073117173	-0,050512996	1,0751272
	d	-0,95721865	0,659017022	-1,452494576	0,155025143	-2,293767119	0,379329819
785 nm	a	-400,0356939	164,2291029	-2,435839244	0,019936528	-733,1077523	-66,9636355
	b	6,720383365	115,5946935	0,058137473	0,953960639	-227,7165211	241,1572878
	c	-2,658558079	0,719742851	-3,693761006	0,000729098	-4,118264238	-1,19885192
	d	3,023097603	1,260014118	2,399256929	0,021729484	0,467670529	5,578524677

ANÁLISIS DE LOS RESIDUALES

Observación	Pronóstico (kg)	Residuos	Valor real (kg)
1	13,15653155	0,243468449	13,4
2	11,93960079	0,560399215	12,5
3	13,4974075	0,502592497	14
4	12,93642942	0,263570583	13,2
5	13,03152865	-0,03152865	13
6	11,81425343	0,585746568	12,4
7	12,49189754	0,908102455	13,4
8	12,31268198	-0,312681976	12
9	12,08622579	-0,086225791	12
10	12,28308763	-0,583087634	11,7
11	12,26272207	0,237277927	12,5
12	12,60656824	-0,806568243	11,8
13	13,03421145	-0,034211452	13
14	12,67778748	-0,07778748	12,6
15	12,86686025	-0,66686025	12,2
16	13,59253884	-0,192538843	13,4
17	13,28542631	-0,785426308	12,5
18	13,33237842	-0,332378424	13
19	13,20564287	0,794357125	14
20	13,201872	0,598128003	13,8
21	12,76171878	0,838281222	13,6
22	11,9267465	0,573253501	12,5
23	11,90830568	0,091694318	12
24	12,12682526	0,273174739	12,4
25	12,51211383	-0,512113829	12
26	12,32903712	-0,12903712	12,2
27	11,98312817	0,516871826	12,5
28	11,48332911	-0,48332911	11
29	11,47008701	0,329912994	11,8
30	11,79739496	-0,297394956	11,5
31	13,3245164	1,075483602	14,4
32	13,03141867	0,568581329	13,6
33	12,89341826	0,606581735	13,5
34	12,42947201	-0,529472014	11,9
35	12,95556743	-0,655567429	12,3
36	12,8272548	-0,827254799	12
37	12,94932116	-0,749321159	12,2
38	12,68821252	-0,888212519	11,8
39	12,31424523	-0,714245227	11,6
40	12,91275341	0,187246591	13,1
41	12,59913004	0,100869965	12,7
42	12,8191996	-0,019199602	12,8
43	12,8756978	-0,275697802	12,6
44	13,24916375	-0,349163747	12,9
45	12,91629028	0,483709722	13,4

A.3.4. Comparativa de las medias aritméticas de SST obtenidas con refractómetro y el método Vis-NIR.

Manzanas Golden Delicious:

ANÁLISIS DE VARIANZA							
		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión		8	2,904677122	0,36308464	0,817960898	0,619620463	
Residuos		5	2,219449862	0,443889972			
Total		13	5,124126984				
		Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Inferior 95%
Intercepción		381,7721171	372,8258486	1,023995837	0,35280081	-576,6072373	1340,151471
670 nm	a	-962,8042765	458,4574997	-2,100094942	0,089742437	-2141,306798	215,6982447
	b	-352,4452386	323,734789	-1,088685092	0,325961672	-1184,632007	479,7415296
	c	-0,971323299	0,785645126	-1,236338477	0,271239536	-2,99088839	1,048241792
	d	2,449796951	1,826782934	1,34104436	0,237599387	-2,246098078	7,145691979
785 nm	a	-28,63234891	532,2923378	-0,053790646	0,959185038	-1396,933364	1339,668666
	b	-5,285802716	416,3140853	-0,01269667	0,990360829	-1075,455228	1064,883623
	c	-0,439348395	2,449148218	-0,179388243	0,864675876	-6,735084316	5,856387526
	d	2,6061889	4,089296504	0,637319621	0,55195177	-7,905682414	13,11806021

ANÁLISIS DE LOS RESIDUALES			
Observación	Pronóstico (kg)	Residuos	Valor real (kg)
1	13,59730058	0,602699417	14,2
2	13,80601612	-0,072682786	13,73333333
3	12,56599498	-0,132661649	12,43333333
4	13,15101274	0,248987263	13,4
5	13,30773619	-0,341069527	12,96666667
6	12,94528158	0,821385083	13,76666667
7	13,05977204	0,406894628	13,46666667
8	13,64999318	-0,483326509	13,16666667
9	13,28746762	0,079199048	13,36666667
10	13,05420723	-0,520873898	12,53333333
11	13,77620519	-0,009538525	13,76666667
12	13,23847442	0,094858909	13,33333333
13	12,51088235	-0,510882346	12
14	14,18298911	-0,182989107	14

Manzanas Fuji:

ANÁLISIS DE VARIANZA							
		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión		8	9,08540118	1,135675148	2,38172816	0,153153865	
Residuos		6	2,86096919	0,476828198			
Total		14	11,94637037				
		Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Inferior 95%
Intercepción		-407,7245871	420,902362	-0,968691611	0,370109481	-1437,635565	622,1863907
670 nm	a	24,49735346	309,2763693	0,079208617	0,939442396	-732,2746599	781,2693668
	b	208,3250687	109,4725119	1,902989757	0,105730628	-59,54451794	476,1946554
	c	-0,979615775	0,678219802	-1,444392764	0,198747338	-2,639159847	0,679928297
	d	2,988928321	1,884029264	1,586455358	0,163731898	-1,621125213	7,598981855
785 nm	a	573,2393311	591,6595868	0,968866801	0,370028846	-874,4995236	2020,978186
	b	236,8443824	424,0802028	0,558489599	0,59671991	-800,8424917	1274,531257
	c	0,084785961	1,554574018	0,054539674	0,958275889	-3,719119627	3,888691549
	d	-2,423864863	3,221544824	-0,752392096	0,480280987	-10,30670107	5,458971347

ANÁLISIS DE LOS RESIDUALES

Observación	Pronóstico (kg)	Residuos	Valor real (kg)
1	17,18817184	0,345161497	17,53333333
2	15,52339906	-0,323399059	15,2
3	15,09706327	0,23627006	15,33333333
4	14,58515263	0,248180707	14,83333333
5	14,34674066	0,086592669	14,43333333
6	15,06920782	-0,202541156	14,86666667
7	14,50792673	-0,174593396	14,33333333
8	16,1241534	1,009179933	17,13333333
9	15,70269894	-0,869365607	14,83333333
10	15,17582094	-0,042487607	15,13333333
11	15,76203223	0,171301099	15,93333333
12	15,7291822	-0,095848869	15,63333333
13	14,76063931	0,439360689	15,2
14	14,86776445	-0,201097779	14,66666667
15	16,62671318	-0,626713182	16

Manzanas Kanzi®:

ANÁLISIS DE VARIANZA							
		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión		8	4,268112468	0,533514059	1,357393671	0,364840398	
Residuos		6	2,358257902	0,393042984			
Total		14	6,62637037				
		Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Inferior 95%
Intercepción		-455,389708	529,6886147	-0,859730973	0,422952527	-1751,491057	840,7116409
670 nm	a	76,56903336	704,6529803	0,108662044	0,917013409	-1647,654695	1800,792762
	b	-100,9768779	438,9310459	-0,230051802	0,825694106	-1175,002456	973,0487001
	c	0,689708373	1,662795432	0,41478847	0,692719308	-3,379005475	4,758422222
	d	-0,91846513	4,054062943	-0,226554235	0,828291536	-10,83839979	9,00146953
785 nm	a	-78,70116583	574,744004	-0,136932557	0,895563397	-1485,049081	1327,646749
	b	639,3654721	638,0877412	1,002002438	0,355024921	-921,9789839	2200,709928
	c	-3,13452596	2,48126152	-1,263279156	0,253356771	-9,20595418	2,936902259
	d	2,973284922	5,443174061	0,546241015	0,60460153	-10,3456822	16,29225204

ANÁLISIS DE LOS RESIDUALES

Observación	Pronóstico (kg)	Residuos	Valor real (kg)
1	13,13523077	0,164769231	13,3
2	12,65284727	0,213819398	12,86666667
3	12,35524234	0,111424327	12,46666667
4	12,50545958	-0,50545958	12
5	13,00728067	-0,407280675	12,6
6	13,15672325	-0,190056588	12,96666667
7	12,92269354	0,877306459	13,8
8	11,67924855	0,620751453	12,3
9	12,26210526	-0,02877193	12,23333333
10	11,53063893	-0,097305597	11,43333333
11	13,40783305	0,425500282	13,83333333
12	12,38698434	-0,320317669	12,06666667
13	12,40521484	-0,538548178	11,86666667
14	12,92136866	-0,05470199	12,86666667
15	13,23779561	-0,271128945	12,96666667

ANEXO 4: Script Fiji.

```
/*
 * Imagej script to process several files in a folder with the
 * concentric circles plugin
 */

#@ File (label = "Input directory", style = "directory") input
#@ File (label = "Output directory", style = "directory") output
#@ String (label = "File suffix", value = ".jpg") suffix

setBatchMode(true);

OutputFile = output + File.separator + "Circle.txt";
ofile = File.open(OutputFile);

processFolder(input);

//saveAs("Results", OutputFile);

setBatchMode(false);

function processFolder(input) {
    list = getFileList(input);
    list = Array.sort(list);
    for (i = 0; i < list.length; i++) {
        if(File.isDirectory(input + File.separator + list[i]))
            processFolder(input + File.separator + list[i]);
        if(endsWith(list[i], suffix))
            processFile(input, output, list[i]);
    }
}

function processFile(input, output, file) {
    // Do the processing here by adding your own code.
    // Leave the print statements until things work, then remove them.
    //print("Processing: " + input + File.separator + file);
    //print("Saving to: " + output);
    run("Clear Results");
    open(input + File.separator + file);
    //run("Auto Crop (guess background color)");
    run("Measure");
    xm = getResult("XM");
    ym = getResult("YM");
    run("Clear Results");

    run("Concentric Circles", "circles=100 line=2 x="+xm+" y="+ym+" inner=2
outer=230 measure");

    selectWindow("Results");

    //print(count);
    //run("Close All");

    X=Table.getColumn("Radius"); // radio
    Y=Table.getColumn("Mean"); // intensidad

    s = 37.75; // Radio Golden
}
```

```

//s = 38.92; // Radio Fuji
//s = 38.82; // Radio Kanzi

d = 36; // Distancia^2

for (i=0; i<nResults; i++) {
    X[i] = s*atan(X[i]/sqrt(s*s-X[i]*X[i]/d));
    Y[i] = Y[i]*s/sqrt(s*s-X[i]*X[i]/d)/252;
}

// initialGuesses = newArray(6, 250, 54, 1); MLD4 sin correccion curva
initialGuesses = newArray(0.005, 1, 36, 10);
equation = "y = a + b/(1 + pow(x/c,d))";
Fit.logResults;
Fit.doFit(equation, X, Y, initialGuesses);

pp = file + " " + Fit.p(0) + " " + Fit.p(1) + " " + Fit.p(2) + " " + Fit.p(3)
+ " " + Fit.rSquared;
print(ofile,pp);
pp = "000";
}

```