



Diferentes aplicaciones de la imagen hiperespectral para garantizar la calidad de nectarina

S. Munera¹, N. Aleixos², J.M. Amigo³, S. Cubero¹, P. Talens⁴, J. Blasco^{1*}

¹ Centro de Agroingeniería, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Carretera CV-315, Km 10.7, 46113 Moncada, España; blasco_josiva@gva.es

² Departamento de Ingeniería Gráfica, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España.

³ Department of Food Sciences, Faculty of Science, University of Copenhagen. Rolighedsvej 30, Frederikberg C DK-1958, Dinamarca.

⁴ Departamento de Tecnología de Alimentos, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España.

Resumen: En este trabajo se ha estudiado la aplicación de la imagen hiperespectral en reflectancia y transmitancia para garantizar la calidad de manera no destructiva de tres variedades de nectarina: "Big Top", 'Diamond Ray' y 'Magique'. En primer lugar se evaluó la calidad de nectarinas 'Big Top' y 'Magique' durante su madurez poscosecha usando reflectancia y transmitancia. El índice de calidad interna (IQI) se utilizó para relacionar las propiedades fisicoquímicas como firmeza, color de la pulpa y sólidos solubles totales. Para ambos modos se obtuvieron resultados óptimos: en reflectancia se obtuvieron valores de R^2 de 0,90 y 0,88 para la predicción de IQI de 'Big Top' y 'Magique' utilizando 8 y 7 longitudes de onda, y en transmitancia se obtuvieron valores de R^2 de 0,88 y 0,86 utilizando 13 y 9 longitudes de onda. Debido a la susceptibilidad de 'Big Top' de presentar huesos abiertos, se estudió la aplicación de imágenes en transmitancia para su detección. Como resultado, el 100 % de las frutas que presentaban hueso abierto y el 91% con hueso normal fueron clasificadas correctamente. Por último, se aplicó esta técnica en reflectancia para discriminar las variedades estudiadas. Como resultado se clasificaron correctamente el 98 % y 95 % de las frutas de cada variedad usando 14 longitudes de onda, mientras que un panel visual compuesto por expertos solamente pudo distinguirlas con una tasa de éxito cercana al 50 %. Todos estos resultados confirman el gran potencial de la imagen hiperespectral para la evaluación de la calidad de nectarinas en líneas de manipulación haciendo posible la oferta de productos más adecuados para el consumidor.

Palabras clave: madurez, hueso abierto, no destructivo, reflectancia, transmitancia

1. Introducción

La nectarina es una de las frutas que mayor esfuerzo le ha sido dedicado para mejorar su rendimiento agronómico y mejorar la apariencia y calidad [1], lo que ha resultado en un aumento significativo en la cantidad de nuevas variedades disponibles para los productores de fruta. Sin embargo, este esfuerzo no se ha traducido en un aumento en el consumo. Esto es debido a que la fruta se cosecha muy temprano, resultando a menudo carente de sabor y con una firmeza excesiva, y a una falta de identificación del producto [2]. Por otro lado, existe el problema del hueso abierto que puede afectar a un 45 % de las frutas. Este fenómeno consiste en la división del hueso a lo largo del endocarpio, lo que hace que las dos mitades se separen entre sí dentro del mesocarpio. Cuando esto ocurre, pueden desarrollarse problemas de

podredumbres mucho más rápido y existe un mayor riesgo de que la enfermedad se propague más rápidamente a otras frutas durante las operaciones de almacenamiento o comercialización posteriores a la cosecha [3]. Por lo tanto, sería necesaria una evaluación previa de la calidad para ofrecer a los consumidores las frutas que mejor se adapten a sus preferencias.

La evaluación interna de la calidad de las frutas de hueso se ha llevado a cabo tradicionalmente mediante métodos destructivos, que son caros, contaminantes, requieren mucho tiempo y solo se pueden controlar unas pocas muestras aleatorias por lote. Existe, por lo tanto, una necesidad de desarrollar metodologías no destructivas e instantáneas que permitan determinar de una manera objetiva la calidad de la fruta.

La imagen hiperespectral es una técnica de visión artificial que combina imágenes digitales convencionales con espectroscopia que permite detectar características de la fruta en regiones del espectro electromagnético donde el ojo humano no es capaz de detectarlas, como las regiones ultravioleta o infrarroja [4]. Esta técnica se está empezando a explorar como una herramienta científica para garantizar la calidad de una amplia gama de alimentos. Dentro de las frutas de hueso, el melocotón ha sido el más estudiado, por ejemplo, para estimar su madurez [5], firmeza [6] o daños [7]. En cuanto a la nectarina, esta técnica fue usada para detectar daños [8].

El objetivo de este trabajo ha sido proponer diferentes aplicaciones de la imagen hiperespectral junto con métodos de análisis multivariante para evaluar la calidad de la nectarina, desarrollando modelos estadísticos predictivos que permitan monitorear su madurez, detectar el fenómeno de hueso abierto y discriminar variedades similares.

2. Materiales y métodos

2.1. Muestras

Para el estudio de la madurez y detección de huesos abiertos se usaron un total de 168 nectarinas 'Big Top' y 168 nectarinas 'Magique'. La fruta se cosechó en un huerto comercial en Lérida (España) en su período de madurez comercial y se agrupó en 6 lotes de 28 frutas, donde 5 lotes se almacenaron en condiciones controladas (15 °C, 90 % HR) hasta la senescencia. La adquisición de las imágenes y los análisis de la variedad 'Big Top' se realizaron antes de su almacenamiento y después del 1º, 2º, 3º, 5º y 8º día de almacenamiento. Para las nectarinas 'Magique' se realizaron antes del almacenamiento y después del 2º, 4º, 7º, 10º y 14º día.

Inicialmente, ninguna fruta presentó signos externos de hueso abierto. El experimento para detectar este fenómeno se llevó a cabo después de la adquisición de las imágenes. Un total de 137 frutas 'Big Top' de 168 (81,5 %) presentaron hueso normal y 31 (18,5 %) abierto. En el caso de las frutas de la variedad 'Magique', ninguna presentó este fenómeno.

Para la discriminación de variedades se utilizaron frutas de las variedades 'Diamond Ray' y 'Big Top' porque son consideradas como referencia de variedades ácidas y dulces [9], y presentan una apariencia muy similar. Se seleccionaron un total de 125 frutas de cada variedad sin defectos o moratones y se almacenaron en condiciones controladas (1 °C; 90 % HR) para evitar una mayor maduración durante el experimento.

2.2. Adquisición y procesamiento de las imágenes hiperespectrales

Las imágenes hiperespectrales de las frutas intactas se obtuvieron por medio de una cámara industrial (CoolSNAP ES, Photometrics, AZ, USA) acoplada a dos filtros sintonizables de cristal líquido (Varispec VIS-07 and NIR-07, Cambridge Research & Instrumentation, Inc., MA, USA), capaces de adquirir imágenes en reflectancia entre 450 nm y 1040 nm y en transmitancia entre 630 nm y 900 nm. El sistema se configuró para capturar imágenes de 1392 x 1040 pixels con una resolución espacial de 0,14 mm/pixel cada 10 nm. De esta forma, se obtuvo el espectro de la nectarina en ese rango espectral en cada uno de los píxeles de la imagen. En

reflectancia, la iluminación consistió en 12 halógenos que iluminaron la escena indirectamente por medio de la reflexión difusa, en una cúpula de aluminio donde las nectarinas se introducían manualmente. En el caso de la transmitancia la fruta se colocó entre la cámara y el sistema de iluminación.

Una vez capturadas las imágenes, se obtuvo el espectro promedio de todos los píxeles de la nectarina utilizando el programa HYPER-Tools [10] para MATLAB (The MathWorks, Inc. MA, EE. UU.).

2.3. Análisis de referencia

La caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las frutas se realizó tras la toma de imágenes. La firmeza se registró en los dos lados opuestos de la fruta usando un texturómetro (XT2 Stable. MicroSystems Haslemere, Reino Unido). Después, se tomó una muestra de zumo para la medición de los sólidos solubles usando un refractómetro digital (RFM330-VWR, Internacional Eurolab S.L., Barcelona) y se midió la acidez usando un pH-metro (pH-Burette 24, Crison, Barcelona). Los resultados se expresaron como porcentaje de sólidos solubles y porcentaje de ácido málico, respectivamente.

Las coordenadas de color en los espacios CIELAB y CIELCH L^* , a^* , b^* , h^* , C^* , de la piel y la pulpa de cada fruta se obtuvieron mediante el uso de un colorímetro (Minolta-cm-700d, Minolta Co. Tokio, Japón).

El índice de calidad interna (IQI) se calculó utilizando la Ecuación (3) [11]. Este índice relaciona las propiedades fisicoquímicas internas con una percepción sensorial de su madurez.

$$IQI = \ln \frac{100 \times F \times L^* \times h^*}{TSS \times C^*} \quad (3)$$

Para la discriminación de variedades se realizó además un análisis visual llevado a cabo por un panel semientrenado compuesto por cinco panelistas (tres hombres y dos mujeres de entre 29 y 50 años). Cada panelista fue entrenado previamente con 20 imágenes en color (10 de cada variedad). Después se les presentó un total de 40 imágenes de nectarina (20 de cada variedad) aleatoriamente para que las clasificaran como pertenecientes a la variedad 'Diamond Ray' o 'Big Top'.

Finalmente se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y un test de Tukey para determinar la existencia de diferencias estadísticas entre los diferentes días de análisis en el estudio de la madurez y entre las variedades de acuerdo a sus propiedades fisicoquímicas.

2.4. Análisis multivariante

Para predecir las propiedades de las frutas se utilizó la regresión basada en mínimos cuadrados parciales (PLS-R). En el caso de la detección de frutas con hueso abierto y normal y la discriminación de variedades, se realizó con un análisis discriminante basado en mínimos cuadrados parciales (PLS-DA). Para la construcción de los modelos se usaron dos tercios de las muestras y el tercio restante se utilizó para validarlos. Los resultados de los modelos PLS-R fueron expresados en base al coeficiente de determinación (R^2), al error cuadrático medio (RMSE) y a la desviación predictiva residual (RPD), definida como la relación entre la desviación estándar de los datos de referencia y RMSE de la validación externa, y que indica el poder de predicción del modelo [11]. En cuanto a los obtenidos por los modelos PLS-DA, fueron basados en el porcentaje de frutas correctamente clasificadas.

3. Resultados y discusión

3.1. Monitorización de la madurez de nectarinas 'Big Top' y 'Magique'

La Tabla 1 muestra los resultados de la predicción del índice de calidad IQI para las variedades 'Big Top' y 'Magique' usando reflectancia y transmitancia. En general, se obtuvieron predicciones óptimas para las dos variedades usando los dos modos. Usando reflectancia para la variedad 'Big Top', los valores de R² y RMSE fueron 0,89 y 0,33 y para 'Magique', estos valores fueron 0,89 y 0,44, respectivamente. En el caso de la transmitancia, esos valores fueron similares. Cuando se seleccionó un conjunto óptimo de longitudes de onda para cada variedad y modo, 8 longitudes de onda para 'Big Top' en reflectancia y 9 en transmitancia, 7 longitudes de onda para 'Magique' en reflectancia y 7 en transmitancia, los valores de R² se mantuvieron similares a los obtenidos usando todas las longitudes de onda para las dos variedades y modos.

Según [12] y los valores de RPD obtenidos, todos los modelos obtuvieron una precisión excelente en la predicción de IQI. Por lo tanto, el uso de ambos modos tuvo un gran potencial para estimar la calidad de las nectarinas.

Tabla 1. Resultados de la predicción del índice de calidad interna del set de validación externo de nectarinas 'Big Top' y 'Magique' usando reflectancia y transmitancia.

Modo	Índice de calidad (IQI)					
	'Big Top'			'Magique'		
	R ²	RMSE	RPD	R ²	RMSE	RPD
Reflectancia (60 λ)	0,89	0,33	3,0	0,89	0,44	2,7
Reflectancia (8 y 7 λ)	0,90	0,32	3,1	0,88	0,44	2,7
Trasmitancia (28 λ)	0,89	0,34	2,7	0,88	0,43	2,8
Transmitancia (9 y 7 λ)	0,88	0,35	2,7	0,89	0,40	3,0

RMSE = error cuadrático medio; RPD = desviación predictiva residual.

3.2. Detección de huesos abiertos en nectarinas 'Big Top'

EL modelo PLS-DA para la detección de huesos abiertos obtuvo una precisión total del 93,0 %, clasificándose correctamente el 91,3 % de las frutas con hueso normal y el 100 % de las frutas que presentaban hueso abierto (Tabla 2). Se seleccionaron un total de 7 longitudes de onda (630, 670, 680, 700, 740, 800 y 870 nm) y se desarrolló un nuevo modelo PLS-DA. Los resultados (Tabla 2) fueron mejores que los obtenidos utilizando el espectro completo, aumentando la precisión total del 93,0 % al 94,7 %.

Tabla 2. Resultados de la detección de hueso abierto en el set de validación externo de nectarinas 'Big Top' usando transmitancia.

λ	Clase	Normal	Abierto	% frutas clasificadas correctamente	% total de clasificación correcta
28	Normal	42	4	91,3	93,0
	Abierto	0	11	100	
7	Normal	43	3	93,5	94,7
	Abierto	0	11	100	

Para detectar este fenómeno, se utilizaron imágenes de rayos X [13] en melocotón y se obtuvo una precisión de clasificación total del 95,5 % utilizando 94 frutas normales, 5 con hueso agrietado y 99 con hueso abierto y de diferentes variedades. También se estudió el uso de un método de vibración acústica [14] que obtuvo una precisión de clasificación total del 97,8 % utilizando 256 frutas normales y 57 frutas con hueso abierto y de la misma variedad y etapa de madurez. Comparando estos resultados con los obtenidos en este trabajo, se puede afirmar que la imagen hiperespectral es una alternativa viable para la detección de huesos abiertos, especialmente teniendo en cuenta la alta precisión en la identificación de frutas que sufren este fenómeno independientemente de la etapa de madurez de las frutas.

3.3. Discriminación de las variedades 'Big Top' y 'Diamond Ray'

La discriminación de las nectarinas 'Big Top' y 'Diamond Ray' se realizó usando la imagen hiperespectral, la medida de color y un panel semientrenado. Como muestra la Tabla 3, prácticamente la mitad de las frutas clasificadas visualmente por el panel fueron erróneas, lo que demuestra la dificultad del ojo humano para distinguir entre estas dos variedades de nectarinas. La clasificación obtenida por el modelo PLS-DA usando color tuvo una precisión similar a la del panel (56,9 %), lo que indica que únicamente el color no es adecuado para este tipo de inspección de calidad. Estos resultados de clasificación fueron bajos en comparación con los resultados obtenidos por la imagen hiperespectral. Cuando se usó la información espectral de las 60 longitudes de onda, las dos variedades se clasificaron con un éxito superior al 94 %.

Tabla 3. Resultados de la discriminación del set de validación externa de nectarinas 'Big Top' y 'Diamond Ray' usando un panel entrenado, color e imagen hiperespectral.

Método	% frutas de cada variedad clasificadas correctamente		% total de clasificación correcta
	'Diamond Ray'	'Big Top'	
Análisis visual (panel)	54,0	55,0	54,5
Color (L*, a*, b*)	64,8	49,0	56,9
Imagen hiperespectral (60 λ)	94,4	94,4	94,4
Imagen hiperespectral (14 λ)	94,8	97,8	96,3

Para agilizar el proceso de clasificación, se seleccionaron un total de 14 longitudes de onda. El nuevo modelo PLS-DA obtuvo un porcentaje mayor de clasificación total (96,3 %) resultando mejor clasificada la variedad 'Big Top' (Tabla 3).

Estos resultados concuerdan con un trabajo previo [15] en el que se utilizaron imágenes hiperespectrales e imágenes de color para discriminar entre cuatro variedades de uva roja. Solo el 52 % de las muestras se clasificaron correctamente utilizando imágenes de color. Sin embargo, el éxito aumentó al 86 % cuando se usaron imágenes hiperespectrales. Por otro lado, previamente se desarrolló un sistema en línea [16] para la verificación de variedades de nectarina usando características de color con un éxito del 100 % al comparar tres variedades con otra variedad de referencia. En el mismo experimento, la clasificación visual con un panel logró el 86 % de clasificación correcta. El elevado éxito de clasificación obtenido tanto por el sistema automático como por el panel visual se debió, probablemente, a las grandes diferencias existentes entre las variedades estudiadas.

4. Conclusiones

Este trabajo muestra diferentes aplicaciones de la imagen hiperespectral para garantizar la calidad de nectarinas.

La monitorización de la madurez de las variedades 'Big Top' y 'Magique' se llevó a cabo usando imágenes en reflectancia y transmitancia y el índice de calidad interna IQI obtenido a partir de la medición destructiva de las propiedades fisicoquímicas de las frutas. Los modelos PLS-R obtuvieron una predicción óptima para ambas variedades usando reflectancia y transmitancia, con valores de R² alrededor de 0,90 usando todas las longitudes de onda y las seleccionadas como óptimas.

La detección de frutas con hueso abierto en la variedad 'Big Top' fue exitosa, logrando una clasificación por medio de PLS-DA del 100 % para frutas con hueso abierto y 91,3 % para frutas de hueso normal utilizando todas las longitudes de onda capturadas. Cuando se seleccionaron 7 longitudes de onda óptimas, estos resultados fueron del 100 % y 93,5 % respectivamente.

Por último, los resultados de la discriminación entre las variedades 'Big Top' y 'Diamond Ray' mediante el uso de color o por un panel capacitado fueron muy pobres, con una precisión de solo 56,9 % y 54,5 %, respectivamente. Sin embargo, el uso de la imagen hiperespectral permitió la clasificación con una mayor precisión que los sistemas tradicionales manuales, proporcionando una precisión de clasificación del 94,4 % y 96,3 % usando todas las longitudes y las 14 seleccionadas, respectivamente.

Estos resultados confirman el gran potencial de esta técnica para evaluar la calidad de nectarinas de diferentes variedades. Sin embargo, los resultados obtenidos deben confirmarse en un número mayor de frutas cultivadas en diferentes áreas y cosechadas en diferentes etapas de madurez antes de que pueda implementarse en un sistema en línea.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por fondos del INIA y FEDER a través del proyecto RTA2015-00078-00-00. Sandra Munera agradece al INIA el contrato FPI-INIA núm. 43 (CPR2014-0082), parcialmente financiado por fondos de la Unión Europea FSE.

Referencias

1. Reig G., Alegre S., Gatus F., Iglesias I. Agronomical performance under Mediterranean climatic conditions among peach [*Prunus persica* (L.) Batsch] cultivars originated from different breeding programs, *Scientia Horticulturae*. 2013, 150, 267–277.
2. Iglesias I., Echeverría G. Differential effect of cultivar and harvest date on nectarine colour, quality and consumer acceptance, *Scientia Horticulturae*. 2009, 120, 41–50.
3. Tani E., Polidoros A.N., Tsiftaris A.S. Characterization and expression analysis of FRUITFULL-and SHATTER-PROOF-like genes from peach (*Prunus persica*) and their role in split-pit formation. *Tree physiology*. 2007, 27, 649-659.
4. Lorente D., Aleixos N., Gómez-Sanchis J., Cubero S., García-Navarrete O.L., Blasco J. Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment, *Food Bioprocess Technology*. 2012, 5, 1121–1142.
5. Herrero-Langreo A., Lunadei L., Lleó L., Diezma B., Ruiz-Altisent M. Multispectral Vision for Monitoring Peach Ripeness, *Journal of Food Science*. 2011, 2, 178-187.
6. Zhu N., Lin M., Nie Y., Wu D., Chen K. Study on the quantitative measurement of firmness distribution maps at the pixel level inside peach pulp, *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016, 130, 48–56.
7. Sun Y., Gu S., Sun K., Hu H., Xu M., Wang Z., Tu K., Pan L. Hyperspectral reflectance imaging combined with chemometrics and successive projections algorithm for chilling injury classification in peaches, *LWT - Food Science and Technology*. 2017, 75, 557-564.

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA

3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

8. Huang F., Zhang S., Yang Y., Man Z., Zhang X., Wu Y. Application of hyperspectral imaging for detection of defective features in nectarine fruit, *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2015, 11, 252-259.
9. Reig G., Iglesias I., Echeverría G. Agronomical performance, fruit quality and sensory attributes of several flat peach and flat nectarine cultivars. VII International Peach Symposium. 2009, 962. pp. 563-569.
10. Mobaraki N., Amigo J.M. HYPER-Tools. A graphical user-friendly interface for hyperspectral image analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2018, 172, 174-187.
11. Cortés V., Ortiz C., Aleixos N., Blasco J., Cubero S., Talens P. A new internal quality index for mango and its prediction by external visible and near-infrared reflection spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*. 2016, 118, 148-158.
12. Williams P.C. Variables affecting near-infrared reflectance spectroscopic analysis. In: Williams P., Norris K. (Eds.), *Near-infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, 1987, pp. 143-166.
13. Han Y.J., Bowers S.V., Dodd R.B. Nondestructive detection of Split-pit peaches. *Transactions of the ASAE*. 1992, 35, 2063-2067.
14. Nakano R., Akimoto H., Fukuda F., Kawai T., Ushijima K., Fukamatsu Y., Kubo Y., Fujii, Y., Hirano K., Morinaga K. Sakurai, N. Nondestructive detection of split pit in peaches using an acoustic vibration method. *The Horticulture Journal*. 2018, 87, 281-287.
15. Nogales-Bueno J., Rodríguez-Pulido F.J., Heredia F.J., Hernández-Hierro J.M. Comparative study on the use of anthocyanin profile, color image analysis and near-infrared hyperspectral imaging as tools to discriminate between four autochthonous red grape cultivars from LaRioja (Spain), *Talanta*. 2015, 131, 412-416.
16. Font D., Tresanchez M., Pallejà T., Teixidó M., Martínez D., Moreno J., Palacín, J. An image processing method for in-line nectarine variety verification based on the comparison of skin feature histogram vectors, *Computers and Electronics in Agriculture*. 2014, 102, 112-119.