



Uso de las imágenes hiperespectrales e imágenes digitales en bayas: Anomalías, enfermedades, daños mecánicos, firmeza, madurez y morfometría

Use of hyperspectral images and digital images in berries: Anomalies, diseases, mechanical damage, firmness, maturity and morphometry

Aleida Araceli Aguilar-Sánchez¹; Andy Miguel Valverde-Reyes^{1,*}

1 Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n, Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

*Autor correspondiente: valverdeagroindustria@gmail.com (A. M. Valverde-Reyes).

ID ORCID de los autores

A. A. Aguilar-Sánchez:  <https://orcid.org/0000-0002-7806-6451> A. M. Valverde-Reyes:  <https://orcid.org/0000-0003-3600-4508>

RESUMEN

Existen distintos tipos de bayas, uno de los más conocidos, nutritivos e importantes es el arándano. El procesamiento moderno de estos frutos garantiza alta calidad, mejor comercialización del producto y una estimación de su vida útil. El objetivo de esta revisión fue proporcionar información científica de las características fisicoquímicas de diferentes bayas empleando tecnología de imágenes hiperespectrales e imágenes digitales. Estas tecnologías presentan tendencias con resultados satisfactorios en variados campos tecnológicos y de investigación. Los hallazgos obtenidos demuestran que, la tecnología de imágenes hiperespectrales y la tecnología de imágenes digitales ha sido de mucho interés en los últimos años, debido a que son tecnologías no destructivas, que permiten tener buenas predicciones en la detección de anomalías en las bayas, considerándolas herramientas robustas, confiables y con alto potencial de uso en la gran industria en la evaluación de la calidad de las bayas haciendo posible la oferta de productos más adecuados para el consumidor. Con el avance de la tecnología se presentan posibilidades de nuevo estudios futuros para obtener modelos más rápidos de procesar y con mayor precisión estadística.

Palabras clave: Tecnología NIR; Imágenes hiperespectrales; redes neuronales; baya; detección no destructiva.

ABSTRACT

There are different types of berries, one of the best-known, nutritious and important is the blueberry. The modern processing of these fruits guarantees high quality, better marketing of the product and an estimate of its useful life. The aim of this review was to provide scientific information on the physicochemical characteristics of different berries using hyperspectral imaging technology and digital imaging. These technologies present trends with satisfactory results in various technological and research fields. The findings obtained show that hyperspectral imaging technology and digital imaging technology have been of great interest in recent years, because they are non-destructive technologies, which allow good predictions in the detection of anomalies in berries, considering them Robust, reliable tools with high potential for use in the large industry in evaluating the quality of berries, making it possible to offer more suitable products for the consumer. With the advancement of technology, new possibilities for future studies are presented to obtain models that are faster to process and with greater statistical precision.

Keywords: NIR technology; hyperspectral images; neural networks; berry; non-destructive detection.

Recibido: 11-12-2022.
Aceptado: 05-03-2023.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCCIÓN

El reciente aumento mundial de la demanda de alimentos ricos en nutrientes y de alta calidad, provocó un fuerte énfasis en los métodos no destructivos de evaluación con precisión y alta sensibilidad para diferentes fitoquímicos. Recientemente, muchas revisiones han discutido el uso de imágenes espectrales no destructivas y técnicas espectroscópicas para diferentes aplicaciones alimentarias y agrícolas, como la exploración del contenido de licopeno, la maduración y la madurez de las frutas y la evaluación de la calidad de bebidas alcohólicas y especias (Hussain, Pu, & Sun, 2019; Arslan et al., 2021). Una permanente preocupación que representa para los productores de alimentos altamente demandados tanto por el mercado nacional como internacional, es la prolongación de la vida útil de los mismos, según Alapont, Soriano, & Torrejón (2020), las diferentes maneras en que un alimento se deteriora y altera pueden ser muy complejas. Comúnmente pueden darse en simultáneo varios mecanismos de deterioro que pueden conllevar a otro tipo de deterioro. Resulta indispensable tener amplio conocimiento de estos mecanismos puesto que, permitirá planificar el procedimiento para determinar su vida útil; debido a esto, nacen diversas herramientas y nuevas técnicas para la detección temprana del problema señalado. Tecnología de imágenes hiperespectrales (HSI), obtiene por ejemplo un papel importante en esta área, ya que es una herramienta no destructiva que recopila información del alimento a lo largo de todo el espectro electromagnético, capaces de

almacenar datos de la imagen invisibles a simple vista (Sánchez, 2017). Del mismo modo, la tecnología de imágenes digitales involucra metodologías que son útiles para obtener información cuantitativa permitiendo evaluar de manera no destructiva y objetiva, por ejemplo, el color (parámetro utilizado para evaluar el estado de maduración de frutos). En fin, estas técnicas de visualización presentan un objetivo común que consiste en facilitar al observador su análisis y estudio, proporcionando herramientas que permiten predecir el tiempo de vida útil de los alimentos.

Diferentes tipos de baya con bastante valor nutritivo como el arándano (*Vaccinium myrtillus*) vienen experimentando en los últimos años un auge en su cultivo en el Perú, según datos estadísticos del Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (2022), el primer semestre del 2022, se incrementó en 118,4% con respecto al similar semestre del año anterior debido a las mayores áreas sembradas impulsada por la alta demanda externa de este cultivo; sin embargo, estos frutos son muy perecederos debido a que presentan una tasa respiratoria elevada (Santa Cruz, 2018), por ende el objetivo de la presente investigación, es discutir sobre la aplicación de tecnologías no destructivas como lo son las imágenes hiperespectrales e imágenes digitales a diferentes tipos de bayas, para así pronosticar posibles mermas que conlleven a un aumento de costos en las empresas productoras de estos perecederos frutos.

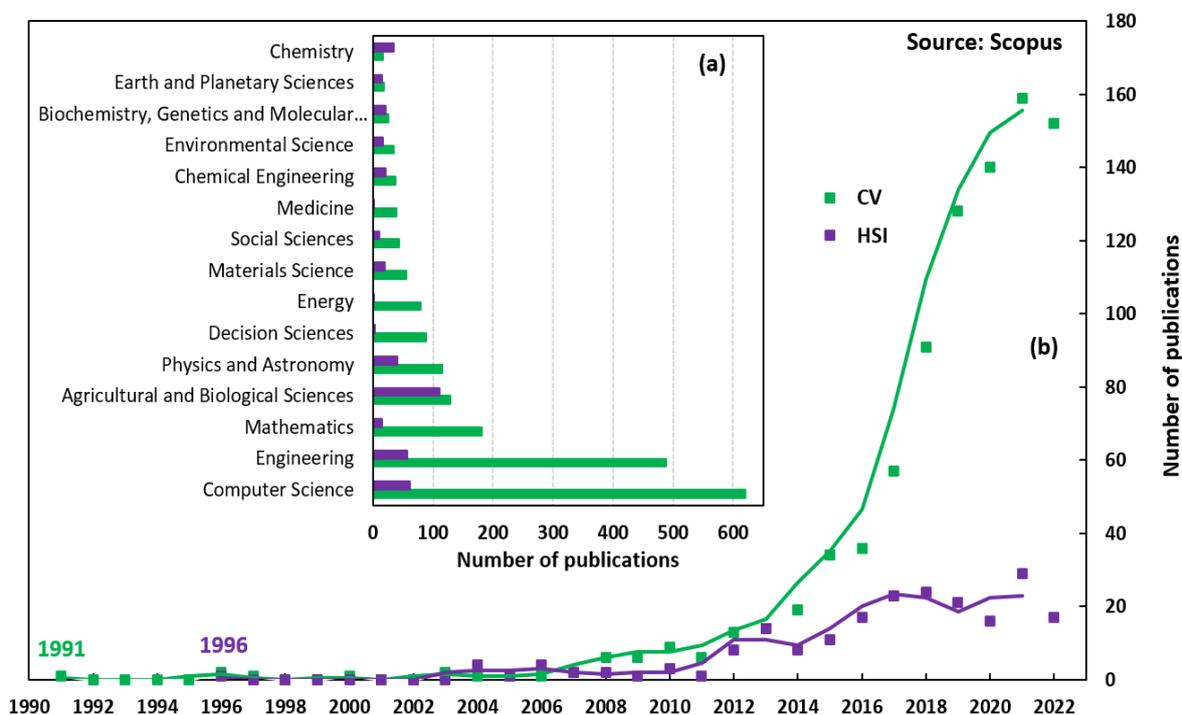


Figura 1. Número de artículos publicados desde 2004 hasta 2022 sobre aplicación de tecnología hiperespectral en diferentes tipos de bayas. a) Información obtenida de la base de datos Scopus. Criterio de búsqueda (TITLE (blueberry OR raspberry OR strawberry OR blackberry OR cherry OR mulberry OR berries) AND TITLE-ABS-KEY (hyperspectral) AND TITLE-ABS-KEY ("each group of application")). b) Información obtenida de la base datos Scopus. Criterio de búsqueda (TITLE (blueberry OR raspberry OR strawberry OR blackberry OR cherry OR mulberry OR berries) AND TITLE-ABS-KEY (hyperspectral)).

Tabla 1

Evaluación de enfermedades, anomalías y daños mecánicos en diferentes tipos de baya, aplicando tecnología hiperspectral

Tipo de baya	Metodología	Equipo	Longitud espectral	Resultados	Referencia
Fresa	Detección de anomalías para datos hiperspectrales denominado SSC-AE	Instrumento de imágenes hiperspectrales NIR	1000 - 1600 nm	El SSC-AE se degradó correctamente y superó todos los métodos de comparación en todos los niveles de impurezas	(Liu, et al., 2022).
	Modelo de clasificación de red neuronal convolucional (CNN) y tecnología de espectroscopia	Cámara oscura equipada con un microHSI™	400 - 1000 nm	El modelo de clasificación puede dar diagnóstico temprano de enfermedades del moho gris y antracnosis	(Jung et al., 2022); (Jiang et al., 2021); (Lu et al., 2017); (Yeh et al., 2016).
	Las imágenes se clasificaron por mapeador de ángulo espectral (SAM)	Sistema HSI de exploración lineal	475-900 nm	El método SAM obtuvo una precisión 84% en la identificación de la enfermedad de mancha blanca	(Cheshkova, 2022)
	Se evaluó HSI y la nariz electrónica (E-nose) para detectar el contenido microbiano	Sistema HSI visible/infrarrojo cercano a escala de laboratorio	400 y 1000 nm 681 y 1292 nm	Técnicas potenciales para la detección de la calidad de las fresas	(Liu et al., 2019); (Siedliska, et al., 2018).
	Detección de pudrición fúngica usando reflectancia en el infrarrojo cercano	NIR-HSI y Sistema HPLC	1000-2500 nm	Se detecta la descomposición y los componentes del azúcar en las fresas.	(Liu et al., 2019)
	Procesamiento de imágenes combinado con análisis de espectros para identificar fresas defectuosas	Sistema de imágenes de reflectancia hiperspectral	400 - 1010 nm	La tecnología de imágenes de reflectancia hiperspectral tiene el potencial para identificar fresas defectuosas	(Liu et al., 2018)
Arándano	Fusión de información de HSI y resonancia magnética nuclear de bajo campo (LF-NMR)	Sistema HSI Y Sistema LF-NMR	400 a 1000 nm	Es factible fusionar la información de HSI y LF-NMR para detectar frutos de arándanos podridos	(Shicheng, Youwen, Qinghu, Shiyuan, & Ping, 2021); (Qiao, Zhang, & Pei, 2020).
	Evaluación de datos espectrales durante tres etapas de desarrollo de arándanos silvestres	Espectrómetro de imágenes hiperspectrales Micro A-Series	400 a 1000 nm	Se detecto el estrés hídrico en los campos de arándanos silvestres gracias a la tecnología HSI	(Chan, Nelson, Hayes, Zhang, & Hall, 2021).
	Tecnología HSI para detectar daños en los cogollos inducidos por congelamiento.	Sistema HSI de barrido lineal	517 a 1729nm	Longitudes de onda sobresalientes (706, 723, 872, 1384 y 1591 nm) que detectan daños por congelamiento	(Gao, Zhao, Hoheisel, Khot, & Zhang, 2021); (Gao, Zhao, Khot, Hoheisel, & Zhang, 2019).
	Potencial de HSI en el rango espectral de 400 a 1000 nm para discriminar enfermedades tempranas en arándanos	HSI en modo de reflectancia	400 a 1000 nm	Este estudio demostró que es factible usar HSI para medir las enfermedades tempranas de los arándanos	(Huang, Wang, Liu, Zhou, & Sun, 2020).
	Detectar con precisión el hematoma interno de los arándanos, después del daño mecánico mediante HSTI	HSI basado en un filtro sintonizable de cristal líquido	950 nm a 1650 nm	HSTI Se puede aplicar 30 minutos después de que se haya infligido daño mecánico a los arándanos	(Zhang, Li, & Yang, 2020); (Fan et al., 2018); (Wang, Hu, & Zhai, 2018); (Hu, Zhao, & Zhai, 2018); (Fan et al., 2017); (M., C., F., & F., 2017); (Jiang, Li, & Li, 2016); (Hu et al. 2016).
	Probar la sacarinidad de tres variedades de tomates cherry con HSI	Sistema HSI con imagen de barrido de empuje ImSpectorN17E espectrómetro	914.91nm y 1661.91nm 450 - 1000nm	Este estudio sirve de base para la clasificación industrial de la sacarinidad de los tomates cherry de forma no destructiva	(Liu, Shi, Zhang, Shi, & Long, 2020); (Siedliska, Baranowski, Zubik, & Mazurek, 2017); (Siedliska, Zubik, Baranowski, & Mazurek, 2017).
Cereza	Imagen de fluorescencia multiespectral para el diagnóstico para la detección no destructiva de tomates cherry defectuosos	Sistema HSI con imagen de fluorescencia multiespectral	" "	La imagen de fluorescencia multiespectral es una herramienta de clasificación para detectar defectos de agrietamiento en tomates cherry	(Cho et al., 2013).
	Sistema HFI/NIR para predecir la distribución de residuos de plaguicidas en las hojas de morera	Microscópio electrónico de barrido (SEM)	" "	El mapa de distribución de residuos de pesticidas mostraba la distribución de residuos de pesticidas en las hojas de morera	(Jiang et al., 2017).
Mora	Desarrollo un sistema HSI en la región visible e infrarroja cercana (NIR)	Espectrógrafos	400-1000 nm	HSI visibles e infrarrojas cercanas podrían distinguir las larvas de <i>Diaphania pyloalis</i>	(Huang et al., 2018).
Frambuesa	Información detallada sobre la reflectancia espectral de la planta	Escáneres que trabajaron en un método de escaneo de línea de barrido	400 a 896 nm 895 a 2506 nm	Buena correlación entre las mediciones manuales y automatizadas confirman el valor del método de segmentación	(Williams et al., 2017).

Del mismo modo Huang et al. (2018) realizaron un estudio donde tuvieron como objetivo desarrollar un sistema de imágenes hiperespectrales en la región visible e infrarroja cercana (NIR) (400–1700 nm), los resultados de este estudio determinaron que las imágenes hiperespectrales visibles e infrarrojas cercanas podrían distinguir las larvas de *Diaphania pyloalis* y su daño de la vena de la hoja y el mesófilo sano de una manera rápida y no destructiva. Las imágenes hiperespectrales son una tecnología que se puede utilizar para monitorear las respuestas de las plantas al estrés, estas tienen un espectro completo para cada píxel de la imagen, brindando información detallada sobre la reflectancia espectral de la planta. Si bien esta tecnología se ha utilizado en condiciones de iluminación controlada en laboratorio para la detección temprana de enfermedades de las plantas, la transferencia de dicha tecnología para obtener imágenes de plantas en condiciones de

campo presenta una serie de desafíos, por consecuencia Williams et al. (2017) realizaron un método automatizado desarrollado para segmentar plantas de frambuesa desde el fondo utilizando una relación espectral seleccionada combinada con detección de bordes, donde los resultados indicaron la buena correlación entre las mediciones manuales y automatizadas, lo cual confirmó el valor del método de segmentación hiperespectral. Por último, Jiang et al. (2017) estudiaron los cambios microestructurales de la morera mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM), Además utilizaron un sistema de imágenes hiperespectrales NIR para predecir la distribución de residuos de plaguicidas en las hojas de morera con la ayuda de la cromatografía de gases. Este estudio demostró que el mapa de distribución de residuos de pesticidas mostraba claramente la distribución de residuos de pesticidas en las hojas de morera.

APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA HIPERESPECTRAL EN LA EVALUACIÓN DE FIRMEZA, MADUREZ Y CANTIDAD DE SÓLIDOS SOLUBLES (SSC) EN DIFERENTES TIPOS DE BAYAS

La firmeza es un importante indicador de calidad de los arándanos. La pérdida de firmeza (o ablandamiento) de los arándanos postcosecha ha planteado un desafío en el control de calidad de su vida útil y se puede delinear con sus cambios microestructurales, como se puede observar en los estudios de la Tabla 2. Para investigar las características espaciales y espectrales de las microestructuras basadas en la firmeza Park, Shin, Cho, Lim, & Park (2022) realizaron un estudio donde emplearon imágenes de microscopio (HMI) para evaluar la firmeza en arándanos con un método de aprendizaje profundo, donde los resultados del estudio indicaron que el modelo de aprendizaje profundo con características espaciales y espectrales de las células de arándanos tiene un gran potencial para la clasificación de la firmeza de los arándanos. Las imágenes hiperespectrales ofrecen un enorme potencial para medir la composición de la uva con un alto grado de representatividad, lo que permite examinar de forma no destructiva todas las uvas expuestas del racimo, en consecuencia Fernández-Novales, Barrio, & Diago (2021), realizaron una investigación con tecnología HSI, la cual se montó en la parte delantera de una plataforma motorizada que se movía a 5 km/h en un viñedo comercial de Tempranillo en La Rioja, España, Los resultados nos revelaron una metodología notable sobre la marcha, para la evaluación no destructiva en el

campo de los parámetros de composición de calidad de la uva a lo largo del período de maduración. Cuantificar los parámetros de calidad de la cereza es esencial para mantener un producto de alta calidad a lo largo de la cadena de suministro, ya que influye en la confianza del consumidor en el producto. Las imágenes hiperespectrales ofrecen un alto potencial como herramienta analítica no destructiva y rápida para estimar varios parámetros de calidad en diferentes productos alimenticios, con esto Pullanagari & Li (2020) desarrollaron un estudio, donde investigaron el potencial de las imágenes hiperespectrales para la evaluación de la calidad (concentración total de sólidos solubles, TSS y firmeza de la pulpa, FF) en frutos de cereza frescos, donde demostraron que las imágenes hiperespectrales combinadas con el análisis de datos multivariados mediante GPR se pueden utilizar como una herramienta sólida y confiable para estimar los parámetros de calidad de la cereza. Para detectar el contenido de sólidos solubles (SSC) de los tomates cherry con precisión y rapidez Lian, Long, Song, & He (2019) realizaron un nuevo método de detección de SSC de tomate basado en la tecnología de imágenes hiperespectrales (HSI) y la rana aleatoria de intervalo modificado, donde mostraron que la combinación de tecnología hiperespectral y miRF puede lograr una detección rápida y no destructiva de SSC en tomates cherry.

RECONOCIMIENTO, CLASIFICACIÓN Y PREDICCIÓN DE CALIDAD EN DIFERENTES TIPOS DE BAYA GOJI

La tecnología de imágenes hiperespectrales tiene una amplia aplicación en la detección e identificación de productos agrícolas. Un caso especial son las bayas negras silvestres de Goji, que tienen notables beneficios económicos y, a menudo, son suplantadas por el cultivo de bayas negras de Goji. Por tal motivo Zhao, Yan, Xue, & Xu (2021); Lu, Cai, Zhang, & Li (2021) propusieron un

método de identificación rápido y no destructivo para las bayas de Goji negras silvestres utilizando tecnología de imágenes hiperespectrales, tal estudio demostró que el uso de tecnología de imágenes hiperespectrales combinada con modelos de clasificación puede identificar rápidamente las bayas negras silvestres de Goji.

Tabla 1
Evaluación de madurez, firmeza y SSC de diferentes tipos de baya, utilizando HSI

Tipo de baya	Metodología	Equipo	Longitud espectral	Resultados	Referencia
Fresa	Estimación del contenido de agua y la clasificación de madurez	Espectrorradiómetro hiperespectral de banda estrecha	674 y 698 nm	Se logró una precisión superior al 98% en la clasificación de madurez y contenido de agua	(Raj, Cosgun, & Kulić, 2022).
	Aprendizaje profundo para determinar el grado de madurez y el contenido de sólidos solubles (SSC)	Espectros 1D e HSI 3D	380 a 1030 nm	Se obtuvo un rendimiento de 84% para la identificación de madurez	(Su et al., 2021); (Shao et al., 2020)
	Se utilizó HSI para predecir el P3G de las fresas para dos tipos de madurez de cosecha	Sensor hiperespectral OCI-F	400 a 1000 nm	HSI podría usarse para la predicción de P3G con diferente madurez de cosecha.	(Cho, Lim, Park, Choi, & Ok, 2021)
	HSI y análisis de datos con varias técnicas de regresión.	Cámara hiperespectral (HySpex-VNIR-1800)	401 a 1000 nm	los datos del HSI con modelos de regresión tienen el potencial de predecir la firmeza de manera rápida y no destructiva	(Devassy & George, 2021)
	Los datos espectrales se extrajeron de imágenes hiperespectrales de diferentes estados de madurez	Máquina de vectores de soporte (SVM)	380-1030 nm y 874-1734 nm	El modelo SMV y HSI podrían usarse para la evaluación de la madurez de las fresas	(Zhang et al., 2016)
Arándano	Medición de la firmeza de la firmeza de arándanos reales en el suelo y con HMI	Microscopio hiperespectral	400 a 1000 nm	El modelo de aprendizaje profundo demostró el potencial para la clasificación de la firmeza de los arándanos	(Park, Shin, Cho, Lim, & Park, 2022)
	Durante el secado se controlaron mediante HSI y el grado de secado se determinó mediante el modelo PLS.	Sistema Vis/NIR HSI	470-900 nm	Las técnicas de HSI se pueden usar para predecir humedad de los arándanos durante el secado	(Choi et al., 2021)
	(HSI) para detectar simultáneamente el contenido de sólidos solubles (SSC) y la firmeza (FI)	Algoritmo de proyecciones sucesivas de varias etapas (MS-SPA) y SPA1/SPA2	450-950 nm.	El método base teórica para desarrollar un sistema de detección y clasificación en línea de la calidad	(Qiao et al., 2019), (Leiva-Valenzuela & Lu, 2013)
	Se aplicaron tres métodos de selección de banda para medir diferentes estados de madurez	Cámara hiperespectral	398 a 1010 nm	La selección de bandas es muy útil para construir un HSI para detectar las etapas de madurez	(Yang, Lee, & Gader, 2014)
Uva	Método robusto llamado Roboost-PLSR para mejorar el rendimiento del modelo de predicción de madurez	Cámara hiperespectral	400 a 1000 nm	El método Roboost-PLSR permite una mejor predicción de madurez	(Courand et al., 2022)
	Se utilizó la (PLS) para construir modelos de calibración para la composición de la uva	Cámara hiperespectral de escoba de empuje	400 a 1000 nm	El método ayuda a evaluar los parámetros de composición de calidad de la uva a lo largo del período de maduración.	(Fernández-Navales, Barrio, & Diago, 2021)
	método no destructivo HSI para evaluación de sólidos solubles durante la maduración	Cámara hiperespectral (HSC) Vis/NIR	401 a 1000 nm	El método tiene buen potencial para la predicción del atributo de calidad SSC de las uvas	(Benelli, Cevoli, & Fabbri, 2020); (J., J., & Diago, 2019)
Cereza	Investigar el potencial de las imágenes hiperespectrales para la evaluación de la firmeza y SSC	Cámara de imágenes hiperespectrales push-broom	500 a 1600 nm	En general el HSI se pueden utilizar para estimar los parámetros de calidad de la cereza	(Pullanagari & Li, 2020)
	Detección de SSC de tomate basado en HSI y la rana aleatoria de intervalo modificado	Cámara de imágenes hiperespectrales	..	la combinación de estas tecnologías puede lograr una detección SSC rápida y no destructiva	(Lian, Long, Song, & He, 2019)
	Se capturaron 11 imágenes hiperespectrales y se compararon con SSC y pH medido por métodos estándar	HSI con un espectrómetro (N17E-QE)	874 a 1734 nm	factible detectar la calidad de la fruta(madurez) de la cereza mediante la HSI/NIR.	(Li et al., 2018)
Mora	Métodos quimiométricos junto con tecnología HSI en la región visible e infrarroja cercana (Vis/NIR)	Cámara hiperespectrales de escoba con modo de reflectancia	380 a 1030 nm	HSI son prometedoras para determinar la distribución espacial del contenido de TSS en frutos de morera	(Zhao, Yu, & He, 2015)
Madreselva azul	Hubo discriminación de píxeles basada en la selección paso a paso hacia adelante para seleccionar bandas de onda significativas	Cámara hiperespectral	751 nm y 420 nm	Se mostró el potencial de identificar bayas demasiado maduras mediante el análisis de imágenes hiperespectrales.	(Fu et al., 2014)

Por otra parte Fatchurrahman et al. (2021) investigaron el potencial de las imágenes hiperespectrales para la predicción de la composición interna de las bayas de goji, donde compararon los rendimientos de predicción de los modelos obtenidos en las regiones del infrarrojo

cercano visible (VIS-NIR) (400–1000 nm) y del infrarrojo cercano (NIR) (900–1700 nm), donde concluyeron que las imágenes hiperespectrales pueden ser una herramienta útil para la predicción de los principales constituyentes de la baya de goji. Otro estudio realizado por Zhao, Yan, & Song,

(2021) donde aplicaron tecnología de imagen hiperspectral para identificar de forma no destructiva Black Goji Berry y nitraria tanggu, usaron el método de Kennard-Stone para dividir muestras, conjunto de corrección: conjunto de predicción = 2:1, El método del algoritmo de proyecciones sucesivas (SPA) para la reducción de la dimensionalidad espectral, estableciendo el rango de longitud de onda característico en 0~30, lo que extrajo 20 longitudes de onda características, al analizar de todos estos métodos concluyeron que la investigación proporciona una base teórica para identificar Black Goji Berry y

nitraria Tanggu. La baya negra de goji (*Lycium ruthenicum* Murr.) tiene un gran valor comercial y nutricional, Zhang et al. (2020) realizaron un estudio basado tecnología de imágenes hiperespectrales de infrarrojo cercano (NIR-HSI) para determinar los fenoles totales, los flavonoides totales y las antocianinas totales en bayas de goji negras secas, donde concluyeron que el aprendizaje profundo tenía un gran potencial como método de modelado y extracción de características para la determinación de composiciones químicas en NIR-HSI.

EVALUACIÓN DE PARÁMETRO ENOLÓGICOS EN BAYAS DE UVA, APLICANDO TECNOLOGÍA HIPERESPECTRAL

La determinación a gran escala tanto de la calidad de la uva como del punto óptimo de maduración es relevante para la industria de la uva y el vino porque dentro de unas características. Debido a las diferencias en la exposición al sol, la disponibilidad de agua, la calidad del suelo o la altitud. Sin embargo, hoy en día, este análisis a gran escala es muy difícil de realizar, o incluso imposible, debido a que los métodos convencionales para el análisis químico de las uvas son invasivos, costosos y consumen mucho tiempo, ya que estos métodos requieren la preparación de muestras, con esto Fernandes et al. (2015) realizaron un estudio donde usaron espectros hiperespectrales en modo de reflectancia de 380 a 1028 nm, los cuales se convirtieron en parámetros enológicos mediante perceptrones multicapa creados con 240 muestras que se dividieron para una validación cruzada y una prueba de 7 veces. Este trabajo presenta de óptimamente los resultados de la medición de pH, azúcares y contenido de antocianinas en uvas enteras. Reducir la heterogeneidad en el material de cosecha sería beneficioso para la calidad del vino y este objetivo puede lograrse mediante sistemas avanzados de clasificación de bayas, Lafontaine, Bockaj, Freund, Vieth, & Negara (2015) realizaron una investigación para encontrar una relación entre la concentración de azúcar y las imágenes hiperespectrales, donde concluyeron que Las bayas con mayor concentración de azúcar se resalta en vinos con mayor concentración de antocianinas y menor concentración de taninos. En otro estudio realizado por Gomes, Mendes-Ferreira, & Melo-Pinto (2021); Silva, Gomes, Mendes-Faia, & Melo-Pinto (2018) evaluaron el desempeño de un modelo de regresión de vector de soporte (SVR) con kernel de base radial gaussiana para predecir la concentración de antocianinas, el índice de pH y el contenido de azúcar en uvas enteras, utilizando medidas espectroscópicas obtenidas en modo de reflectancia, donde el espectro de cada muestra se recolectó durante la maduración, utilizando imágenes hiperespectrales en el rango de 380 - 1028 nm). Los mejores resultados de R² obtenidos con variedades y añadas no empleadas en la etapa de entrenamiento del modelo fueron 0,89, 0,81 y 0,90, con valores

RMSE de 35,6 mg·L⁻¹, 0,25 y 3,19 °Brix, para concentración de antocianinas, índice de pH y contenido de azúcares, respectivamente. Gomes, Fernandes, Faia, & Melo-Pinto, (2017) compararon dos enfoques diferentes, regresión PLS y redes neuronales, para monitorear la calidad de las uvas utilizando predicciones de contenido de azúcar basadas en formación de imágenes hiperespectrales, donde los resultados obtenidos sugieren que al combinar hiperespectral imágenes con técnicas quimiométricas apropiadas o algoritmos de aprendizaje automático, es posible tener una generalización satisfactoria para cosechas no empleadas en la creación de modelos. Asimismo, Gomes, Reis, Mendes-Ferreira, & Melo-Pinto, (2021) realizaron un estudio de comparación ampliado entre 16 métodos de regresión lineales y no lineales diferentes para predecir el contenido de azúcar, pH y antocianinas de las uvas a través de imágenes hiperespectrales (HIS). Los resultados de este estudio sugieren que la combinación de la primera derivada de Savitzky-Golay y la regresión de crestas puede ser una buena opción para la predicción de los tres parámetros enológicos. En las bayas de uva roja, las antocianinas representan aproximadamente el 50% de los fenoles de la piel y son responsables del color final del vino. Los niveles individuales de antocianinas y los perfiles de composición varían según el cultivo, la madurez, la estación, la región y el rendimiento, y se han propuesto como marcadores químicos para diferenciar los vinos y proporcionar información valiosa sobre la adulteración de mostos y vinos, por esto Diago, Fernández-Novales, Fernandes, Melo-Pinto, & Tardaguila (2016) desarrollaron contra HPLC un método rápido, fácil, sin solventes y no destructivo basado en imágenes hiperespectrales (HSI) visibles, de onda corta y de infrarrojo cercano en bayas de uva intactas para identificar los pigmentos de color en ocho variedades de uva diferentes. Donde se concluyó que la tecnología HSI podría convertirse potencialmente en una alternativa a HPLC con tiempo de análisis y costos de mano de obra reducidos, al tiempo que brinda información confiable y sólida sobre la composición de antocianinas de las uvas.

ANÁLISIS DE MORFOMETRÍA EN DIVERSOS TIPOS DE BAYA UTILIZANDO TECNOLOGÍA DE IMÁGENES DIGITALES

La evaluación cuantitativa de los cultivos hortícolas tiene una gran importancia para identificar cultivares, describir el efecto del lugar de cultivo y la tecnología de cultivo o definir la preferencia del consumidor con respecto al tamaño y la forma. El reconocimiento de la fruta es difícil debido a variables ambientales complejas como el cambio de iluminación, la oclusión de ramas y hojas y la superposición de tomates. Bini, Pamela, & Jude (2022) nos proporcionan un modelo de detección de bayas de tomate mejorado denominado Tomato-YOLO para abordar estos problemas. Tomato-YOLO obtuvo el mejor rendimiento, con una puntuación F1 del 66,15%, un mAP del 52,26%

y un tiempo de inferencia de 16,14 ms. La automatización de la medición de fenotipos contribuirá decisivamente a aumentar la eficiencia del fitomejoramiento. Entre los fenotipos, los rasgos morfológicos son relevantes en muchos programas de mejoramiento de frutas, ya que la apariencia influye en la preferencia del consumidor. A menudo, estos rasgos se obtienen de forma manual o semiautomática. Sin embargo, la evaluación de la morfología de la fruta se puede mejorar utilizando procedimientos completamente automatizados y las imágenes digitales brindan una oportunidad rentable para este propósito (Tabla 3).

Tabla 3

Análisis de la morfometría de diversos tipos de baya, aplicando tecnología de imágenes digitales

Tipo de baya	Metodología	Equipo y/o herramienta(s)	Resultados	Referencia
Fresa	Evaluación de la morfología interna y externa de la fruta aplicando canalización automatizada	Codificador automático variacional	Se demostró que la forma y el color de la fruta se pueden evaluar rápida y automáticamente y son moderadamente heredables	(Zingaretti, Monfort, & Pérez, 2021)
	Enfoque matemático en la clasificación de formas de frutas a partir de imágenes digitales	Escala ordinal: Progresión principal de k Clusters (PPKC)	Se demostró que, las formas de la fresa se pueden cuantificar, clasificar y ordenar empíricamente mediante análisis de imágenes, aprendizaje automático y PPKC	(Feldmann et al., 2020)
	Identificación cualitativa de fresas secadas por convección	Simulador de redes neuronales artificiales	Se observó una fuerte relación entre algunos parámetros de calidad	(Przybył et al., 2019)
	Prueba de la clasificación de formas de fresa mediante aprendizaje automático	Descriptor de imágenes digitales	Se demostró que el descriptor CCS presentó mayor robustez en la clasificación que los otros descriptores	(Ishikawa et al., 2018)
	Estimación del valor de cobertura foliar de plantas de fresa utilizando imágenes digitales técnicas de procesamiento (DPI)	Imágenes fotográficas en plantas en estudio	Los resultados muestran las medidas de la cobertura foliar de las plantas con hasta un 90% de precisión	(Sandino, Ramos, & Amaya, 2016)
Uva	Descripción de la geometría de la baya utilizando imagen digital	Parámetros de la uva	Se observó que los radios de la curvatura aumentaron en todos los cultivares probados	(Nedomová et al., 2017)
	Aplicación de técnicas de visión artificial en viticultura desde varios enfoques	Algoritmos de procesamiento de imágenes	Se demostró la posibilidad de medir de forma automática un gran conjunto de muestras, proporcionando información más precisa	(Tardaguila et al., 2013)
	Investigación de rasgos morfológicos usando análisis de imágenes digitales	Ampelógrafo	El número de semillas tuvo un efecto notable en los atributos de tamaño.	(Somogyi, Kun, Lázár, Bodor-Pesti, & Nyitrai Sárdy, 2021)
Morera	Identificación de la morfometría de hojas usando análisis de imágenes digitales y análisis de datos multivariados	Análisis discriminante lineal (LDA), análisis biplot, análisis de conglomerados	Se demostró que el uso de descriptores morfométricos resultó ser efectivo para discriminar cultivares de morera	(Lo Bianco & Mirabella, 2018)
	Método de cosecha habitual en las propiedades de la fruta de morera	Regímenes de almacenamiento	Se observó que, el área de abrasión aumentó en las moras inmaduras y maduras al aumentar la altura de caída y el tiempo de almacenamiento	(Afsharnia, Mehdizadeh, Ghaseminejad, & Heidari, 2017)
Bayas de tomate	Modelo de detección de tomate mejorado denominado Tomato-YOLO	Robot de cosecha YOLOv5	Se pudo distinguir tomates verdes y rojizos, incluso cuando están cubiertos por hojas	(Bini, Pamela, & Jude, 2022)
Cereza dulce	Estimación de parámetros de referencia utilizando regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS)	Huella dactilar del espectro de tonos	Se observó un cambio de color de la fruta roja con una saturación decreciente en el rango rojo de los espectros de tonalidad.	(Nguyen, Visi, Baranyai, Friedrich, & Mahajan, 2020)
Todo tipo	Procesamiento de imágenes en la determinación de la calidad	Algoritmos y programas tecnológicos	Se demostró que puede ser fuente de apoyo para fabricar diferentes productos comestibles de acuerdo a su nivel de categoría	(Sardar, 2013)

APLICACIÓN DE MODERNOS MÉTODOS RELACIONADOS CON TECNOLOGÍA DE IMÁGENES DIGITALES EN LA MEJORA DE LAS CUALIDADES DE DIFERENTES TIPOS DE BAYA

En los últimos años se han desarrollado métodos basados en tecnología de imágenes en la mejora de la calidad de bayas (Tabla 4). Jing et al. (2021) diseñaron un sistema de adquisición de imágenes de fluorescencia de clorofila de plántulas de fresa para investigar la relación entre el estrés por sequía y los parámetros de imagen de fluorescencia de las plántulas de fresa. Las plántulas de fresa bajo diferentes componentes de estrés se excitaron activamente mediante el uso de una fuente de luz LED de 460 nm y se recolectaron las imágenes de fluorescencia desde la excitación hasta la etapa de estado estacionario. Los autores concluyeron que el análisis de fluorescencia de clorofila combinado con las imágenes digitales es más económico e intuitivo que el método tradicional de detección de fluorescencia y que este sistema se puede utilizar como un método de seguimiento de la producción agrícola para realizar alertas tempranas de estrés por sequía. La necrosis de las bayas de café es una enfermedad fúngica que, en un alto nivel, afecta significativamente la productividad del café. Por otro lado, Con el advenimiento de los satélites de mapeo de superficie Miranda, Alves, Pozza, & Santos (2020) obtuvieron información sobre la firma espectral del cultivo en una escala de tiempo pertinente para el monitoreo y detección de cambios fenológicos de la planta. Estos resultados demuestran que las imágenes Landsat 8 OLI fueron capaces de identificar una incidencia de la necrosis del fruto del café mediante técnicas de aprendizaje automático, hecho que no puede ser observado por la correlación de Pearson. La planta de fresa es una planta frutal que tiene un valor bastante alto. La fruta de fresa contiene altas cantidades de fibra, vitamina C, ácido fólico, potasio y antioxidantes. Cultivar fresas no es una tarea fácil porque las plantas de fresas a menudo se ven afectadas por microorganismos, plagas y bacterias. Para reducir la propagación de enfermedades en las plantas de

fresa; Kusumandari, Adzkie, Gultom, Nabo, & Nabo (2019) analizaron la enfermedad de la fresa se mediante el procesamiento de imágenes digitales, los investigadores concluyeron que el procesamiento de imágenes muestra que se obtiene un 85% de precisión de detección de esta enfermedad. Cuelure, un análogo de la cetona de frambuesa natural es el señuelo estándar de Q-fly, pero tiene una eficacia limitada en comparación con los señuelos disponibles para otras moscas de la fruta, como el metil eugenol para *B. dorsalis*. Melolure es un análogo de cetona de frambuesa desarrollado más recientemente que ha mostrado una mejor atracción que cuelure en algunos estudios de campo, pero no en otros, con lo dicho Siderhurst et al. (2016), realizaron un trabajo investigativo donde desarrollaron un nuevo análogo fluorado de la cetona de la frambuesa, el trifluoroacetato de la cetona de la frambuesa (RKTA), como una mejora potencial de la cualidad y la melodumbre. RKTA colocado en jaulas de laboratorio que contenían moscas "Q" de 2 semanas de edad provocó fuertes respuestas de comportamiento de los machos. La Cuantificación de las respuestas de Q-fly en estas jaulas, utilizando imágenes digitales para estimar el número de moscas agregadas cerca de diferentes señuelos, mostró que RKTA atrajo y arrestó significativamente más moscas que cuelure o melolure. El geranio de Carolina (*Geranium carolinianum* L.) es una maleza de hoja ancha muy extendida en la producción de fresas de Florida con sensibilidad a la clopiralida, el único herbicida de hoja ancha POST disponible. La estructura de la hoja de *Geranium carolinianum* es distinta de la de la planta de fresa, lo que la convierte en una candidata ideal para el reconocimiento de patrones en imágenes digitales través de redes neuronales convolucionales (CNN), (M., Schumann, & Boyd, 2019).

Tabla 4

Aplicación de modernos métodos relacionados con tecnología de imágenes digitales en la mejora de las cualidades de diferentes tipos de baya

Tipo de baya	Metodología	Equipo y/o herramienta(s)	Resultados	Referencia
Fresa	Método de segmentación de umbral y eliminación de fondo de imagen para el preprocesamiento de imágenes	Fuente de luz LED de 460 nm	La proporción de decaimiento de la fluorescencia está altamente correlacionada con el tiempo de estrés por sequía	(Jing et al., 2021)
	Reducción de la propagación de enfermedades en las plantas utilizando imágenes digitales	Software agrícola SIG	El procesamiento de imágenes muestra que se obtiene un 85% de precisión de detección	(Kusumandari, Adzkie, Gultom, Nabo, & Nabo, 2019)
	Reconocimiento de patrones a través de redes neuronales convolucionales (CNN)	DetectNet, imagenVGGNet Y GoogLeNet	DetectNet fue la prueba CNN más viable para la detección remota de <i>G. carolinianum</i>	(M., Schumann, & Boyd, 2019)
Frambuesa	Mejora potencial de la calidad de la frambuesa usando trifluoroacetato de la cetona (RKTA)	Atrayente específico Cuelure	Se demostró que, RKTA atrajo y arrestó significativamente más moscas	(Siderhurst et al., 2016)
Café	Métodos de corrección atmosférica a través de imágenes Landsat 8 OLI	Satélites de mapeo de superficie	Las imágenes Landsat 8 OLI identificaron incidencia de la necrosis del fruto del café	(Miranda, Alves, Pozza, & Santos, 2020)
Cerezos dulces	Método de mapeo de intercepción PAR en el mejoramiento de productividad	Sistema de medición móvil	Se corrigió la distorsión en los mapas causada por ángulos cenitales	(Zhao, Yu, & He, 2015)
	Efecto de la temperatura del suelo sobre el crecimiento de raíces usando imágenes digitales	Rizotrófon	El crecimiento de las raíces duró seis meses concentrándose en la parte más profunda del perfil del suelo	(Bonomelli, Nuñez, Bonilla, & Artacho, 2014)
	Desarrollo de un método de conversión para unificar la intercepción de la luz	Arquitectura UFO (vástagos fructíferos)	Se pudo convertir la intercepción de la luz del dosel con una precisión general del error cuadrático medio	(Zhang, Zhang, & Whiting, 2014).

RETOS ACTUALES Y FUTUROS

El análisis de la imagen y su importancia en la evaluación de las plantas revela que hay aspectos en los que se debe trabajar en función de que incentiven el dominio del discurso visual tanto para su recepción desde una posición analítica, crítica (Cordoví & Keeling, 2018). Asimismo, podrían explorarse nuevos campos de estudio de la información, aplicando un análisis estadístico a los datos obtenidos en la visualización, de modo que podamos ampliar los conocimientos concernientes a la escena, mediante un examen de la información final obtenida (Iglesias, 2018).

Sin embargo, este nuevo ámbito de aplicación ha generado nuevas necesidades, como la del procesado de las imágenes en tiempo real.

Debido, precisamente, a la gran resolución espectral, estas imágenes requieren una elevada capacidad computacional para ser procesadas. En este sentido, una de las principales líneas de investigación persigue el objetivo del tiempo real mediante la paralelización del procesamiento, dividiendo esta carga computacional en varios núcleos que trabajen simultáneamente (Lazcano, 2014).

CONCLUSIONES

A medida que avanzan los avances científicos, los sistemas de tecnología de imágenes han dado lugar a grandes avances en el análisis y diagnóstico de diversos aspectos en el sector agrícola. En consecuencia, se demostró que las imágenes digitales pueden llegar a mejorar la capacidad y rendimiento de un cultivo, así como la prevención de alguna enfermedad que pueda alterar su formación y en consecuencia dañe la calidad del producto a cosechar. Tecnología que está estrechamente ligada con las imágenes hiperespectrales, puesto que, esta también es una herramienta que ayuda en el análisis y monitoreo de los materiales que consolidan una región determinada; sin embargo, este método, al no estar ligado a un contexto o conjunto de datos específico,

resultó ser un método mucho más profundo e innovador debido a que presenta una mayor simplicidad, y con ello una mayor rapidez computacional, frente a métodos clásicos específicos, que muchas veces son diseñados para cada tarea particular, ya que son capaces de formar la imagen a través de las características espectrales en cada pixel. En los últimos años, estos espectrómetros de imagen han sido colocados en plataformas aéreas para registrar la superficie terrestre en cientos de bandas espectrales, un área que ha sido denominada como sensado remoto hiperespectral y que ha encontrado muchas aplicaciones relacionadas con la identificación de recursos naturales, monitoreo del medio ambiente e inclusive, aplicaciones militares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afsharnia, F., Mehdizadeh, S., Ghaseminejad, M., & Heidari, M. (2017). The effect of dynamic loading on abrasion of mulberry fruit using digital image analysis. *Information Processing in Agriculture*, 4(4), 291-299.
- Alapont, C., Soriano, S., & Torrejón, J. (2020). *Guía para la determinación de vida útil de los alimentos*. Generalitat Valenciana (Conselleria de Sanitat Universal i Salut Pública). Valencia: FEDACOVA (Federación Empresarial de Agroalimentación de la Comunidad Valenciana).
- Arslan, M., Tahir, H. E., Zareef, M., Shi, J., Rakha, A., Bilal, M., . . . Xiaobo, Z. (2021). Recent trends in quality control, discrimination and authentication of alcoholic beverages using nondestructive instrumental techniques. *Trends in Food Science & Technology*, 107, 80-113.
- Benelli, A., Cevoli, C., & Fabbri, A. (2020). In-field Vis/NIR hyperspectral imaging to measure soluble solids content of wine grape berries during ripening. *International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry*, 99-103.
- Bini, D., Pamela, D., & Jude, H. D. (2022). Evaluating YOLOv5 Deep Learning Models for the Detection of Tomato Berries for Crop Yield Estimation. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 347, 429 - 436.
- Bonomelli, C., Nuñez, F., Bonilla, C., & Artacho, P. (2014). Effect of the soil temperature on root growth of cherry trees [Prunus avium L. cv. Bing/Gisela®6]: A preliminary study in central Chile. *Acta Horticulturae*, 1020, 175-180.
- Chan, C., Nelson, P. R., Hayes, D. J., Zhang, Y.-J., & Hall, B. (2021). Predicting water stress in wild blueberry fields using airborne visible and near infrared imaging spectroscopy. *Remote Sensing*, 13(8).
- Cheshkova, A. (2022). Quantitative assessment of white spot (Ramularia tulasnei) disease severity of strawberry based on hyperspectral imaging. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 957(1).
- Cho, B.-K., Kim, M. S., Baek, I.-S., Kim, D.-Y., Lee, W.-H., Kim, J., . . . Kim, Y.-S. (2013). Detection of cuticle defects on cherry tomatoes using hyperspectral fluorescence imagery. *Postharvest Biology and Technology*, 76, 40-49.
- Cho, J.-S., Lim, J. H., Park, K. J., Choi, J. H., & Ok, G. S. (2021). Prediction of pelargonidin-3-glucoside in strawberries according to the postharvest distribution period of two ripening stages using VIS-NIR and SWIR hyperspectral imaging technology. *LWT*, 141.
- Choi, J.-Y., Kim, J., Kim, J., Jeong, S. K., Park, S., & Moon, K.-D. (2021). Hyperspectral imaging technique for monitoring moisture content of blueberry during the drying process. *Korean Journal of Food Preservation*, 28(4), 445-455.
- Cordoví, F., & Keeling, M. (2018). La utilización de la imagen digital en el proceso pedagógico universitario. *Atenas*, 2(42), 1682-2749.
- Courand, A., Metz, M., Héran, D., Feilhes, C., Prezman, F., Serrano, E., . . . Ryckewaert, M. (2022). Evaluation of a robust regression method (RoBoost-PLSR) to predict biochemical variables for agronomic applications: Case study of grape berry maturity monitoring. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 221.
- Devassy, B. M., & George, S. (2021). Imaging estimation of strawberry firmness using in this issue: Spectral preprocessing to compensate for packaging film / using neural nets to invert the prosail canopy model hyperspectral imaging: A comparison of regression models. *Journal of Spectral Imaging*, 10.
- Diago, M. P., Fernández-Navales, J., Fernandes, A. M., Melo-Pinto, P., & Tardaguila, J. (2016). Use of Visible and Short-Wave Near-Infrared Hyperspectral Imaging to Fingerprint Anthocyanins in Intact Grape Berries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(40), 7658-7666.
- Fan, S., Li, C., Huang, W., & Chen, L. (2017). Detection of blueberry internal bruising over time using NIR hyperspectral reflectance imaging with optimum wavelengths. *Postharvest Biology and Technology*, 134, 55-66.
- Fan, S., Li, C., Huang, W., & Chen, L. (2018). Data fusion of two hyperspectral imaging systems with complementary spectral sensing ranges for blueberry bruising detection. *Sensors (Switzerland)*, 18(12).

- Fatchurrahman, D., Nosrati, M., Amodio, M. L., Chaudhry, M. M., de Chiara, M. L., Mastrandrea, L., & Colelli, G. (2021). Comparison performance of visible-nir and near-infrared hyperspectral imaging for prediction of nutritional quality of goji berry (*Lycium barbarum* L.). *Foods*, 10(7).
- Feldmann, M., Hardigan, M., Fámula, R., López, C., Tabb, A., Cole, G., & Knapp, S. (2020). Multi-dimensional machine learning approaches for fruit shape phenotyping in strawberry. *GigaScience*, 9(5).
- Fernandes, A. M., Franco, C., Mendes-Ferreira, A., Mendes-Faia, A., Costa, P. L., & Melo-Pinto, P. (2015). Brix, pH and anthocyanin content determination in whole Port wine grape berries by hyperspectral imaging and neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 88-96.
- Fernández-Navales, J., Barrio, I., & Diago, M. P. (2021). Non-invasive monitoring of berry ripening using on-the-go hyperspectral imaging in the vineyard. *Agronomy*, 11(12).
- Fu, L., Okamoto, H., Shibata, Y., Kataoka, T., Cui, Y., & Li, R. (2014). Distinguishing overripe berries of Japanese blue honeysuckle using hyperspectral imaging analysis. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 7(1), 22-27.
- Gao, Z., Zhao, Y., Hoheisel, G.-A., Khot, L. R., & Zhang, Q. (2021). Blueberry bud freeze damage detection using optical sensors: Identification of spectral features through hyperspectral imagery. *Journal of Berry Research*, 11(4), 631-646.
- Gao, Z., Zhao, Y., Khot, L. R., Hoheisel, G.-A., & Zhang, Q. (2019). Optical sensing for early spring freeze related blueberry bud damage detection: Hyperspectral imaging for salient spectral wavelengths identification. *Computers and Electronics in Agriculture*, 167.
- Gomes, V. M., Fernandes, A. M., Faia, A., & Melo-Pinto, P. (2017). Comparison of different approaches for the prediction of sugar content in new vintages of whole Port wine grape berries using hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 140, 244-254.
- Gomes, V., Gomes, V., Reis, M. S., Mendes-Ferreira, A., & Melo-Pinto, P. (2021). Determination of sugar, ph, and anthocyanin contents in port wine grape berries through hyperspectral imaging: An extensive comparison of linear and non-linear predictive methods. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(21).
- Gomes, V., Mendes-Ferreira, A., & Melo-Pinto, P. (2021). Application of hyperspectral imaging and deep learning for robust prediction of sugar and ph levels in wine grape berries. *Sensors*, 21(10).
- Hu, M.-H., Dong, Q.-L., & Liu, B.-L. (2016). Classification and characterization of blueberry mechanical damage with time evolution using reflectance, transmittance and interactance imaging spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 122, 19-28.
- Hu, M.-H., Zhao, Y., & Zhai, G.-T. (2018). Active learning algorithm can establish classifier of blueberry damage with very small training dataset using hyperspectral transmittance data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 172, 52-57.
- Huang, L., Yang, L., Meng, L., Wang, J., Li, S., Fu, X., ... Wu, D. (2018). Potential of visible and near-infrared hyperspectral imaging for detection of *Diaphania pyloalis* larvae and damage on mulberry leaves. *Sensors (Switzerland)*, 18(7).
- Huang, Y., Wang, D., Liu, Y., Zhou, H., & Sun, Y. (2020). Measurement of early disease blueberries based on vis/nir hyperspectral imaging system. *Sensors (Switzerland)*, 20(20), 1-11.
- Hussain, A., Pu, H., & Sun, D.-W. (2019). Measurements of lycopene contents in fruit: A review of recent developments in conventional and novel techniques. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(5), 758-769.
- Iglesias, R. (2018). *Visualización de imágenes multi-espectrales usando operadores de agregación*. Trabajo Fin de Máster, Universidad Pública de Navarra, Navarra.
- Ishikawa, T., Hayashi, A., Nagamatsu, S., Kyutoku, Y., Dan, I., Wada, T., ... Kochi, N. (2018). Classification of strawberry fruit shape by machine learning. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2), 463 - 470.
- J., T., J., F.-N., & Diago, M.-P. (2019). On-the-go hyperspectral imaging for the in-field estimation of grape berry soluble solids and anthocyanin concentration. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 25(1), 127-133.
- Jiang, Q., Wu, G., Tian, C., Li, N., Yang, H., Bai, Y., & Zhang, B. (2021). Hyperspectral imaging for early identification of strawberry leaves diseases with machine learning and spectral fingerprint features. *Infrared Physics and Technology*, 118.
- Jiang, S., Sun, J., Xin, Z., Mao, H., Wu, X., & Li, Q. (2017). Visualizing distribution of pesticide residues in mulberry leaves using NIR hyperspectral imaging. *Journal of Food Process Engineering*, 40(4).
- Jiang, Y., Li, C., & Li, C. (2016). Nondestructive Detection and Quantification of Blueberry Bruising using Near-infrared (NIR) Hyperspectral Reflectance Imaging. *Scientific Reports*, 6.
- Jing, M., Ma, Z., Yang, F., Zhang, Q., Ding, M., & Chen, M. (2021). Analysis of drought stress in strawberry based on dynamic fluorescence index. *Paiguan Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 39(11), 1182 - 1188.
- Jung, D.-H., Kim, J. D., Kim, H.-Y., Lee, T. S., Kim, H. S., & Park, S. H. (2022). A Hyperspectral Data 3D Convolutional Neural Network Classification Model for Diagnosis of Gray Mold Disease in Strawberry Leaves. *Frontiers in Plant Science*, 13.
- Kusumandari, D., Adzka, M., Gultom, S., Nabo, M., & Nabo, A. (2019). Detection of Strawberry Plant Disease Based on Leaf Spot Using Color Segmentation. *Journal of Physics: Serie de conferencias*, 1230(1).
- Lafontaine, M., Bockaj, Z., Freund, M., Vieth, K.-U., & Negara, C. L. (2015). Non-destructive determination of grape berry sugar concentration using visible/near infrared imaging and possible impact on wine quality. *Technisches Messen*, 82(12), 633-642.
- Lazcano, R. (2014). *Generación de una librería RVC - CAL para la etapa de estimación de abundancias en el proceso de análisis de imágenes hiperespectrales*. Proyecto fin de grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación.
- Leiva-Valenzuela, G. A., & Lu, R. A. (2013). Prediction of firmness and soluble solids content of blueberries using hyperspectral reflectance imaging. *Journal of Food Engineering*, 115(1), 91-98.
- Li, X., Wei, Y., Xu, J., Feng, X., Wu, F., Zhou, R., ... He, Y. (2018). SSC and pH for sweet assessment and maturity classification of harvested cherry fruit based on NIR hyperspectral imaging technology. *Postharvest Biology and Technology*, 143, 112-118.
- Lian, Y., Long, Y., Song, H., & He, D. (2019). Determination of cherry tomatoes soluble solids content by hyperspectral imaging technology and modified interval random frog. *International Agricultural Engineering Journal*, 28(4), 313-321.
- Liu, L., Shi, X., Zhang, S., Shi, Y., & Long, Y. (2020). Saccharinity test on cherry tomatoes based on hyperspectral imaging. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 15(1), 103-11.
- Liu, Q., Sun, K., Peng, J., Xing, M., Pan, L., & Tu, K. (2018). Identification of Bruise and Fungi Contamination in Strawberries Using Hyperspectral Imaging Technology and Multivariate Analysis. *Food Analytical Methods*, 11(5), 1518-1527.
- Liu, Q., Sun, K., Zhao, N., Yang, J., Zhang, Y., Ma, C., ... Tu, K. (2019). Information fusion of hyperspectral imaging and electronic nose for evaluation of fungal contamination in strawberries during decay. *Postharvest Biology and Technology*, 153, 152-160.
- Liu, Q., Wei, K., Xiao, H., Tu, S., Sun, K., Sun, Y., ... Tu, K. (2019). Near-infrared hyperspectral imaging rapidly detects the decay of postharvest strawberry based on water-soluble sugar analysis. *Food Analytical Methods*, 12(4), 936-946.
- Liu, Y., Zhou, S., Wu, H., Han, W., Li, C., & Chen, H. (2022). Joint optimization of autoencoder and Self-Supervised Classifier: Anomaly detection of strawberries using hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198.
- Lo Bianco, R., & Mirabella, F. (2018). Use of leaf and fruit morphometric analysis to identify and classify white mulberry (*Morus alba* L.) genotypes. *Agriculture (Switzerland)*, 8(10).
- Lu, J., Ehsani, R., Shi, Y., Abdulridha, J., de Castro, A. I., & Xu, Y. (2017). Field detection of anthracnose crown rot in strawberry using spectroscopy technology. *Field detection of anthracnose crown rot in strawberry using spectroscopy technology*, 135, 289-299.
- Lu, W., Cai, M.-M., Zhang, Q., & Li, S. (2021). Fast Classification Method of Black Goji Berry (*Lycium Ruthenicum* Murr.) Based on Hyperspectral and Ensemble Learning. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi/Spectroscopy and Spectral Analysis*, 41(7), 2196 - 2204.
- M., S., Schumann, A., & Boyd, N. (2019). Detection of Carolina Geranium (*Geranium carolinianum*) Growing in Competition with Strawberry Using Convolutional Neural Networks. *Weed Science*, 67(2), 239 - 245.
- M., Z., C., L., F., T., & F., Y. (2017). Detection of internally bruised blueberries using hyperspectral transmittance imaging. *Transactions of the ASABE*, 60(5), 1489-1502.

- Ministerio de Comercio Exterior y Turismo. (11 de Agosto de 2022). *Perú se mantendría como líder mundial en exportaciones de arándanos en el 2022*. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/mincetur/noticias/639924-peru-se-mantendria-como-lider-mundial-en-exportaciones-de-arandanos-en-el-2022>
- Miranda, J., Alves, M., Pozza, E., & Santos, H. (2020). Detection of coffee berry necrosis by digital image processing of landsat 8 oli satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 85.
- Nedomová, Š., Kumbár, V., Pavloušek, P., Pytel, R., Lampf, L., & Buchar, J. (2017). Effect of harvest date on composition and geometry of grape berries. *European Journal of Horticultural Science*, 82(1), 21-30.
- Nguyen, L., Visi, A., Baranyai, L., Friedrich, L., & Mahajan, P. (2020). Application of hue spectra fingerprinting during cold storage and shelf-life of packaged sweet cherry. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(5), 2689 - 2702.
- Park, B., Shin, T.-S., Cho, J.-S., Lim, J.-H., & Park, K.-J. (2022). Characterizing Hyperspectral Microscope Imagery for Classification of Blueberry Firmness with Deep Learning Methods. *Agronomy*, 12(1).
- Przybył, K., Pilarska, A., Duda, A., Wojcieszak, D., Frankowski, J., Koszela, K., . . . Gierz, Ł. (2019). Health properties and evaluation of quality of dried strawberry fruit produced using the convective drying method with neural image analysis. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*.
- Pullanagari, R. R., & Li, M. (2020). Uncertainty assessment for firmness and total soluble solids of sweet cherries using hyperspectral imaging and multivariate statistics. *Journal of Food Engineering*, 289. doi:10.1016/j.jfoodeng.2020.110177
- Qiao, S. W., Zhang, J., & Pei, Z. (2020). Detection and Classification of Early Decay on Blueberry Based on Improved Deep Residual 3D Convolutional Neural Network in Hyperspectral Images. *Scientific Programming*, 2020.
- Qiao, S., Tian, Y. G., He, K., Yao, P., Song, S., Wang, J., . . . Zhang, F. (2019). Research on simultaneous detection of SSC and FI of blueberry based on hyperspectral imaging combined MS-SPA. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12(4), 540-547.
- Raj, R., Cosgun, A., & Kulić, D. (2022). Strawberry Water Content Estimation and Ripeness Classification Using Hyperspectral Sensing. *Agronomy*, 12(2). doi:10.3390/agronomy12020425
- Sánchez, E. (2017). *Procesado de imágenes hiperespectrales*. Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid, Teoría de la Señal y Comunicaciones, Madrid.
- Sandino, J., Ramos, O., & Amaya, D. (2016). Method for estimating leaf coverage in strawberry plants using digital image processing. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(8), 716-721.
- Santa Cruz, M. (2018). *Evaluación del tiempo de vida útil del arándano (Vaccinium Corymbosum) fresco, variedad azul, almacenado en atmósfera modificada*. Tesis para optar el título profesional de ingeniero agroindustrial y comercio exterior, Universidad Señor de Sipán, Facultad de Ingeniería, arquitectura y urbanismo escuela académico profesional de ingeniería agroindustrial y comercio exterior, Pimentel.
- Sardar, H. (2013). Comparative quality analysis of berry fruit using image processing. *IET Conference Publications*, 2013(647), 344 - 350.
- Shao, Y., Wang, Y., Xuan, G., Gao, Z., Hu, Z., Gao, C., & Wang, K. (2020). Assessment of Strawberry Ripeness Using Hyperspectral Imaging. *Analytical Letters*, 54(10), 1547-1560.
- Shicheng, Q., Youwen, T., Qinghu, W., Shiyuan, S., & Ping, S. (2021). Nondestructive detection of decayed blueberry based on information fusion of hyperspectral imaging (HSI) and low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR). *Computers and Electronics in Agriculture*, 184.
- Siderhurst, M., Park, J., Buller, C., Iam, J., Manoukis, N., Jang, E., & Taylor, P. (2016). Raspberry Ketone Trifluoroacetate, a New Attractant for the Queensland Fruit Fly, *Bactrocera Tryoni* (Froggatt). *Journal of Chemical Ecology*, 42(2), 156-162.
- Siedliska, A., Baranowski, P., Zubik, M., & Mazurek, W. (2017). Detection of pits in fresh and frozen cherries using a hyperspectral system in transmittance mode. *Journal of Food Engineering*, 215, 61-71.
- Siedliska, A., Baranowski, P., Zubik, M., Mazurek, W., & Sosnowska, B. (2018). Detection of fungal infections in strawberry fruit by VNIR/SWIR hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology*, 139, 115-126.
- Siedliska, A., Zubik, M., Baranowski, P., & Mazurek, W. (2017). Algorithms for detecting cherry pits on the basis of transmittance mode hyperspectral data. *International Agrophysics*, 31(4), 543-549.
- Somogyi, E., Kun, Á., Lázár, J., Bodor-Pesti, P., & Nyitrai Sárdy, D. (2021). Quantitative analysis of the berry size in grapevine cultivar 'Italia' • Digital image analysis of the grapevine. *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 17, 29-43.
- Su, Z., Zhang, C., Yan, T., Zhu, J., Zeng, Y., Lu, X. G., & Fan, L. (2021). Application of Hyperspectral Imaging for Maturity and Soluble Solids Content Determination of Strawberry With Deep Learning Approaches. *Frontiers in Plant Science*, 12.
- Tardaguila, J., Diago, M., Millan, B., Blasco, J., Cubero, S., & Aleixos, N. (2013). Applications of computer vision techniques in viticulture to assess canopy features, cluster morphology and berry size. *Acta Horticulturae*, 978, 77-84.
- Wang, Z., Hu, M., & Zhai, G. (2018). Application of deep learning architectures for accurate and rapid detection of internal mechanical damage of blueberry using hyperspectral transmittance data. *Sensors (Switzerland)*, 18(4).
- Williams, D., Britten, A., McCallum, S. J., Aitkenhead, M., Aitkenhead, M., Loades, K., . . . Graham, J. (2017). A method for automatic segmentation and splitting of hyperspectral images of raspberry plants collected in field conditions. *Plant Methods*, 13(1).
- Yang, C., Lee, W. S., & Gader, P. (2014). Hyperspectral band selection for detecting different blueberry fruit maturity stages. *Computers and Electronics in Agriculture*, 109, 23-31.
- Yeh, Y.-H., Chung, W.-C., Liao, J.-Y., Chung, C.-L., Kuo, Y.-F., & Lin, T.-T. (2016). Strawberry foliar anthracnose assessment by hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 122, 1-9.
- Zhang, C., Guo, C., Liu, F., Kong, W., He, Y., & Lou, B. (2016). Hyperspectral imaging analysis for ripeness evaluation of strawberry with support vector machine. *Journal of Food Engineering*, 179, 11-18.
- Zhang, C., Wu, W., Zhou, L., Cheng, H., Ye, X., & He, Y. (2020). Developing deep learning based regression approaches for determination of chemical compositions in dry black goji berries (*Lycium ruthenicum* Murr.) using near-infrared hyperspectral imaging. *Food Chemistry*, 319.
- Zhang, J., Zhang, Q., & Whiting, M. (2014). Canopy light interception conversion in upright fruiting offshoots (UFO) sweet cherry orchard. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2014, ASABE 2014*, 2, 831-846.
- Zhang, M., Jiang, Y., Li, C., & Yang, F. (2020). Fully convolutional networks for blueberry bruising and calyx segmentation using hyperspectral transmittance imaging. *Biosystems Engineering*, 192, 159-175.
- Zhao, F., Yan, Z.-R., & Song, H.-Y. (2021). Hyperspectra Used to Recognize Black Goji Berry and Nitraria Tanggu. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi/Spectroscopy and Spectral Analysis*, 41(7), 2240 - 2244.
- Zhao, F., Yan, Z.-R., Xue, J.-X., & Xu, B. (2021). Identification of Wild Black and Cultivated Goji Berries by Hyperspectral Image. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi/Spectroscopy and Spectral Analysis*, 41(1), 201 - 205.
- Zhao, Y.-R., Yu, K.-Q., & He, Y. (2015). Hyperspectral Imaging Coupled with Random Frog and Calibration Models for Assessment of Total Soluble Solids in Mulberries. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2015.
- Zingaretti, L., Monfort, A., & Pérez, M. (2021). Automatic fruit morphology phenome and genetic analysis: An application in the octoploid strawberry. *Plant Phenomics*, 2021.