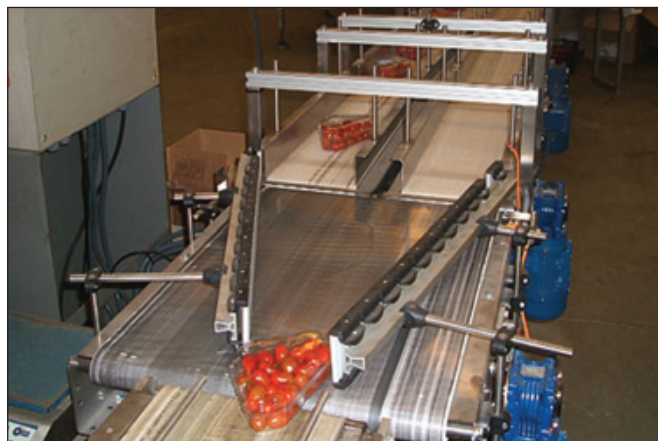


Tecnología Láser en sistemas automáticos de clasificación. Aplicación en la Industria Hortofrutícola



Félix Antonio Navas-Moya*

Ana Requena-Candela**

Alberto Requena-Rodríguez*

Luis Manuel Tomás-Balibrea***

Ingeniero Industrial

Ingeniera Agrónoma

Dr. en Ciencias Químicas

Dr. Ingeniero Industrial

*UNIVERSIDAD DE MURCIA. Facultad de Química. Dpto. de Química-Física. Campus de Espinardo - 30100 Espinardo (Murcia). Tfno: +34 868 887423. felix@um.es, rqna@um.es

** UNIVERSIDAD DE MURCIA. Facultad de Biología. Dpto. de Biología Vegetal. Campus de Espinardo - 30100 Espinardo (Murcia). Tfno: +34 868 884943. ani_reca@yahoo.es

***UNIVERSIDAD DE MURCIA. Grupo de Visión, Robótica y Proyectos de Ingeniería. Campus de Espinardo - 30100 Espinardo (Murcia). Tfno: +34 868 887970. luism.tomas@coiirm.es

Recibido: 20/07/2010 • Aceptado: 15/11/2010

Laser technology in automatic classification systems. A horticultural industry application

ABSTRACT

- Automatic classification systems represent a significant advance in the handling of products, likely to avoid many of the difficulties, troublesomes and costs of current industrial procedures. Horticultural industry requires automatic systems to guarantee an exhaustive all-units product classification, due to an increasingly-higher consumer-demanded quality level, which exceeds usual sampling control achievements.

Computer vision, ultrasonic techniques and visible and near infrared spectroscopy are becoming the most widespread among non-destructive techniques used for quality control in the food industry. Laser illumination as a source with its characteristics of bright, coherent, directional and monochromatic, overcomes many conventional spectroscopy disadvantages, allowing new measurement configurations. Correlations between detected radiation that has passed through the sample and its internal and external properties result in new procedures which allow prediction without damage. This article summarizes the followed steps which resulted in a pilot line execution for automatic handling of fruits and vegetables at industrial level, where laser illumination and mathematical models arising from research were combined allowing individual piece classification, at usual conveyor rates, according to their internal and external properties. Prototype results on tomatoes allow technology transference.

- **Keywords:** automation, laser, quality, non-destructive, NIR.

RESUMEN

Los sistemas automáticos de clasificación suponen un avance considerable en la manipulación de productos, permitiendo soslayar buena parte de las dificultades, complicaciones y coste que implican los procedimientos actuales utilizados en la industria. Las empresas hortofrutícolas precisan del desarrollo de sistemas automáticos, capaces de garantizar una clasificación exhaustiva de todas sus unidades de producto, ante el cada vez más elevado nivel de calidad, exigido por los consumidores, que excede las posibilidades de la mayoría de las técnicas de control de calidad muestral implantadas en estas industrias.

De entre las técnicas no destructivas aplicables al control de calidad en la industria alimentaria destacan las de visión artificial, las ultrasónicas y las espectroscópicas de visible e infrarrojo cercano. La iluminación con láser, como fuente de luz con características de brillo, coherencia, direccionalidad y monocromaticidad, ha permitido implementar nuevas técnicas de medida que superan las limitaciones aparecidas con el empleo de métodos espectroscópicos. La correlación, entre las características de la radiación láser detectada tras atravesar la muestra y sus propiedades internas y externas, ha permitido encontrar un modelo que posibilita cuantificar dichas propiedades sin someter los productos a técnicas que los deterioren.

En este artículo se resumen los trabajos que finalmente han posibilitado implementar una línea piloto para manipulación automática de productos hortofrutícolas a nivel industrial que, combinando el empleo de iluminación láser y los modelos matemáticos resultantes de las investigaciones, permite la clasificación individualizada de cada unidad de producto, a las velocidades requeridas por la industria, en función de sus propiedades internas y externas. Dicho prototipo ha sido validado

en la clasificación de tomates, permitiendo los excelentes resultados obtenidos iniciar la transferencia de esta tecnología a la industria.

Palabras clave: automatización, láser, calidad, no destructiva, NIR.

1. INTRODUCCIÓN

En general las empresas, y en particular las del sector alimentario, se encuentran ante la necesidad de ofertar productos lo más homogéneos posibles y con requisitos de calidad adaptables para así poder dar respuesta a su cada vez más segmentado -por la relación calidad/precio- mercado de clientes y consumidores. Pero la calidad de un producto hortofrutícola, para cuya determinación los consumidores tan solo podían guiarse hasta ahora por aspectos de su apariencia -tales como tamaño, forma, textura, color uniforme, etc.-, hoy día requiere conocer otras propiedades, derivadas de sus parámetros internos, tales como firmeza, maduración e, incluso, aroma.

La fuerte competencia internacional, en dónde los productos españoles están experimentando un notable retroceso a consecuencia del impacto que sobre su coste final representa la mano de obra, está llevando al sector a la necesidad de disponer de sistemas automáticos de clasificación, que no sólo hagan posible disminuir los procesos manuales, sino que permitan asegurar la calidad demanda por los diferentes sectores de población.

De ahí que, en los últimos tiempos se observe un incremento de los esfuerzos investigadores de científicos e ingenieros por desarrollar técnicas de ensayo no destructivas aplicables a la determinación de propiedades internas de productos hortofrutícolas. En García-Ramos (2005) se realiza una excelente revisión de las principales técnicas existentes, dedicando especial incidencia a los sensores empleados y sus posibles aplicaciones industriales. Las líneas de investigación abarcan técnicas de *ultrasonidos* (Mizrach, 2008), diversas técnicas espectroscópicas, como *resonancia magnética nuclear* (RMN) (Tu et al, 2007), *espectrometría de visible* (Ito & Morimoto, 2009) e *infrarrojo cercano* (NIR) y *medio* (Nicolai et al., 2003) o *rayos X*, el análisis de variadas propiedades como la respuesta al impacto, el comportamiento en las vibraciones, magnitudes densiométricas, propiedades magnéticas, tratamiento con visión artificial (García-Ramos, 2005) o innovadoras tecnologías como las denominadas *narices electrónicas* (Brezmes et al., 2005).

Buena parte de estas técnicas buscan determinar el aroma de los productos y las correlaciones con otras propiedades (Lu et al., 2009), si bien, por el excesivo tiempo de procesado de la muestra que requieren, todas tienen en común el no resultar aplicables para el desarrollo de sistemas automáticos en tiempo real. Las técnicas de RMN todavía no han alcanzado el grado de desarrollo deseado para permitir la determinación de parámetros y características internas (Gao et al., 2010), mientras que la aplicación de rayos X -y en

general de cualquier radiación ionizante- a productos para consumo humano no cuenta con una buena aceptación, al menos por el momento, ni de los consumidores, ni de los empresarios que, por su uso, pasan a estar afectados por una legislación que les obliga a requerir autorizaciones especiales.

La aplicación de las técnicas de análisis de impacto y vibraciones, ultrasonidos y visible-NIR han dado lugar al desarrollo de prototipos, utilizables para la determinación de diferentes parámetros, pero sujetos a limitaciones en su aplicación a sistemas automáticos en entornos industriales, por lo que no han podido resultar transferibles para uso generalizado en la industria.

En cualquier caso, la tendencia actual hacia la automatización del proceso de determinación de parámetros internos de forma no destructiva, se basa en el empleo de técnicas espectroscópicas; en especial en las regiones espectrales visible e infrarroja. El principal inconveniente ha sido el empleo de fuentes de radiación convencionales, dotadas de poco poder de penetración en los tejidos o fluidos, lo que ya en su inicio se intentó solventar con la utilización de fibras ópticas para canalizar, concentrar y dirigir la luz hacia los puntos de interés y de medida, tratando así de evitar la dispersión.

El interés de la tecnología láser se centra en la potencialidad de sus propiedades singulares (Noh & Lu, 2007). El brillo o intensidad aporta la capacidad de suministrar un elevado número de fotones, de forma que tras experimentar el haz multitud de procesos en su recorrido por el interior del material orgánico, se garantiza la salida al exterior del suficiente número de fotones que han atravesado la muestra, haciendo posible que su detección. A ello contribuye la monocromaticidad, ya que, al no alterarse la frecuencia en los procesos de reflexión, transmisión y dispersión, el detector puede seleccionar cualitativamente los fotones de interés, permitiendo cuantificar los procesos. No obstante, no todas las frecuencias reflejan, transmiten o dispersan de la misma forma, por lo que se hace necesario identificar la radiación más conveniente para cada proceso relevante. La direccionalidad y la coherencia refuerzan el comportamiento señalado afectando a los sistemas de detección.

Se trata, por tanto, de aprovechar las ventajas del láser y de analizar las respuestas de los productos de interés ante la iluminación con la/s frecuencias apropiadas y determinar correlaciones con propiedades internas y externas. El objetivo será encontrar un modelo que, una vez calibrado y validado, sea capaz de predecirlas, teniendo siempre presente que la configuración de medida debe ser susceptible de poder ser implementada para su funcionamiento en una línea en tiempo real.

Como resultado se ha desarrollado un prototipo de sistema de clasificación automático que emplea un reducido número frecuencias láser pero suficiente para obtener valores de propiedades con la rapidez necesaria para dar respuesta a las velocidades de las cintas transportadoras industriales. Con él se ha evaluado la clasificación de los tomates transportados

por una cinta, determinando en tiempo real los parámetros internos de cada unidad a partir del análisis de la radiación láser, sin necesidad de recurrir al empleo de las técnicas muestrales y los ensayos destructivos empleados en la actualidad por la industria.

2. SISTEMA DE CONTROL DE CALIDAD

El sistema de trabajo propuesto puede resumirse con el esquema general mostrado en la Fig. (1). Un detector de presencia de productos permite al sistema de control activar la emisión de una fuente láser. A través de detectores se capta parte de la señal del haz que ha atravesado el producto. Ésta, tras ser analizada en la unidad de control, permite asignar a esa unidad de producto la categoría más adecuada en la que debe ser encuadrada en función de las categorías preestablecidas al inicio. A dichos efectos la propia unidad de control se encargará de activar las señales de los actuadores del mecanismo de selección, conduciendo cada unidad de producto a su correspondiente pulmón de almacenamiento.

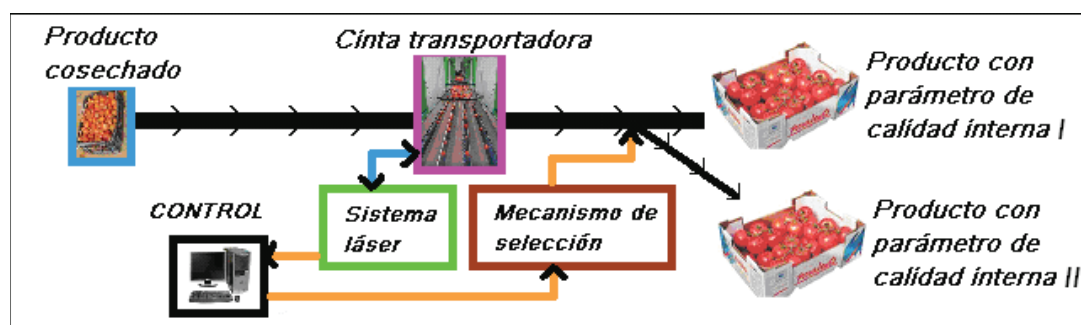


Fig. 1: Esquema general del sistema

2.1. TIPO DE LÁSER Y DETECCIÓN

Dos son los modos de funcionamiento de los sistemas láser: pulsado o continuo. Para poder analizar las propiedades internas de un producto es necesario que la radiación láser no tan sólo penetre en él, sino que sea capaz de atravesarlo completamente, saliendo parte de ella nuevamente al exterior. Por tanto se requerirá emplear una fuente láser de gran intensidad que si se aplicara en modo continuo podría causar daños irreversibles en el producto. De ahí que se haya optado por recurrir a la utilización de un láser pulsante, capaz de suministrar gran energía en un intervalo de tiempo reducido, con grandes potencias de pico pero reducida en valor medio, evitando así causar deterioros al producto.

Para este trabajo se ha utilizado un láser de nitrógeno marca *Laser Science Inc.*, modelo VSL-337ND-S, Fig.(2). Este láser pulsado se utiliza para bombear cubetas, modelos DUO-210 y DUO-220, en las que se introducen diferentes colorantes. En función del colorante empleado el sistema permite obtener longitudes de onda de trabajo desde el ultravioleta al infrarrojo cercano (de 370 a 950nm). Así, según el medio bombeado, se abarcan intervalos de longitudes de onda [IR-125 (885-945nm), HITC(850-890nm), DOTC(760-

comportamiento de estos sistemas en entornos industriales. Así, al ampliar el rango en valores de respuesta, se mejorará el análisis discriminante de los valores de las propiedades relacionadas.

El uso del láser es compatible con las tres configuraciones habituales de medida empleadas en las técnicas espectroscópicas de infrarrojo cercano y visible: transmisión, reflectancia o transreflectancia (la denominación difiere de unos autores a otros), y absorción.

El aumento en intensidad que aporta el láser implica poder utilizar disposiciones con las que en las técnicas



Fig.2: Láser de bombeo de nitrógeno con la plataforma para cubetas de colorante (encima). Ésta dispone de un tornillo micrométrico con el que manualmente se gradúa la salida con resolución de 1 nanómetro.

espectroscópicas convencionales no había posibilidad de detección, aportando una mayor gama de ángulos de incidencia y de detección que se traducen en una mayor facilidad de adaptación a diferentes superficies de trabajo. En nuestros trabajos, tanto para el montaje experimental como para el prototipo, las detecciones se realizan a 45 grados con respecto a la dirección del haz principal del láser, tanto en un plano vertical como horizontal. También a 90 grados en el plano horizontal, no en el plano vertical pues ahí se encuentra el sépalo, y en configuración de transmisión.

En cuanto a los detectores se ha recurrido al empleo de los de alta velocidad de silicio, de la marca *Thorlabs*, det-210 y det-22, empleándose una lente esférica plana convexa, con su propio soporte de la marca *CVI Laser Optics*, para la focalización del haz sobre el detector de transmisión, Fig. (3) y Fig.(4).

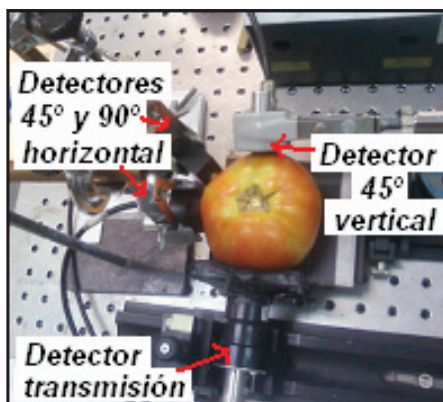


Fig. 3: Montaje experimental. Vista en planta. En la parte superior está el láser y en la inferior se observa el detector de transmisión en contacto con el tomate. Los detectores a la izquierda de la pieza son los de transreflectancia a 90 y 45° en configuración horizontal. El de 45° en vertical aparece encima sin el cable de conexión para facilitar su visualización.

En la Fig. (4) se incluye un esquema de las configuraciones de medida. La adquisición de datos se lleva a cabo mediante un osciloscopio TEKTRONIX TDS.210, de 4 canales (entradas), con tiempo de muestreo de 1 nanosegundo y 80 de adquisición en esa resolución, con conexión directa a un ordenador al que se transfieren las señales registradas.

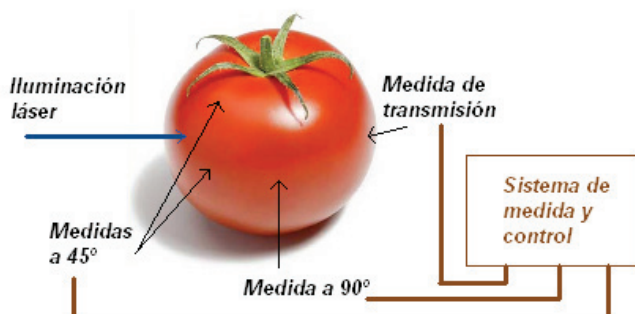


Fig. 4: Esquema de formas de medida. El montaje experimental en laboratorio persigue captar las medidas que se detallan.

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología desarrollada se ha concretado en ocho etapas que abordaron desde la elección del producto al que aplicar el sistema hasta su clasificación operativa.

La primera etapa implica que cada producto demanda un estudio individualizado, que depende de sus propias características y de las propiedades ante las que deberá clasificarse (Farahnaky et al., 2010) y que abarcan desde azúcares, cenizas, humedad, acidez, pH, almidón, firmeza, omegas 3 y 6, licopeno, etc. hasta el índice de maduración o contenidos en proteínas o grasas en su caso.

La segunda etapa requiere conocer las propiedades físico-químicas que determinan las características organolépticas que definen la calidad del producto. Para ello se recurre a paneles sensoriales o a estudios preexistentes al objeto de identificar sus propiedades más representativas, que deben ser objeto de posterior estudio.

La tercera etapa consiste en obtener el espectro de los productos a caracterizar, con objeto de que, una vez fijada la propiedad, se determinen las regiones espectrales que experimentan un mayor cambio y, por tanto, las longitudes de onda del láser, o láseres, a utilizar.

La cuarta etapa requiere disponer del material adecuado con el que realizar un montaje experimental en el que verificar dos aspectos. Por una parte, el diseño de una configuración de medida adecuada que, sin olvidar su posterior implantación industrial, permita una fácil adquisición de la respuesta espectral; sistema que, por las ventajas anteriormente expuestas, decidimos basar en la tecnología láser. El segundo aspecto a tratar es el de los ensayos destructivos, que implican la manipulación individual de cada unidad de producto y la aplicación de las técnicas experimentales más apropiadas para la determinación de sus propiedades. El objetivo final de esta etapa es disponer de una base de datos que permita poder correlacionar los espectros con los valores de las propiedades de interés de cada unidad de producto.

La quinta etapa implica el uso de técnicas matemáticas lineales (*PCA-Principal Component Analysis*, *PCR-Principal Component Regression*, *PLS-Partial Least Squares* y *MLR-Multiple Linear Regresión* (Liu et al., 2008. Moghimi et al., 2010)) y no lineales (*RRNN-Redes Neuronales* y *Kernel-based* (Boonmung et al., 2006)) para generar modelos de correlación entre los valores espectrales y los datos de las propiedades que caracterizan las unidades de producto (resultado de los ensayos destructivos). Dado que no se encontraron estudios previos que abordaran la selección de la técnica matemática más idónea para la identificación de cada propiedad fue preciso recurrir a la experimentación. Para ello se diseñaron fases de calibración, validación y predicción. Durante la validación, para una técnica concreta, se introdujeron los datos espectrales y de propiedades internas del 90% de las unidades de producto, generándose los parámetros del modelo. En la validación se mostraron al modelo los datos espectrales del 10% de las unidades de producto que no fueron empleadas para calibración, proporcionando éste los datos de sus propiedades que se

contrastaron con los resultantes tras someter las muestras a los ensayos destructivos.

Tres fueron las acciones que se consideraron en los casos en que la validación del modelo fue considerada como insatisfactoria: modificar la configuración de medida de los espectros para conseguir señales más adecuadas; cambiar la zona espectral inicialmente seleccionada; o descartar la técnica matemática procediendo a experimentar con otra.

Por el contrario, en aquellos casos en los que se consideró el error como aceptable, se procedió a considerar dicho modelo como válido para la fase de predicción que, en definitiva, es la de funcionamiento operativo del sistema: predecir los parámetros de interés de cada unidad de producto a partir de las respuestas espectrales sin que los productos tengan que ser sometidos a ensayo destructivo alguno.

En la sexta etapa se procede a simplificar los modelos matemáticos y a intentar incrementar el coeficiente de correlación eliminando longitudes de onda poco representativas. Cuando gran parte de la información espectral y su relación con la propiedad se describe apropiadamente, usando una única o unas pocas longitudes de onda, los cálculos se reducen notablemente, como puede ocurrir con ciertos métodos lineales. Si al eliminar algunas longitudes de onda los coeficientes de correlación se incrementan, resultando admisibles para los propósitos finales, el modelo es válido debido a la poca influencia del resto. Cuestión que resulta de gran importancia ya que evita registrar un rango espectral amplio, reduciéndose el estudio en complejidad, incrementado la velocidad de proceso y, de manera especial, disminuyendo el coste de la configuración a implementar para la solución industrial.

En la séptima etapa, una vez validadas en laboratorio las técnicas de adquisición de los datos y los valores de los ensayos destructivos, determinado el modelo y la longitud o longitudes de onda apropiadas, se está en condiciones de abordar la fase de validación sobre el prototipo preindustrial. Éste consta de una cinta transportadora, por la que circulan unidades de producto a velocidad de proceso, y sobre los que, en un determinado punto, se hace incidir la iluminación láser, adquiriéndose la señal resultante que se emplea para predecir, con el modelo matemático implementado, las

propiedades correspondientes a cada unidad de producto, con cuyos parámetros se procede a, mediante un clasificador, asignarles la categoría más acorde de entre las opciones posibles.

Por último, en la octava etapa, se someten a ensayos destructivos la totalidad de las muestras clasificadas con el prototipo en la etapa anterior, determinando las propiedades individuales de cada producto. Tras ellos se procede a contrastar estos resultados con los de predicción correspondientes a cada unidad de producto, validándose todo el sistema.

4. RESULTADOS: APLICACIÓN AL CASO DEL TOMATE

La metodología descrita en el apartado anterior se ha desarrollado y verificado para el caso concreto de clasificación de tomate *Lycopersicon Esculentum* de conformidad con:

4.1. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Se utilizaron 90 piezas de tomate de la variedad long-life calibre 75-85 mm determinándose mediante técnicas destructivas convencionales las propiedades (Lien et al., 2009. Sinesio et al., 2010): pH, grados Brix, acidez, índice de maduración, durezas superficial e interna, residuo seco y color interior. Se analizó la distribución de los datos comprobando que respondían a una curva normal todas las propiedades citadas. A modo de ejemplo se incluye la gráfica de los valores de residuo seco, Fig.(5), y su representación respecto a los valores de °Brix, fig.(6). El color externo se determinó subjetivamente comparando con una tabla de colores, con valores de referencia entre el 1 (el verde más intenso) y el 9 (el rojo más intenso).

4.2. MEDIDAS ESPECTRALES

Mediante el láser y los colorantes se obtuvo la respuesta espectral en las zonas visible e infrarroja del espectro electromagnético para cada uno de los 90 tomates. Conforme se indica en la Tabla 1 se determinaron, para los rangos de longitudes de onda espectrales considerados, el número de unidades en las cuales el espectro obtenido incorporaba un excesivo nivel de ruido.

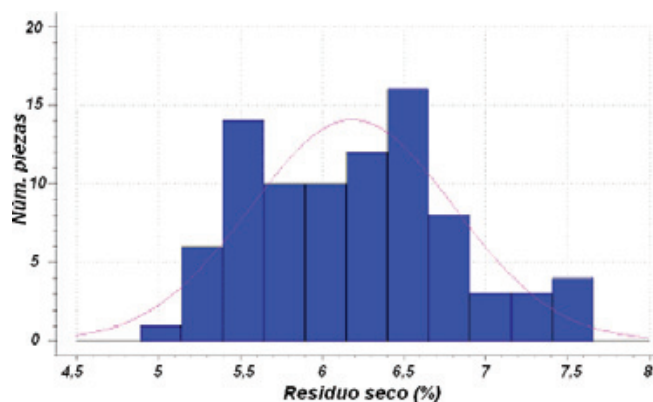


Fig.5: Distribución de los valores de residuo seco obtenidos para los 90 tomates ensayados

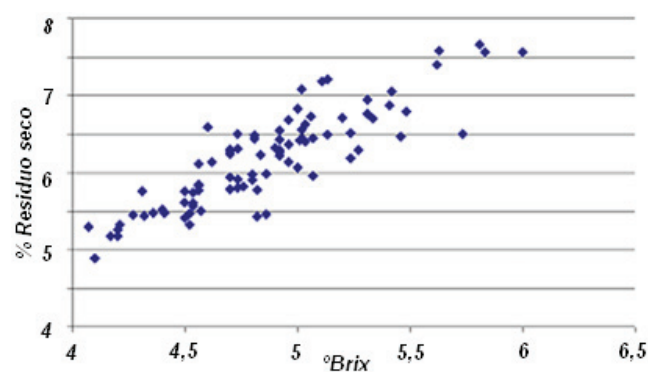


Fig.6: Representación de los °Brix respecto a su residuo seco para los 90 tomates ensayados

En cuanto a los espectros medidos sobre los tomates se observó que los perfiles eran similares. A modo de ejemplo, en la Fig.(7) se representan los espectros obtenidos empleando el colorante DCM.

4.3. MODELOS MATEMÁTICOS LINEALES Y NO LINEALES

Las técnicas matemáticas lineales utilizan, para la definición del modelo matemático más óptimo a cada propiedad, como entradas o variables independientes los espectros obtenidos para cada tomate y como salidas o variables dependientes los valores de las propiedades

redes neuronales multicapa con aprendizaje *backpropagation* (Montaña-Cámara et al., 2010), utilizando para ello el programa *Matlab* con la *toolbox* de redes neuronales. Los datos de entrada para la red neuronal fueron los espectros medidos de los tomates y la salida los valores de las propiedades obtenidos en los ensayos destructivos, manejándose una única propiedad con cada red, en cada aprendizaje, obteniéndose los coeficientes de correlación representados en la Tabla 3.

A partir de los datos obtenidos con los diferentes modelos se pasó a abordar su simplificación y optimización. Manteniendo el número de muestras, ya que no se eliminaron tomates medidos, se buscaron aquellas longitudes de onda

Configuración \ nm	700-621	620-576	590-551	560-481	490-451	460-421
45° Horizontal	90	90	90	75(7)	64(54)	70(45)
45° Vertical	90	90	90	74(6)	64(49)	70(45)
90° Horizontal	77	82(15)	-	23	64(50)	70(62)
Transmisión	68(12)	-	-	49(16)	-	-

Tabla 1: Número de tomates medidos por tipo de configuración de medida y rangos de longitudes de onda espectrales. Entre paréntesis cantidad de tomates con espectros muy ruidosos de difícil utilización en cálculos sucesivos.

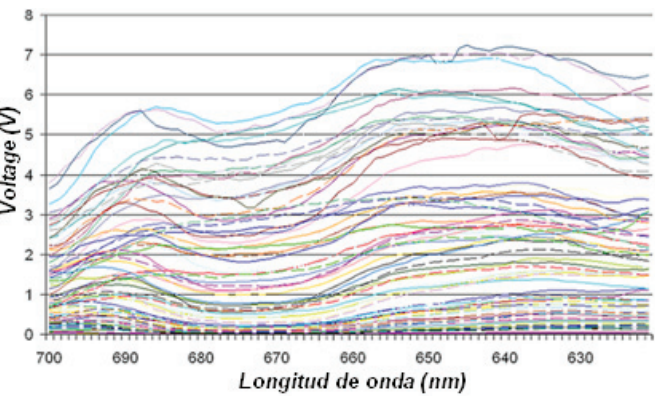


Fig.7: Espectros en el rango espectral de 621 a 700 nm para la configuración de medida a 45° horizontal, de los 90 tomates.

Propiedad	621a 700 nm PLS	621a 700 nm PCR	621 a 700 nm MLR
Maduración	-0,02	-0,02	-0,10
pH	-0,36	-0,37	0,01
°Brix	0,33	0,35	-0,12
Residuo seco	0,31	0,31	-0,18
Firmeza	0,54	0,54	-0,08
Dureza superficial	0,35	0,35	-0,09
Color interno	0,77	0,77	0,06
Acidez	0,20	0,19	-0,02

Tabla 2: Coeficientes de correlación en la fase de validación obtenidos con métodos lineales, según la propiedad y rango espectral de 621 a 700 nm.

determinadas en los ensayos destructivos. En la Tabla 2 se muestran, a modo de ejemplo, algunos coeficientes de correlación obtenidos con diversos modelos, para lo que se utilizó el software *Unscrambler*, v.7.0 de CAMO.

También se abordó el estudio de esta problemática mediante técnicas no lineales, para lo cual se experimentó con

que, para alguna propiedad concreta, exhibían una baja correlación. Lo que pudo evidenciarse con los métodos PLS y MLR, Tabla 4. Por el contrario otros métodos, como el PCA o el PCR, no permiten una simplificación directa ya que en las componentes principales participan, en mayor o menor porcentaje, todas las variables independientes.

Propiedad \ nm	621 a 700 nm	576 a 620 nm	551 a 590 nm	551 a 700 nm
Maduración	0,70	0,70	0,66	0,72
pH	0,80	0,68	0,80	0,87
°Brix	0,65	0,65	0,67	0,71
Residuo seco	0,72	0,72	0,73	0,74
Firmeza	0,65	0,62	0,81	0,87
Dureza superficial	0,58	0,72	0,80	0,92
Color interno	0,91	0,97	0,98	0,95
Acidez	0,75	0,70	0,70	0,84

Tabla 3: Coeficientes de correlación en validación encontrados con métodos no lineales, según la propiedad y rango espectral utilizado en los cálculos.

4.4. VALIDACIONES SOBRE EL PROTOTIPO

Utilizando los modelos lineales simplificados obtenidos conforme a lo descrito en el apartado anterior, haciendo uso del prototipo, Fig.(8), y a partir de las mediciones resultantes para las longitudes de onda óptimas para cada propiedad, se predeterminó su valor para cada uno de los 20 tomates de la muestra considerada en un ensayo de validación.

Los modelos lineales para interrelacionar las propiedades internas con la respuesta espectral en diversos rangos ofrecen unas correlaciones relativamente bajas (Tabla 2). La respuesta es desigual en los rangos espectrales considerados, siendo los datos que se incluyen representativos en líneas generales. En el mejor de los casos se obtiene un coeficiente de correlación de 0,77 para el color interno en los modelos

Propiedad	Longitudes de onda (nm)	Configuración	Método	Coefficiente correlación
Maduración	686,640,623,620	Transmisión	PLS	0,70
pH	610,600,591,580	Transmisión	PLS	0,74
°Brix	606,601,575	Reflexión 45° vertical	PLS	0,69
Residuo seco	681,659	Reflexión 90°	MLR	0,68
Firmeza	656	Reflexión 45° horizontal	PLS	0,81
Dureza superficial	575	Reflexión 45° vertical	MLR	0,72
Color interno	575	Reflexión 45° vertical	PLS	0,96
Acidez	547,506,484	Reflexión 90°	PLS	0,70

Tabla 4: Valores concretos de las longitudes de onda de los mejores ajustes y su correspondiente coeficiente de correlación en validación.



Fig.8: Prototipo en funcionamiento. Las configuraciones de medida mantienen los ángulos y la disposición usados en el laboratorio. Sobre el área de medición se coloca una caja negra (no mostrada) para aislarla de la iluminación exterior. El computador empleado para el montaje en el prototipo es el mismo que el usado en el laboratorio para la construcción del modelo y la velocidad de la cinta donde se colocan los detectores es de unas dos unidades por segundo.

Posteriormente dichos tomates se sometieron a los correspondientes ensayos destructivos, al objeto de poder cuantificar el valor de sus propiedades, siendo los coeficientes de correlación de validación del prototipo los mostrados en la Tabla 5.

con PLS y PCR, considerándose excesivamente baja la del MLR.

Al aplicar los métodos no lineales la correlación mejora sustantivamente, aumentando y alcanzando valores muy interesantes para todas las propiedades. Comparativamente estos modelos son más ventajosos que los lineales. En las redes neuronales el tiempo de proceso y complejidad de la red está relacionado con el número de neuronas empleadas. En nuestro caso se emplearon de 8 a 80 resultando las mejores validaciones al usar entre 20 y 40.

Pero el uso de redes neuronales conlleva la medida de todo el espectro y una mayor lentitud en los cálculos. Por esta razón, y buscando los sistemas más económicos y rápidos, se mejoran los coeficientes de los métodos lineales con el objetivo de aprovechar la simplificación que permiten ciertos modelos. Para ello se empleó un proceso selectivo

	Maduración	pH	°Brix	Residuo seco	Firmeza	Dureza superficial	Color interno	Acidez
Coefficiente de correlación	0,62	0,67	0,62	0,61	0,74	0,65	0,92	0,66

Tabla 5: Coeficientes de correlación obtenidos en la fase de validación del prototipo.

5. DISCUSIÓN

Las correlaciones observadas con las propiedades determinadas mediante ensayos destructivos permiten validar lo ya establecido por algunos métodos de medida referenciados en la bibliografía. Por ejemplo, la correlación entre grados °Brix y residuo seco es alta y positiva, de manera similar a como ocurre entre firmeza y dureza superficial. Destaca también la correlación de 0,94 entre el color interno (del triturado) y externo (apariencia).

de prueba y error en el que sistemáticamente se fueron eliminando aquellas longitudes de onda menos significativas, hasta llegar a identificar las que optimizan el coeficiente de correlación. Efectivamente pudo comprobarse la mejora sustancial obtenida al eliminar aquella información que poco o nada aporta en la determinación de la propiedad (Tabla 4 frente a Tabla 2). De esta manera se hace posible determinar, con una correlación lineal de 0,96 ($R=0,96$), el color del triturado interior del tomate empleando un único

láser a 575 nm; la firmeza, con una $R=0,81$, con un láser a 656 nm; mientras que una propiedad como el residuo seco, para predecirse con una $R=0,7$, requiere dos longitudes de onda: 681 y 659 nm. Por supuesto cada propiedad necesita emplear sólo el láser apropiado, no pudiéndose obtener varias propiedades conjuntamente, a menos que en la simplificación la combinación de longitudes de onda a utilizar sea idéntica.

En lo que respecta a los resultados de la validación del modelo en el prototipo (Tabla 5) hay que señalar el elevado valor de correlación lineal con la firmeza ($R=0,72$) al iluminar los productos con un láser a 656 nm. Mientras que el color interno puede predecirse con un índice $R=0,92$ mediante una iluminación láser a 575 nm. Esta última propiedad pudo ser empleada para clasificar automáticamente con el prototipo, en tres grupos (verde, intermedio y maduro), una muestra de 21 tomates sin que el sistema cometiera error alguno. Si bien pudo comprobarse que con el prototipo no se obtuvieron los mismos coeficientes que en los ensayos estáticos previos realizados en condiciones de laboratorio, éstos continuaron siendo elevados, aunque lógicamente debió limitarse la zona de paso para que simultáneamente no pudiera pasar frente al sistema de medición más de una sola unidad de producto.

6. CONCLUSIONES

Se ha demostrado la posibilidad de emplear el láser como fuente de luz en los métodos espectroscópicos aportando una serie de beneficios con respecto a las fuentes tradicionales. Las principales ventajas son una fácil implementación sobre los sistemas actuales así como mejoras en intensidad, direccionalidad y velocidad, resultando aplicable a un sistema de clasificación automática de productos hortofrutícolas.

Con respecto a la metodología de trabajo planteada en ocho fases, se ha comprobado que el análisis de la correlación entre los espectros obtenidos en las diferentes regiones espectrales y las propiedades evaluadas mediante técnicas destructivas permite identificar la configuración óptica apropiada, la técnica matemática más conveniente y las longitudes de onda que definen el modelo más óptimo.

La simplificación de los sistemas lineales conlleva encontrar modelos sencillos que permiten trabajar con pocas longitudes de onda, reduciendo costes de implementación en sistemas industriales, pero manteniendo altos valores de correlación.

En cuanto a la aplicación desarrollada para el caso concreto del tomate se ha construido un prototipo que permite su clasificación por parámetros internos, sin requerir el empleo de ensayos destructivos, aportando sustanciales mejoras con referencia a los sistemas tradicionales de manipulación empleados en las actuales líneas industriales.

7. PERSPECTIVAS Y TRABAJOS FUTUROS

Es posible identificar nuevos productos hortofrutícolas susceptibles de ser clasificados utilizando esta metodología. De sencillo estudio resultarán aquellos que, como el tomate, presenten medidas de transreflectancia a diversos ángulos, así como aquellos que, al presentar una piel no demasiado

gruesa, permita el paso de los fotones a su interior (fresa, uva, manzana, pera, etc.). En el caso de frutas con hueso (ciruela, cereza, melocotón, albaricoque, etc.) se presentará la dificultad añadida de que sus resultados serán altamente dependientes de la zona de incidencia de la radiación.

El número de unidades de producto a iluminar por segundo, y consecuentemente la velocidad de la línea de clasificación, viene condicionado por la frecuencia de disparo del láser. De ahí que un elemento crítico sea la capacidad de trabajo máxima con la que se mantiene el sistema en el grado de fiabilidad exigido.

8. AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Fomento y a la Fundación Séneca de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia por la concesión para la realización de este trabajo de las becas asociadas “a la realización de Proyectos de Investigación Aplicada(1999-2000)” y “a la realización de Proyectos de Investigación en I+D, Innovación y Transferencia de Tecnología(2000-2003) de la Consejería de Trabajo y Política Social de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, cofinanciada por el Fondo Social Europeo a través del Programa Operativo Integrado para la Región de Murcia (2000-2006)”. Al Departamento de Química Física, Grupo de Láseres, Espectroscopia Molecular y Química Cuántica, y al Grupo de Visión, Robótica y Proyectos de Ingeniería; ambos de la Universidad de Murcia. Así como a las empresas Agrytel S.L. y Paloma S.A., quienes facilitaron los productos requeridos para estas investigaciones, así como el asesoramiento en clasificación de productos hortofrutícolas de sus cualificados expertos.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Boonmung S, Chomtee B, Kanlayasiri K. "Evaluation of artificial neural networks for pineapple grading". *Journal of Texture Studies*. 2006. Vol.37-5 p.568-579
- Brezmes J, Fructuoso MLL, Llobet E et al. "Evaluation of an electronic nose to assess fruit ripeness". *IEEE Sensors Journal*. 2005. Vol.5-1 p.97-108
- Farahnaky A, Majdinasab M, Majzoobi M, Mesbahi G. "A Comparative Study of Physicochemical and Rheological Properties of Iranian Tomato Pastes". *International Journal of Food Engineering*. 2010. Vol.6.1 p.98-103
- Gao H, Zhu F, Cai J. "A review of non-destructive detection for fruit quality". *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. 2010. Vol.317 p.133-140
- García-Ramos, F.J. "Non-destructive fruit firmness sensors: a review". *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2005. Vol.3-1. p.61-73
- Ito H, Morimoto S. "Non-destructive determination of lycopene in tomatoes using visible/near-infrared spectroscopy". *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan*. 2009. Vol.93-8 p.510-513
- Lien CC, Ay C, Ting CH. "Non-destructive impact test for assessment of tomato maturity". *Journal of Food Engineering*. 2009. Vol.91-3 p.402-407
- Liu Y, Chen X, Ouyang A. "Nondestructive determination of pear internal quality indices by visible and near-infrared spectrometry". *Food Science and Technology*. 2008. Vol.41 p.1720-1725
- Lu Q, Wang J, Gómez AH et al. "Evaluation of tomato quality during storage by acoustic impulse response". *Journal of Food Processing and Preservation*. 2009. Vol.33-s1 p.356-370
- Mizrahi A. "Ultrasonic technology for quality evaluation of fresh fruit and vegetables in pre- and postharvest processes". *Postharvest Biology and Technology*. 2008. Vol.48-3 p.315-330
- Moghimi A, Aghkhani MH, Sazgarnia A et al. "Vis/NIR spectroscopy and chemometrics for the prediction of soluble solids content and acidity (pH) of kiwifruit". *Biosystems Engineering*. 2010. Vol.106 p.295-302
- Montaña-Camara, JS, Torrecilla JO et al. "Neural Network Analysis of Spectroscopic Data of Lycopene and B-Carotene Content in Food Samples Compared to HPLC-UV-Vis". *Journal of Agricultural Food Chemistry*. 2010. Vol.58-1 p.72-75
- Nicolai BM, Beulens K, Bobelyn E et al. "Non destructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: a review". *Postharvest Biology and Technology*. 2003. Vol.28 p.437-444
- Noh HK, Lu R. "Hyperspectral laser-induced fluorescence imaging for assessing apple fruit quality". *Postharvest Biology and Technology*. 2007. Vol.69-2 p.193-201
- Sinesio F, Cammareri M, Moneta E et al. "Sensory Quality of Fresh French and Dutch Market Tomatoes: A Preference Mapping Study with Italian Consumers". *Journal of Food Science*. 2010. Vol.75-1 p.555-567
- Tu SS, Choi YJ, McCarthy MJ et al. "Tomato quality evaluation by peak force and NMR spin-spin relaxation time". *Postharvest Biology and Technology*. 2007. Vol.44-2 p.157-164