

USO DE RAYOS X PARA EVALUAR LA MADURACIÓN Y DETERIORO DE LA PULPA EN FRUTOS DE GUAÑÁBANA (*Annona muricata* L. CV. *Elita*)

USE OF X-RAY TO VALUATE THE RIPENING OF PULP AND DETERIORATION IN FRUIT SOURSOP (*Annona muricata* L. CV. *Elita*)

Carlos Julio Márquez Cardozo¹, Víctor Ramírez Gallego², José Regulo Cartagena Valenzuela³

Recibido el 17 de junio de septiembre de 2009 y aceptado el 20 de noviembre de 2009

Resumen

Frutos de guanábana cv. "Elita", fueron recolectados en grado de madurez fisiológica y analizados con rayos X, para evaluar los cambios durante la maduración. Las observaciones mostraron que con el transcurrir de los días poscosecha, se presenta una mayor radio opacidad (zonas más blancas), con pérdida de detalle de la estructura, lo que podría ser considerado probablemente, como un aumento en la densidad del tejido, ocasionado por cambios dentro de su estructura y arquitectura celular, lo cual se denota por una mayor fluidez de los tejidos y atenuación de los rayos X. Los frutos con daños internos presentaron áreas de mayor radio lucidez, debido a los cambios en la densidad del tejido interno y áreas más oscuras de menor absorción que tipifican las afectaciones internas. Los rayos X son una técnica de visión artificial no destructiva, útil para visualizar la maduración y posibles afectaciones internas en el fruto de guanábana y extensible a otros frutos de interés comercial.

Palabras clave

Obtención de imagen, frutas tropicales, poscosecha, visión artificial.

Abstract

Soursop fruit cv. "Elita", were collected at physiological maturity in order to analyze with X-rays the changes that occur during ripening process. The images showed that with the passage of posharvest time, is greater the radio opacity (white areas), with loss of detail in the structure, which could probably be considered as an increased density of plant tissue caused by changes within their structure and cellular architecture, which is denoted by a more fluid and tissue attenuation of the X-ray. Fruits with internal damage exhibited areas of greater radio lucidity, due to changes in the tissue density and darker areas that represent by lower absorption bands that typify the internal damage. X-rays are a nondestructive and noninvasive technical, useful for monitoring the ripening and possible internal affectation in soursop fruits, extensible to other fruits of commercial interest.

Key-words

Image acquisition, tropical fruits, postharvest, artificial vision.

¹ Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Sede edellín. cjmarque@unal.edu.co

² Departamento de Radiología. Universidad CES, Medellín. vramirez@ces.edu.co

³ Departamento de Ciencias Agronómicas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. jrcartag@unal.edu.co

Introducción

Los métodos no destructivos y no invasivos empleados para el análisis de estructuras internas en frutos, son rápidos, permiten ampliar el muestreo y reiterar mediciones periódicas sobre los mismos individuos, aumentando la confiabilidad de los resultados obtenidos y aportando información global del estado de madurez, especialmente si la técnica de determinación puede ser incorporada a las líneas de selección y clasificación de las plantas de proceso ⁽²⁰⁾, haciendo posible detectar y separar frutos con defectos o daños internos sin afectar el vegetal ^(4, 18).

La guanábana, es un fruto tropical altamente perecedero, por ello el estudio de la evolución de los cambios en poscosecha es de gran interés; además es succulento para el ataque biológico de organismos, con una vida útil máxima luego de recolectado de 6 a 8 días en condiciones ambientales de 20°C y 65% de humedad relativa (HR). Es susceptible al daño por frío y de gran importancia comercial por sus excelsas características sensoriales, especialmente para consumo en fresco y procesado, aspectos que influyen en la demanda de los consumidores colombianos y potencializa su comercio hacia el exterior ⁽⁹⁾.

Los complejos procesos ocurridos durante la maduración son de gran importancia, por consiguiente su conocimiento constituye un aporte fundamental a la fisiología vegetal de este fruto, lo cual podría ser útil para los procesos de transformación, conservación y mercadeo ^(3, 12).

Los rayos X son una radiación electromagnética de la misma naturaleza que las ondas de radio, las ondas de microondas, los rayos infrarrojos, la luz visible, los rayos ultravioleta y los rayos γ . Los rayos X surgen de fenómenos extranucleares, a nivel de la órbita electrónica, fundamentalmente producidos por desaceleración rápida de electrones. La energía de los rayos X en general, se encuentra entre la radiación ultravioleta y los rayos γ producidos naturalmente. Los rayos X pertenecen al grupo de radiaciones ionizantes, debido a que al interactuar con la materia producen la ionización de los átomos de la misma, es decir, origina partículas con carga o iones ^(6, 24).

Los rayos X se transmiten en función de la densidad, la masa, la composición química y el coeficiente de absorción del material, lo que se ha utilizado como tecnología emergente para diferenciar los componentes de los frutos o para detectar defectos internos en frutos

enteros y otros vegetales ^(12, 15). Con los rayos X se pueden descubrir granulaciones, daños por frío, presencia de hongos, daños biológicos, defectos internos y evaluar en determinaciones sucesivas los cambios que ocurren durante la maduración ligados a la composición del fruto y a sus características internas ^(22, 29, 33). La rotación apropiada de la fuente de rayos X y el detector permite generar respuestas tridimensionales conocidas como tomografías, de gran importancia y aplicación en la determinación volumétrica de los materiales ⁽⁷⁾.

La interacción del haz de rayos X con la materia depende de la resistencia del aire (Ecuación 1)

$$R(\text{aire}) = 0.318 E^{3/2} \quad (1)$$

Donde el alcance de los rayos X (R aire) está dado en centímetros y la energía (E) en MeV. La resistencia de un material (R sólido) se obtiene a partir de la Ecuación 2.

$$R(\text{sólido}) = 3.2 \times 10^{-4} R(\text{aire}) \sqrt{\frac{A}{p}} \quad (2)$$

Donde “ A ” es el número masa del sólido y “ p ” es su densidad en $g \cdot cm^{-3}$.

Se debe considerar que los rayos X son afectados por la distancia entre la fuente o tubo de rayos X y el objeto de análisis, de tal forma que la intensidad de los rayos X, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente y el material (Ecuación 3).

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \quad (3)$$

Donde “ I ” es la intensidad de la radiación en (Gy) por unidad de área, y “ D ” es la distancia en (m) entre la fuente y el espécimen; “ I_1 ” es la intensidad de la radiación a la distancia “ D_1 ” e “ I_2 ” es la intensidad de la radiación a la distancia “ D_2 ”; por lo tanto cuando se aumenta la distancia entre la fuente y el objeto se disminuye la intensidad, cualquier modificación en estos parámetros requiere el ajuste de la operación en cuanto a la potencia (kVp) y la corriente (mAs) ^(30, 32).

La intensidad de un haz de rayos X disminuye por la interacción con la materia, aspecto conocido como “atenuación” debido a tres factores fundamentales de interacción de los fotones: Dispersión coherente, absorción fotoeléctrica y dispersión Compton (Ecuación 4).

$$I(X) = I_0 e^{(-\mu X)} \quad (4)$$

Donde: $I(X)$ es la intensidad de la radiación, en función del espesor del material (X), I_0 es la intensidad incidente y μ es el coeficiente de atenuación. Para expresar este factor de atenuación de los rayos X al entrar en contacto con los materiales, se ha planteado el factor medio de reducción de la intensidad de la radiación incidente (Ecuación 5).

$$\ln \left(\frac{I(X)}{I_0} \right) = -\mu X \quad (5)$$

Al considerar el punto medio del espesor del material se puede expresar lo siguiente:

$$\frac{I(X)}{I_0} = \frac{1}{2}; \text{ obteniendo, } \mu = \frac{\ln 2}{X_{1/2}} \text{ con, } X_{1/2} \text{ el}$$

espesor medio del material

Si se divide este coeficiente por la densidad del material se obtiene el coeficiente de atenuación (μ_m) (Ecuación 6).

$$\mu_m = \frac{\mu}{r} = \frac{\ln 2}{X_{1/2}} r \quad (6)$$

Cuanto mayor es la densidad del material, menor es el espesor necesario para producir una atenuación de la radiación, hay mayor absorción de la radiación y se presenta mayor radio opacidad en la radiografía. Por consiguiente en el caso de vegetales (frutos) el cambio que se presenta en la densidad como consecuencia de la maduración, se manifiesta con diferencias en el coeficiente de atenuación y esto se puede utilizar para el monitoreo de los cambios durante la maduración, debido a que con ella se disminuyen los espacios porosos del vegetal y en consecuencia, la absorción de radiación se incrementa pudiéndose contrastar estos cambios en una placa radiográfica ^(1, 25, 30).

La detección de daños internos en los materiales biológicos, como las frutas, depende de la energía aplicada, lo que está directamente asociado con el tipo de producto, su densidad y la distancia entre la fuente de rayos X y el objeto de estudio ^(16, 19, 20).

En frutos de manzana y pera se han aplicado rayos X a 60 kVp y 50 mAs, con el fin de determinar la calidad interna de las frutas, los cambios ocurridos debido a los procesos normales de maduración y sus posibles afectaciones con miras a su comercialización ⁽²¹⁾.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (FAO) y la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) establecieron que no existen riesgos toxicológicos en cualquier alimento irradiado con concentraciones menores o iguales a 10 kGy ⁽²¹⁾.

Las nuevas tecnologías de visión artificial han demostrado su mayor o menor efectividad como medidas de la calidad final de los frutos, y algunas han sido incorporadas a instrumental de medición y a líneas de selección, clasificación y proceso, pero aún resultan costosas. De cualquier modo, en todas las partes del mundo donde se cultivan frutas y hortalizas, la investigación está orientada a la búsqueda de criterios cada vez más refinados para caracterizar y valorizar estos productos con la menor afectación posible del vegetal ^(4, 18).

El objetivo central de la presente investigación ha sido aplicar los rayos X en la evaluación de los cambios que se presentan en frutos de guanábana como producto de la maduración y la valoración del deterioro interno del fruto por diversas afectaciones.

Materiales y Métodos

El material vegetal utilizado fueron frutos de guanábana cv. "Elita", obtenidos de huertos establecidos en la zona agroindustrial del Valle del Cauca, sector rural del municipio de Pradera, finca La Española, Agrícola Varahonda, localizada a 1.070 m.s.n.m., 23°C de temperatura promedio, 1.225 mm de precipitación promedio anual, radiación solar media de 4,8 W•m⁻²•día, humedad relativa de 83 %.

Los frutos fueron cosechados en grado de madurez fisiológica, con sólidos solubles totales expresados como grados brix de 6,1 y porcentaje de acidez expresado como ácido málico de 0,13 %, características correspondientes a guanábanas inmaduras, las determinaciones fueron realizadas para seis frutos. El material vegetal para la experimentación radiológica fue transportado luego de la recolección al laboratorio de Radiología de la Universidad CES para el análisis en los días; 0, 3, 5, 7, y 10 de poscosecha, manteniéndose almacenados a 20°C y 65 % de HR.

Tres frutos fueron analizados por día, seleccionando para el reporte de la investigación las imágenes del fruto que presentó la mejor resolución durante la etapa de poscosecha, de acuerdo al criterio técnico

del especialista en radiología. Los frutos con afectaciones internas fueron muestras seleccionadas intencionalmente, tres por cada tipo de daño, es decir tres frutos con evidencia de antracnosis ocasionada por el microorganismo (*Colletotrichum gloeosporioides* L.), y tres frutos con evidencia de alteraciones físicas causadas por el insecto conocido como pasador de la guanábana (*Bephrata maculicollis* C.), las imágenes seleccionadas para el reporte de la investigación fueron aquellas que a criterio del especialista en radiología presentaron la mejor definición.

El equipo de rayos X utilizado fue un AJEX 135 H/A Meditech Ltd. en condiciones de operación de 56 kVp (kilovoltios de potencia) y 0,7 mAs (miliamperios por segundo). El intervalo de energía utilizado para el estudio, varió entre 30 y 70 keV, seleccionando 56 kVp como la energía de mejor resolución, de acuerdo a la visualización de las radiografías, realizada en todos los casos por el mismo especialista en radiología.

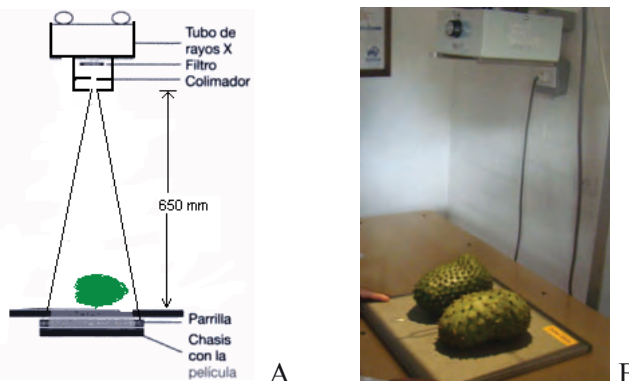
Los frutos para la evolución de la maduración y valoración de las afectaciones internas, fueron puestos sobre el chasis del equipo, formado por dos pantallas luminiscentes a base de tierras raras, constituidas por oxisulfuro de gadolinio (Ga_2O_2S), ubicadas a cada lado de la película fotográfica de celuloide, recubierta con una emulsión de bromuro de plata; la distancia entre la fuente de rayos X y la placa, fue de 650 mm. Se utilizó un ángulo de incidencia de 35° con respecto al fruto, con el fin de garantizar el cubrimiento total del área. La radiación pasó a través del fruto y luego atravesó la placa que absorbe los fotones de rayos X y emite luz visible que impresionó la película radiográfica liberando plata metálica, produciendo los contrastes generadores de la imagen del objeto.

Las radiografías fueron puestas en un negatoscopio y fotografiadas con una cámara Sony Cyber shot de 7,2 Mega píxeles de alta sensibilidad, para su posterior digitalización.

Los frutos utilizados para el monitoreo de afectación interna, fueron colocados con el daño principal perpendicular a la radiación.

La Figura 1A muestra un esquema general de la aplicación de la radiografía convencional, en la 1B se puede apreciar la aplicación de los rayos X a frutos de guanábana en diferentes estados de madurez.

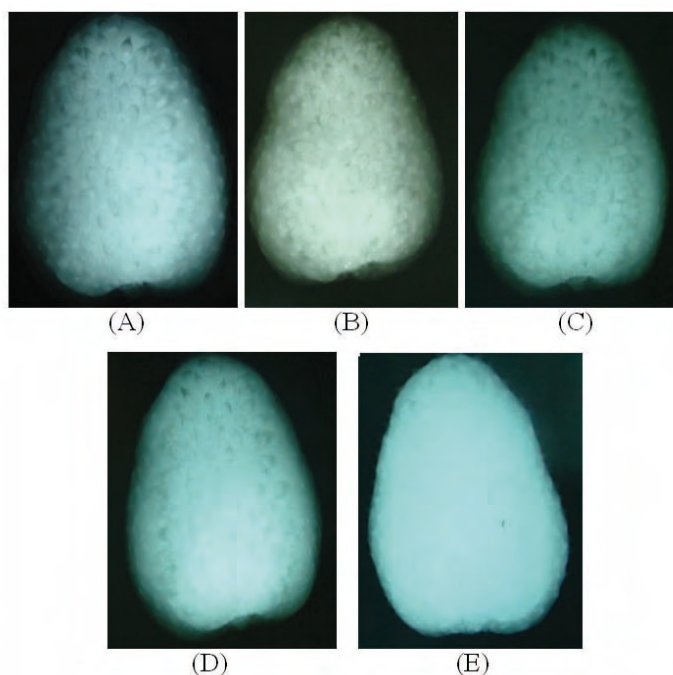
Figura 1. Aplicación de la radiografía convencional a frutos de guanábana, esquema general (A), aplicación de rayos-X (B).



Resultados

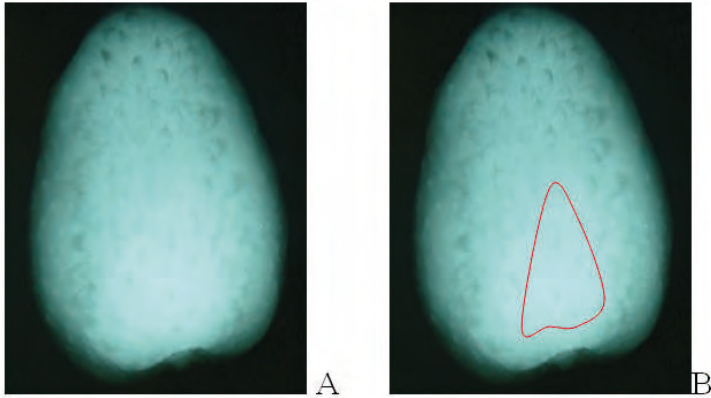
La Figura 2 muestra la evolución interna de los tejidos del fruto de guanábana durante la etapa de poscosecha o maduración.

Figura 2. Radiografías de la evolución de la maduración en el fruto de guanábana (*Annona muricata* L.) seleccionado para el día 0 (A), día 3 (B), día 5 (C), día 7 (D), y día 10 de poscosecha (E).



Otro aspecto de interés, es apreciar cómo pueden identificarse algunas regiones que caracterizan los ejes de mayor radio opacidad, correspondientes a zonas de mayor fluidez dentro del fruto, tal como lo muestra la Figura 3.

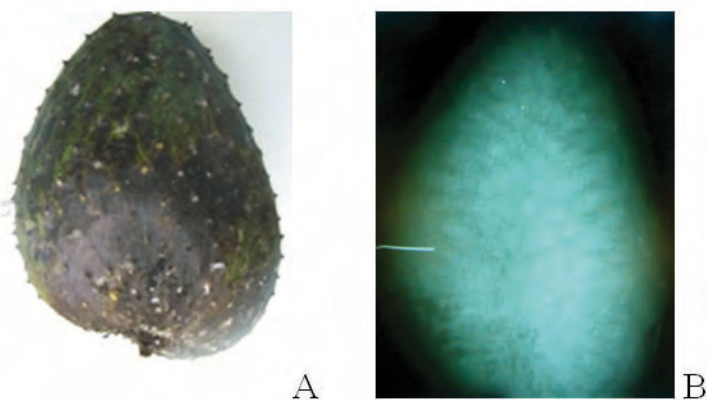
Figura 3. Fruto en madurez ideal o de consumo a los 7 días de poscosecha (A), zonas típicas de maduración (B).



Afectaciones internas

Las afectaciones internas ocasionadas por daños mecánicos o biológicos, debidos a malos manejos del cultivo en poscosecha, se manifiestan más contundentemente durante la maduración⁽³²⁾, lo cual puede apreciarse en los frutos como áreas de mayor radio lucidez (zonas más oscuras). La Figura 4 muestra un fruto afectado por antracnosis con repercusiones internas en la calidad.

Figura 4. Fruto de guanábana afectado por insectos y antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides* L.) (A), radiografía que muestra las afectaciones internas del tejido (B).



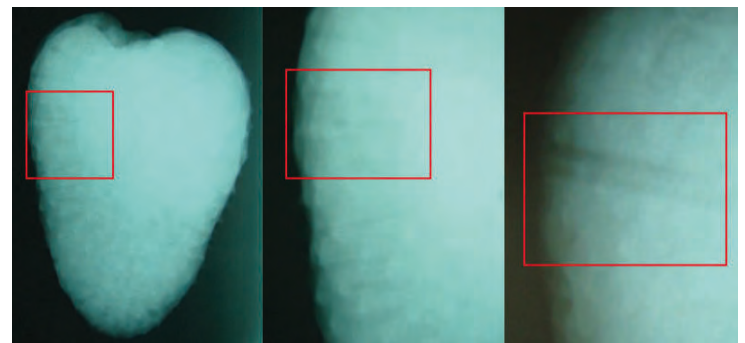
Las Figuras 5 y 6 corresponden a un fruto afectado por daño biológico, causado por el insecto pasador de la guanábana (*Bephrata maculicollis* C.).

Figura 5. Fruto de guanábana afectado por *Bephrata maculicollis* C.



En la Figura 5 aprecia el fruto afectado por el pasador de la guanábana; por otra parte, en la Figura 6 a partir de la aplicación de rayos X se pueden apreciar las zonas atacadas por el perforador (rectángulo rojo).

Figura 6. Radiografía de un fruto de guanábana con afectación interna por *Bephrata maculicollis* C.



Discusión

De acuerdo a la Figura 2 se puede ver como la densidad va sufriendo cambios, producto de la fluidización de los tejidos durante la poscosecha, lo que se traduce en el aumento de la radio opacidad que se evidencia en las radiografías.

A medida que transcurren los días poscosecha se puede apreciar una mayor radio opacidad (zonas más blancas), lo que podría ser debido a un aumento de la densidad de los tejidos internos del vegetal, lo cual se denota por una mayor fluidez⁽³²⁾ situación atribuible a procesos enzimáticos de degradación de la pared celular⁽¹⁷⁾, particularmente ocasionados por la pectinmetilesterasa y la poligalacturonasa⁽²⁸⁾, que actúan sobre los compuestos pécticos responsables de la arquitectura celular, la

degradación de los tejidos amiláceos insolubles, los cuales por la acción de la α y β amilasa se hidrolizan a compuestos más simples del tipo mono y disacáridos de carácter altamente hidrosolubles también contribuye a que con el transcurrir de la etapa de poscosecha se presente mayor fluidización de los tejidos, la Figura 2 (D y E), correspondiente al fruto maduro y sobremaduro respectivamente, denota una radio opacidad creciente (más blanco), característico de un tejido más fluido o equivalentemente con menor espacio poroso ⁽¹⁰⁾.

De acuerdo a la Figura 3B y en función de la densidad del fruto y su radio opacidad, se pueden establecer unos ejes de evolución de la maduración, uno se desarrolla de la periferia hacia el interior y el de mayor relevancia, desarrollado a partir de la zona peduncular desde el eje central hacia el exterior en forma radial (denotado por la zona en rojo), lo que coincide con lo expuesto en otras investigaciones ⁽²¹⁾.

Puede apreciarse en la Figura 4(B), como en la parte inferior del marcador metálico introducido como referencia, se nota un área más radio lucida correspondiente a la afectación biológica, probablemente ocasionada por insectos, mientras que la zona correspondiente a la mayor afectación por antracnosis, se muestra con áreas heterogéneas donde se interrumpe la arquitectura celular natural con alteraciones de la textura, probablemente debida a la pérdida de tejido y a la presencia de espacios con aire que se muestran como zonas oscuras en la radiografía. Estas zonas pueden además significar regiones de menor densidad, tal como lo ha registrado ⁽²³⁾, donde el tejido puede haber sido alterado por causas biológicas o patológicas, además por posibles afectaciones físicas o mecánicas (ver figura 4B), lo cual coincide con lo encontrado para otros productos ^(14, 15).

Los contrastes apreciados en la Figuras 6 son debidos a las diferentes densidades del material al ser atravesado por la radiación, las áreas más oscuras o de menor absorción, representan franjas de menor densidad del vegetal, van de la parte externa al centro del fruto, estas tipifican regiones en forma de túneles, ocasionados por el organismo invasor, las cuales son características de este tipo de daño ⁽²³⁾.

Conclusiones

Los frutos de guanábana evaluados en esta investigación durante su maduración presentaron mayor radio opacidad y absorbieron mayor radiación.

En los frutos analizados se establecieron dos ejes principales de maduración, uno originado en la zona peduncular que se expande de forma radial hacia el exterior del fruto y otro que inicia en la parte periférica ecuatorial y se desplaza hacia el interior.

Los daños internos y posibles afectaciones anormales presentes en el interior de los frutos pudieron ser visualizados e identificados con la técnica de rayos X, como áreas más oscuras, lo cual puede ser atribuible a espacios de mayor radio lucidez (zonas de menor densidad), con presencia de aire e interrupción de la arquitectura del tejido de los frutos.

La aplicación de rayos X a frutos de guanábana, representa una alternativa de visión artificial no destructiva y no invasiva, para monitorear internamente el vegetal sin afectarlo físicamente.

Recomendaciones

Utilizar equipos de rayos X de mayor sofisticación como los operados para la medida de densidad mineral ósea (DMO), los cuales aplican la absorciometría de rayos X de doble energía (DXA) y acoplados a programas de computo apropiados, permiten la cuantificación numérica de los contrastes de color con el fin de poder realizar un refinado análisis numérico de las imágenes.

Emplear los rayos X como técnica de control para monitorear daños internos en frutos de guanábana, en líneas de proceso en poscosecha, previo análisis de los costos totales involucrados, con el fin de separar frutos afectados y poder evitar que los que tengan problemas internos puedan llegar al mercado, previniendo el consecuente perjuicio para la agroindustria.

Extender la aplicación de los rayos X, como técnica de visión artificial no destructiva, a los sistemas de control de calidad en líneas de proceso para frutos de importancia agroindustrial, especialmente a productos de exportación, cuyo valor comercial así lo amerite y los costos involucrados en la implementación de la tecnología lo permitan.

Agradecimientos

A la Clínica de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia de la Universidad CES, por su valiosa colaboración y muy especialmente al Señor Decano Santiago Henao Villegas, y al Director de Investigaciones, Doctor Gregory Mejía Sandoval.

BIBLIOGRAFÍA

1. ATTIX, F.H. Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. New York, E.U.A.: John Wiley & Sons. 1986.
2. BULL, C.R., ZWIGGELA, R. AND SPELLER, R.D. Review of inspection techniques based on the elastic and inelastic scattering of X-rays and their potential in the food and agricultural industry, *Journal of Food Engineering*, 33, 167-179, 1997.
3. CAMACHO, G. y ROMERO, G. Obtención y conservación de pulpas: Mora, guanábana, lulo y mango. Bogotá: ICTA - Universidad Nacional de Colombia, 1996.
4. CHEN, P. AND SUN, Z. A review of non-destructive methods for quality evaluation and sorting of agricultural products, *Journal of Agricultural Engineering*, 49, 85-98, 1991.
5. CLARK, C. HOCKINGS, P. JOYCE, D. AND MAZUCCO, R. Application of magnetic resonance imaging to pre-and post-harvest studies of fruits and vegetables, *Postharvest Biology and Technology*, 11, 1-21, 1997.
6. CULLITY B.D. Elements of X-ray diffraction. Wilmington. E.U.A.: Addison-Wesley Iberoamericana S.A., 1978.
7. DAVIDOVITS, P. Physics in biology and medicine. San Diego, California, E.U.A.: Harcourt Science and Technology Company, 2001.
8. EISBERG, R.M. Fundamentos de física moderna. México D.F.: Limusa, 1999.
9. ESCOBAR, T.W. Y SÁNCHEZ, L.L. Fruticultura colombiana: guanábano. Bogotá D.C.: Produmedios, 2000.
10. FENNEMA, O. R. Química de alimentos. Zaragoza: Acribia, 2000.
11. GALLE, P., PAULIN R. Y MATEOS F.M. Biofísica: Radiobiología, radiopatología. Madrid: Elsevier, 2003.
12. GUZMÁN, R. Y SEGURA, E. Tecnología de frutas y hortalizas. Bogotá: Unisur, 1991.
13. HWUA, Y., JEB, J.H. AND MARGARITONDO, G. Real-time radiology in the microscale, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 551, 108-118, 2005.
14. KOTWALIWALE, N., WECKLER, P.R., BRUSEWITZ, G.H., KRANZLER, G.A. AND MANESS, N.O. Non-destructive quality determination of pecans using soft X-rays, *Postharvest Biology and Technology*, 45, 372-380, 2007.
15. KOTWALIWALE, N., WECKLER, P.R. AND HRUSEWITZ, G.H. X-ray attenuation coefficients using polychromatic X-ray imaging of pecan components, *Biosystems Engineering*, 94, 199-206, 2006.
16. LAMMERTYN, J. *et al.* X-ray CT study of spatial distribution of core breakdown in “Conference” pears, *Magnetic Resonance Imaging*, 21, 805-815, 2003.

17. MAJUMED, B.C. AND MAZUMDAR, B.C. Changes of pectic substances in developing fruits of capegooseberry (*Physalis peruviana* L.) in relation to the enzyme activity and evolution of ethylene, *Scientia Horticulturae*, 96, 91-101, 2002.
18. McCARTHY, M. AND McCARTHY, K. 2002. Applications of magnetic fields for industrial process control with NMR, Haifa, Israel: International Workshop on Superconductivity and High Magnetic Fields. 2002.
19. NICOLAI, B.M. Analysis of the time course of core breakdown in "Conference" pears by means of MRI and X-ray CT, *Postharvest Biology and Technology*, 29, 19-28, 2003.
20. NÖLTING, B. *Methods in modern biophysics*. Berlin: Springer, 2003.
21. OGAWA, Y., KONDO, N. AND SHIBUSAWA, S. Inside quality evaluation of fruit by X-ray, *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, IEEE, 1360-1365, 2003.
22. PALOU, I., DEL RÍO, M.A., MARCILLA, A., ALONSO, M. AND JACAS, J.A. Combined postharvest X-ray and cold quarantine treatments against the mediterranean fruit fly in "Clemenules" mandarins, *Spanish Journal of Agricultural Research*, 4, 569-578, 2007.
23. PARÍSI, M. *Temas de biofísica*. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2004.
24. RAYMOND A.S., MOSES, C.J. Y MOYER, C.A. *Física moderna*. México, D.F.: Cengage Learning Editores, 2005.
25. RICKARDS, C.J. Y CAMERAS, R.R. *Las radiaciones II: El manejo de las radiaciones nucleares*. México D.F.: Fondo de Cultura Económico S.A., 2005.
26. SCATTER, N.G. Non-destructive spectroscopic techniques for the measurement of food quality, *Trends in Food Science & Technology*, 81, 285-292, 1997.
27. SEARS, W.F. Y ZEMANSKY, W.M. *Física universitaria*. Wilmington, E.U.A.: Addison Wesley Iberoamericana, S.A. 1988.
28. SONEGOA, L., BEN-ARIE, R., RAYNAL, J. AND PECH, J.C. Biochemical and physical evaluation of textural characteristics of nectarines exhibiting woolly breakdown: NMR imaging, X-ray computed tomography and pectin composition, *Postharvest Biology and Technology*, 5, 187-198, 1995.
29. STUPPY, W.H., MAISANO, A.J., COLBERT, M.W. RUDALL, P.J. AND ROWE, B.J. Three-dimensional analysis of plant structure using high-resolution X-ray computed tomography, *Plant Science*, 18, 1-5, 2003.
30. THRALL, E.D. *Manual de diagnóstico radiológico veterinario*. Madrid: Elsevier, 2003.
31. VILLAMIZAR, F. *Manejo tecnológico poscosecha de frutas y hortalizas: Manual de prácticas*. Bogotá: Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, 2001.
32. WHITE, S.W. Y PHAROAH M.J. *Radiología oral: Principios e interpretación*. Madrid: Elsevier, 2001.
33. WILSON, J.D. *Física con aplicaciones*. México, D.F.: McGraw-Hill, 1991.