

MODELO TEÓRICO PARA PREDECIR EL LUGAR DEL CORTE Y OPTIMIZAR LA EXTRACCIÓN DE LA PULPA EN COCO

THEORETICAL MODEL FOR PREDICTING THE CUTTING PLACE IN ORDER TO OPTIMIZE THE EXTRACTION OF THE COCONUT PULP

Federico Hahn-Schlam*; Paola Martínez-Díaz; Armando Reyes-Amador

Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México, C. P. 56230. MÉXICO. Correo-e: fhahn@correo.chapingo.mx (*Autor para correspondencia)

RESUMEN

El cocotero es un cultivo importante en las regiones costeras de México. El fruto del coco es vendido como agua fresca, y la pulpa se seca para producir la copra, de la cual se obtiene el aceite vegetal. Una planta industrial para sacar el agua de coco deja como residuo la pulpa, la cual no debe desperdiciarse. Los trabajadores tienen gran habilidad para la extracción de la pulpa, pero requieren que haya sido secada por el sol durante medio día. Una máquina debe ser diseñada para extraer la pulpa en línea, requiriendo inicialmente partir los cocos en dos conchas iguales, tanto en forma transversal como en forma longitudinal. Un sistema de visión adquiere imágenes de los cocos cortados obteniendo su circularidad y diámetro de Feret. Cocos partidos transversalmente presentaron dos conchas iguales en el 93 % de las pruebas, con un modelo que obtiene la longitud del fruto de coco usando un transformador diferencial lineal. Al tener las imágenes de cada fruto de coco cortado, se simuló el posicionamiento de un extractor redondo para sacar la pulpa de la concha. El uso del centroide como centro del extractor produjo mermas de pulpa superiores al 35 %; al utilizar un modelo para el posicionamiento del extractor, las pérdidas se redujeron a menos de 16 %.

Palabras clave adicionales: Corte transversal del coco, circularidad, extracción de pulpa, diámetro de Feret, imágenes del coco.

ABSTRACT

Coconut is an important crop produced in Mexican coastal regions. Coconut is sold as fresh water and dried pulp is used to produce vegetable oil. An industrial plant for fresh water extraction lets pulp as residue, which should be also sold. Workers have a great ability to extract coconut pulp after the shells are sun-dried for half a day. A machine for on-line pulp extraction has to be designed, requiring that coconut is sliced in two identical shell pieces for both: transversal and longitudinal cuts. A vision system acquired images from the sliced coconuts obtaining its circularity and Feret diameter. Coconuts cut transversally used a model that measured coconut length with a linear differential transformer; 93 % of the tests presented two identical shells. A simulation was carried out for positioning a round extractor for separating the pulp from the shell. When the centroid was used as the control coordinate pulp losses were over 35 %; a model for positioning the extractor decreased pulp losses to less than 16 %.

Additional keywords: Coconut transversal cut, circularity, pulp extraction, Feret diameter, coconut imaging.

INTRODUCCIÓN

El cocotero es una planta de la cual pueden obtenerse una gran cantidad de productos, radicando su importancia en México en la extracción de aceite vegetal a partir de la copra. Los nutrientes existentes en el agua de coco hacen de ella una bebida hidratante para los deportistas (FAO, 2000). La bebida de coco es biológicamente pura, deliciosa y llena de sales, azúcares y vitaminas. Un coco de entre seis y nueve meses contiene 750 ml

de agua que se transforma en pulpa de donde proviene la copra (pulpa deshidratada).

Diversos prototipos han sido desarrollados para partir cocos verdes; estos frutos tienen entre seis y ocho meses después de la inflorescencia. A lo largo de este trabajo, el término coco representa al fruto de la palmera. Jarimopas y Kuson (2007) aplicaron un cuchillo filoso al girar el fruto de coco para desgarrar gradualmente las fibras externas y la concha que recubre al

endosperma (carne blanca); al secar dicho endosperma se obtiene la copra. El prototipo comercial abre un coco cada 30 segundos, derrama 0.2 % del líquido y agrega 0.2 gramos de sólidos al agua. El sistema automatizado maneja 86 frutos por hora con tres sujetadores que se mueven circularmente rotando el coco a 300 RPM (Jarimopas *et al.*, 2009). El corte del coco requirió de un sistema neumático de 7 bars aplicando una fuerza de corte de 2500 N (Rattanapaskorn y Roonprasang, 2008).

En el análisis de imágenes circulares se utilizan dos parámetros: la circularidad y el diámetro de Feret; éste es la distancia perpendicular entre líneas paralelas tangentes al perímetro en lados opuestos de un objeto bidimensional. Estos parámetros han sido utilizados para discriminar entre variedades de trigo (Zayas *et al.*, 1985), determinar partículas en el aceite de aguacate (Du y Sun, 2004), contar granos de polen (Costa y Yang, 2009) y evaluar el tamaño de los pellets (Sinha *et al.*, 2005).

El agua de coco es cada día más demandada, y para extraerla industrialmente los cocos son partidos quedando pulpa en los frutos cortados. A pesar de que los trabajadores han adquirido una gran destreza para extraer la pulpa después de secar el fruto al sol por medio día, sacarlo inmediatamente les resulta muy difícil. El presente estudio analiza las coordenadas donde debe centrarse un artefacto para extraer la pulpa en línea, con la finalidad de dejar la menor cantidad de pulpa adherida a la concha. En el presente estudio se partieron frutos de coco transversalmente y en forma longitudinal; la limpieza de los cortes fue comparada. Las dimensiones de la concha y del fruto se obtuvieron, permitiendo desarrollar tres modelos. En el último, un transformador diferencial lineal determina el tamaño del fruto de coco, y al multiplicarlo por una constante permite conocer dónde debe partirse en forma transversal para obtener dos mitades idénticas.

MATERIALES Y MÉTODOS

En los laboratorios del departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo se lavaron 120 cocos traídos desde una huerta del estado de Guerrero en enero de 2011; sesenta de ellos se partieron longitudinalmente y los otros 60 de forma transversal, con el fin de modelar el corte. Otros cien cocos se cortaron en forma transversal para evaluar el modelo dado por la ecuación 4, esperando que las dos mitades resultantes tuvieran la misma cantidad de pulpa.

Mediciones de los cocos. Cada fruto de coco se fijó sobre una cuchilla en forma de hacha y fue cortado al aplicarle una fuerza de 2500 N con un pistón neumático. El coco partido fue iluminado mediante dos focos de halógeno de 50 W; una cámara monocromática de visión (mod. EDC 1000N, Electrim Corp, USA) adquiría imágenes. Los cocos partidos se colocaron en un armazón (Figura 1) con clavos en la base para evitar el movimiento del bonote y poder adquirir imágenes sin saturación y sombra. El eje de la cámara y el de la concha de coco deben estar paralelos, siendo alineados con tres apuntadores láser. Se midió el largo (eje mayor) y la altura (eje menor) de cada fruto de coco utilizando una escuadra metálica y una solera (Figura

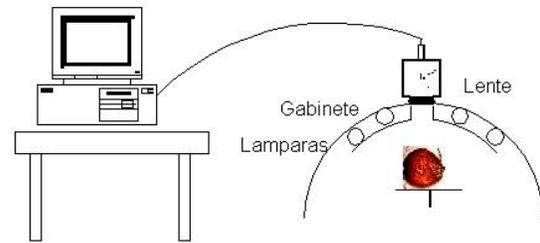


FIGURA 1. Equipo utilizado para adquirir las imágenes.

2b); el punto en que la solera toca a la escuadra indica el largo del fruto. El ancho de la concha y su posición dentro del fruto del coco fueron determinados utilizando un vernier. Estos valores físicos se correlacionaron con las dimensiones digitales dadas en pixeles y obtenidas a partir de las imágenes mediante el software ImageJ 1.36b (National Institute of Health, USA).

Del bonote cortado se obtuvo el eje mayor (d_{ab}) y el eje menor, así como cada una de las distancias delimitadas en la Figura 2a. Otras mediciones directas fueron el tamaño de la concha (d_{cd}) y la distancia entre el extremo del tallo y el de la concha (d_{ac}). La circularidad y el diámetro de Feret fueron utilizados como mediciones indirectas.

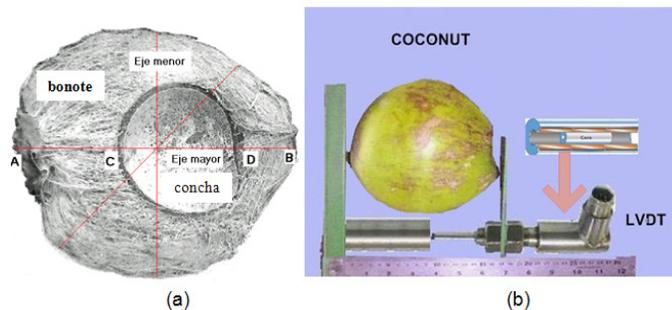


FIGURA 2. Mediciones obtenidas con (a) la imagen del coco; (b) el LVDT.

Modelado del coco. Antes de partir los frutos de coco, éstos se clasificaron por tamaño en seis categorías (17-18 cm de largo, 18-19 cm, 19-20 cm, 20-21 cm, 21-22 cm y 22 a 23 cm). Seis frutos fueron seleccionados por tamaño y partidos a la mitad; las mediciones obtenidas fueron promediadas. La esfericidad o circularidad de la concha en dos dimensiones indica qué tan parecida es a un círculo, y se calcula utilizando el perímetro y el área (Ec. 1). Las ecuaciones 2 y 3 determinan la distancia en la cual se centra el extractor circular en el eje mayor:

$$E = P^2/4\pi A \quad (1)$$

$$X_{med} = d_{ca} + d_{cd}/2 \quad (2)$$

$$X_{med} = d_{ca} k_{la} + d_{cd}/2 \quad (3)$$

$$X_{med} = kd_{ab} \quad (4)$$

Los ecuaciones 2 y 3 utilizan las distancias d_{ca} y d_{cd} para simular donde centrar al extractor circular para separar la pulpa de la concha. La diferencia entre las ecuaciones 2 y 3 radica en la constante k_{la} . Esta constante es cero para aquellos cocos donde la relación entre el largo y el ancho es menor a 1.5; en aquellos frutos de coco con una relación mayor a 1.5 el valor de la constante es igual a la relación entre el eje mayor d_{ab} y el eje menor. La distancia d_{ac} es igual a d_{ab} presentando una relación entre el eje mayor y el eje menor cercano a uno. La correlación existente entre la constante k_{la} y la distancia d_{ac} en los frutos de coco partidos fue de 0.91. La cantidad de pulpa desperdiciada (%), de acuerdo al punto en donde se centra el extractor, se obtiene al dividir la pulpa blanca que no fue tapada por el círculo contra la pulpa total.

La ecuación 4 determina el lugar del corte en cocos transversales tomando únicamente la medición exterior del eje mayor; un sensor LVDT (linear variable differential transformer) mide la longitud del fruto. La constante para cada tamaño se obtuvo al promediar los valores de los frutos de coco cortados transversalmente. Para realizar una medición precisa del tamaño del coco (Figura. 2b), un resorte ejerce presión entre el fruto y el sensor LVDT (modelo GHSDR 750-2000, MacroSensors, NJ, USA). El LVDT seleccionado tiene un rango de ± 5 cm, y proporciona una salida de 0.2 V/mm. El sensor se alimenta con una fuente de 15 VDC, y su error es el 0.25 % de la escala total, la cual varía entre -10 y 10 VDC.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al comparar los cortes longitudinales y transversales de los frutos de coco, el corte transversal resultó ser el más limpio al desprender una menor cantidad de sólidos que el corte longitudinal. En el corte transversal las dos mitades del bonote quedan totalmente separadas, mientras que en los cortes longitudinales el fruto de coco se desgarró sobre el cortador. No obstante, el corte transversal requiere que se aplique una mayor fuerza que el corte longitudinal.

El análisis de las imágenes de los frutos de coco cortados a la mitad permitió recaudar información sobre las relaciones de tamaño entre la concha y el largo y ancho del fruto de coco. En los análisis de cocos cortados longitudinalmente el tamaño de la concha era del 46-47 % del área del fruto, similar al 45 % reportado por Assis y Pessoa (2009). En el caso de frutos de coco cortados transversalmente, el área de la concha se redujo al 39 %, mientras Assis y Pessoa (2009) reportaron una reducción al 35 %.

Las Figuras 3 y 4 muestran las características de circularidad y diámetro de Feret de seis cocos escogidos al azar después de ser cortados horizontal y transversalmente. La circularidad promedio de los 60 cocos cortados transversalmente fue de 0.949 con una desviación estándar de 0.0395. Los cocos cortados longitudinalmente presentaron un promedio de 0.965 y una desviación estándar de 0.015. Assis y Pessoa (2009) encontraron que en los frutos más grandes se perdía la circularidad; la forma externa del coco y la de la concha eran similares. En los cocos cortados

transversalmente la tendencia es similar, y los de 21 cm de largo mostraron circularidad promedio de 0.988. En cambio, los de 25 cm de longitud presentaron circularidad promedio de 0.912.



FIGURA 3. Parámetros de Feret, circularidad (cir) y tamaño h tal de la concha (con) en cocos cortados horizontalmente.



FIGURA 4. Parámetros de Feret, circularidad (cir) y tamaño horizontal de la concha (con) en cocos cortados transversalmente.

En el 78 % de los frutos de coco cortados transversalmente y en el 25 % de los frutos partidos longitudinalmente, el diámetro de Feret resultó igual al largo de la concha. En el 75 % de los frutos cortados longitudinalmente, el eje mayor era dos veces mayor que el largo de la concha. En el caso de cocos cortados longitudinalmente, la menor circularidad fue encontrada en cocos menores a 19 cm. El diámetro de Feret indica que el diámetro en cualquier dirección no supera en un 7 % la medición tomada de la concha.

La extracción de la pulpa del coco requiere de conocer el tamaño del extractor cuyo diámetro de corte es variable (Figura 5). Los cuatro cocos de la izquierda (círculos negros) son iguales que los de la derecha (círculos azules). Al simular la extracción de la pulpa con un cortador circular, sus coordenadas centrales fueron transportadas al centroide del fruto y dibujadas con círculos azules (Figura 5). La coordenada horizontal para trazar los círculos negros sobre las imágenes se obtiene de la ecuación

2; la coordenada vertical es compensada de acuerdo a las distancias entre la concha y los bordes del fruto. El corte del fruto de coco no fue simétrico, ya que las distancias $Y2$ y $Y1$ difieren (Figura 5a inferior; Figura 6 inferior), y por ende la coordenada Y se desplaza hacia arriba. Los círculos se acomodan mejor en los cortes transversales gracias a la naturaleza circular de la concha, ya que el grosor del bonote es similar a lo largo de toda la periferia. A pesar de que los cocos partidos longitudinalmente (Figura 5 parte inferior) presentan una circularidad de 0.988, la pulpa no es cubierta por completo; especialmente al posicionar al extractor en el centroide del fruto. Pessoa y Van Leeuwen (2006) desarrollaron un extractor de la almendra o pulpa usando las características externas del fruto de coco. El método realiza una incisión circular cerca de la concha y después la corta en dos partes iguales.

La cantidad de pulpa desperdiciada de acuerdo a las coordenadas de posicionamiento del extractor se obtuvo como porcentaje (Cuadro 1). Los cocos con un tamaño entre 20 y 21 cm presentaron una merma del 49 % al usar el centroide como posicionador del cortador circular. Los más chicos (17-18 cm) mostraron una merma del 35 % al usar el centroide como posicionador, por lo que usar el centroide como control no es eficiente. Al utilizar la ecuación 2 para generar la coordenada X_{med} , la merma de la pulpa extraída disminuyó entre 14 y 16 %. Con la ecuación 3, el centrado del cortador depende de $d_{ca} k_{la}$, reduciendo la merma aún más al eliminar aquellos cocos donde la diferencia entre largo y alto no era considerable. A pesar de no variar el punto Y , la merma osciló entre el 7 y el 10 % (Figura 6). Una simulación de la operación del extractor requiere de evaluar el volumen de la pulpa remanente en 3D, además de cuantificar por peso tanto la pulpa extraída como la pulpa remanente.

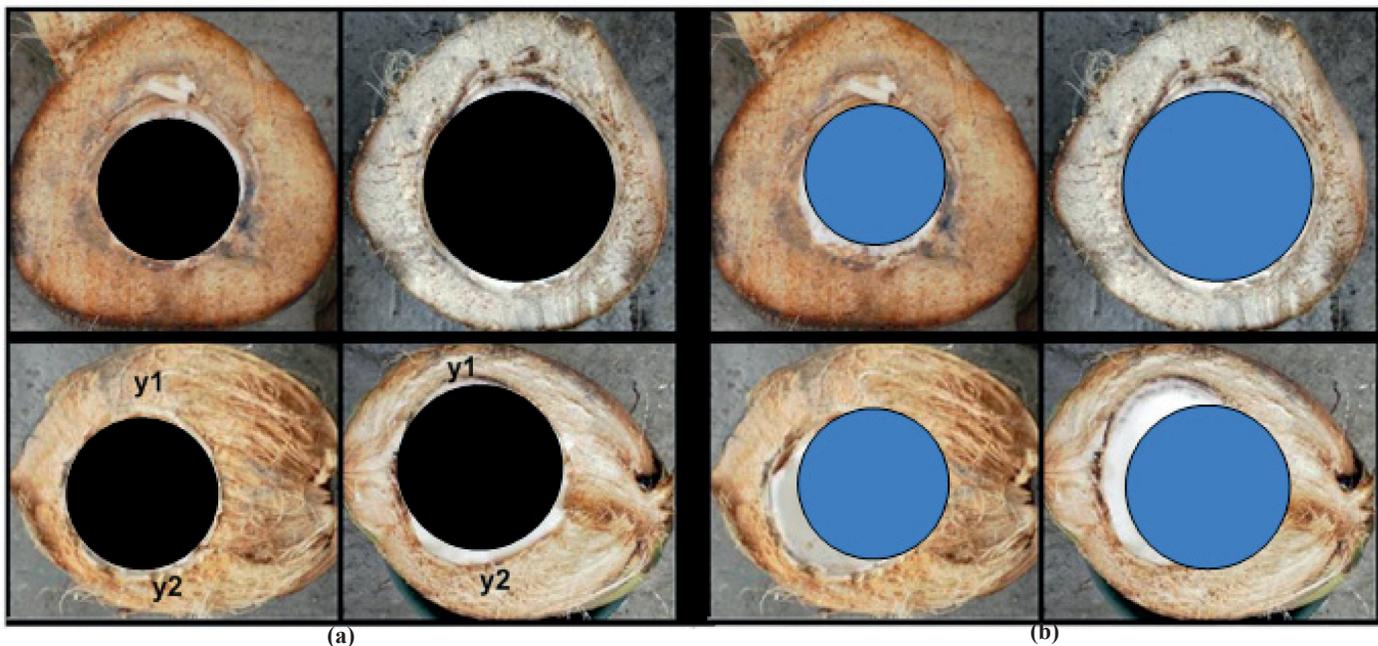


FIGURA 5. Simulación de la extracción de la pulpa (a) usando la ecuación 2 y (b) el centroide como centro de la concha.

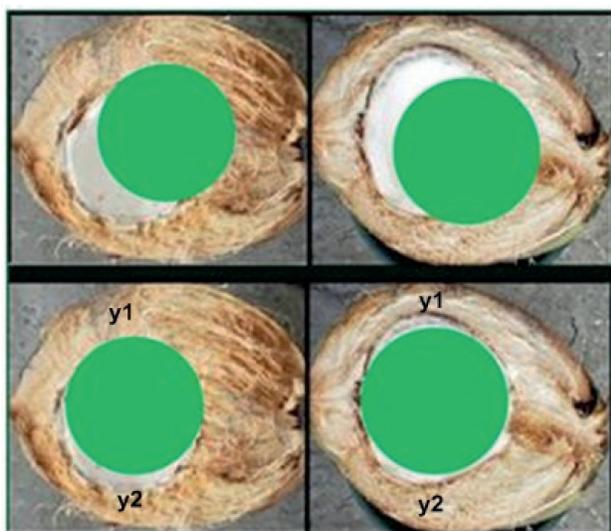


FIGURA 6. Simulación de conchas cortadas longitudinalmente (superiores) con los círculos de las conchas centrados con el centroide y (inferiores) por la coordenada obtenida con la ecuación 3.

El corte transversal de frutos de cocos utiliza la ecuación 4, la cual multiplica el tamaño del coco (proporcionado por el LVDT) por una constante. Si esta constante fuera de 0.28, todos los cocos se cortarían en el límite entre la concha y la fibra. El Cuadro 2 muestra que la constante para cortar la concha a la mitad varía entre el 52 y 54.6 %. A diferencia del experimento anterior, aquí no se estudió la merma del coco sino la cantidad de pulpa (%) existente en cada media concha; la primera concha se denominó tallo, pues es en esta mitad donde está adherida a la palmera. En los frutos de coco partidos transversalmente sobre la coordenada dada por el centroide, la diferencia de pulpa entre ambas conchas fue de 56 % para frutos cuyo largo variaba entre 19 y 20 cm. En el caso de usar el algoritmo propuesto, la máxima diferencia entre conchas fue del 12 %, lo que se considera aceptable para su extracción. En un corte transversal una diferencia de 1 cm en el corte puede ocasionar que un lado de la concha tenga 40 % de pulpa y el otro lado 60 %, mientras que un error de 3 cm ocasiona que un lado tenga 90 % de pulpa y el opuesto 10 %. Para evaluar el modelo con el LVDT se utilizaron 100 frutos de coco de diversos tamaños, y el 93 % de los cortes tuvo dos cachetes iguales.

CUADRO 1. Promedio de pérdida de pulpa usando diferentes variables de control para la extracción de pulpa en cocos cortados longitudinalmente.

Longitud del coco (cm)	d_{ca} (cm)	$d_{ca} 2D$ (cm)	d_{cd} (cm)	% promedio de pérdida de pulpa usando como coordenada de centrado		
				Centroide	$d_{ca} + d_{cd}/2$	$d_{ca} k_{ca} + d_{cd}/2$
17-18	5.36	6.37	8.63	35	14	7
18-19	6.35	6.73	8.85	38	15	9
19-20	6.69	7.52	9.15	41	12	10
20-21	7.33	8.12	9.62	49	13	8
21-22	7.88	8.43	10.12	37	16	9
22-23	8.03	8.77	10.33	42	12	8

CUADRO 2. Promedio de la cantidad de pulpa por media concha usando dos diferentes variables de control en cocos cortados transversalmente.

Longitud del coco (cm)	K (%)	Concha (cm)	% pulpa concha tallo		% pulpa concha 2	
			Centroide	$X_{med} = kd_{ab}$	Centroide	$X_{med} = kd_{ab}$
17-18	52.86	8.63	38	48	62	52
18-19	52.65	8.85	39	47	61	53
19-20	54.14	9.15	36	50	64	50
20-21	53.69	9.62	37	49	63	51
21-22	52.81	10.12	39	51	61	49
22-23	54.64	10.33	38	47	62	53

CONCLUSIÓN

A pesar de que actualmente ni un modelo matemático ni una máquina pueden superar la extracción de la pulpa tal y como se hace en forma manual, este estudio presenta una primera aproximación para poder plantear el problema. Una persona que se dedica a esta actividad puede extraer rápidamente por arriba del 95 % de la pulpa del coco, independientemente de la forma en la que haya sido partido, siempre y cuando se haya dejado secar al sol. Si un trabajador quisiera extraer la copra de un coco recién partido, tampoco podría hacerlo de forma eficiente.

Este trabajo concluye que el corte del fruto de coco transversal a la cuchilla es más limpio, al no dejar residuos sólidos en el agua; asimismo, las fibras del bonoteno se desgarran. Imágenes de frutos cortados transversalmente muestran conchas más circulares que cocos partidos longitudinalmente. En los cortes transversales se desea obtener dos conchas iguales que contengan la misma cantidad de pulpa, siendo fundamental para ello conocer el tamaño del coco dado por el LVDT. Al utilizar las constantes adecuadas, 93 % de los frutos de coco cortados transversalmente tuvieron conchas simétricas.

Por otro lado, en aquellos cocos cortados longitudinalmente se analizó la posibilidad de extraer la pulpa automáticamente. La circularidad es una variable poco confiable como indicador para la extracción de la pulpa; el diámetro de Feret resultó ser más exacto. Al utilizar el centroide como control del posicionador del cortador circular, la pulpa que queda en la concha oscila entre 35-49 %. Al recorrer el punto de posicionamiento del cortador en el eje horizontal mediante la ecuación 2, la cantidad de pulpa que permanecía adherida a la concha disminuyó; su valor máximo fue del 16 % en frutos de coco cuyo largo variaba entre 21 y 22 cm. En un modelo

de dos dimensiones la pérdida de pulpa máxima se redujo a un máximo de 10 % en frutos de coco con longitud entre 19 y 20 cm.

LITERATURA CITADA

- Assis, O. B. G.; Pessoa, J. D. C. 2009. An evaluation of fibrous structure and physical characteristics of Cutia nut (*Couepia edulis* Prance) shell. Acta Amazonica 39(4):981-986.
- Costa, C. M.; Yang, S. 2009. Counting pollen grains using readily available, free image processing and analysis software. Annals Botany 104(5):1005-1010.
- Du, C. J.; Sun, D. W. 2004. Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. Trend in Food Science and Technology 15:230-249.
- FAO 2000. New sport drinks: Coconut water. Magazine, Spotlight, AG21, November, USA
- Jarimopas, B.; Ruttanadat, N.; Terdwongworakul, A. 2009. An automatic trimming machine for young coconut fruit. Journal Biosystems Engineering 103:165-175.
- Jarimopas, B.; Kuson, P. 2007. A young-coconut-fruit-opening machine. Journal Biosystems Engineering 98:185-191.
- Pessoa, J. D. C.; Van Leeuwen, J. 2006. Development of a shelling method to recover whole kernels of the cutia nut (*Couepia edulis*). Revista Brasileira de Fruticultura 28(2):236-239.
- Rattanapaskorn, S.; Roonprasang, K. 2008. Design and development of semi-automatic cutting machine for young coconuts. International Journal Science and Technology 1 (Special Issue):1-6.
- Sinha, V. R.; Agrawal, M. K.; Kumria, R. 2005. Influence of Formulation and Excipient Variables on the Pellet Properties Prepared by Extrusion Spheronization. Current Drug Delivery 2:1-8.
- Zayas, I.; Pomeranz, Y.; Lai, F. S. 1985. Discrimination between Arthur and Arkan Wheats by Image Analysis. Cereal Chemistry 62(6):478-480.