



Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de papa cultivada en Colombia



Germán V. Buitrago¹, Alonso P. López², Alfonso P. Coronado³ & Fernando L. Osorno⁴

¹ Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá. Colombia. E-mail: gevabu78@hotmail.com (Foto)

² Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá. E-mail: alopando@hotmail.com

³ Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería. E-mail: aparrac@unal.edu.co

⁴ Investigador Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA, Programa Nacional de Maquinaria y Postcosecha, C.I. Tibaitatá. Colombia. E-mail: flozano@corpoica.org.co

Protocolo 41 - 27/2/2003 - Aprobado em 16/12/2003

Resumen: El objetivo del proyecto es determinar las propiedades físico-mecánicas de tres variedades de papa (criolla, pastusa y capiro), necesarias para el diseño y operación de maquinaria para siembra, cosecha, postcosecha y para el adecuado almacenamiento del producto. Se midieron propiedades físicas como: dimensiones axiales, esfericidad, redondez, ángulo de reposo, densidad real, densidad aparente y porosidad. Igualmente se determinaron propiedades mecánicas tales como: resistencia a la compresión, al corte, al punzonamiento y coeficiente de fricción. Se tomaron como factores de variación para cada variedad, el tamaño y el tiempo de toma de las observaciones (cada 15 días durante 90 días), utilizando el método por bloques completamente aleatorios. Los datos fueron sometidos a un análisis estadístico de varianzas, utilizando el método Duncan. Las propiedades físicas variaron de manera similar, de tal manera que la esfericidad y la redondez aumentaba a medida que el tamaño disminuye. La porosidad es superior al 48% y el ángulo de reposo es el característico de formas aproximadamente esféricas para las tres variedades analizadas. La principal influencia sobre la variabilidad en las propiedades mecánicas es el cambio en el contenido de humedad; también se detectó una pérdida de turgencia con el paso del tiempo que genera mayor elasticidad en el tubérculo, lo cual le permite soportar mayores cargas. La variedad Criolla presenta una resistencia entre tres y cinco veces mayor al corte, punzonamiento y compresión, con relación a las variedades Capiro y Pastusa.

Palabras claves: propiedades físico-mecánicas, *Solanum tuberosum*, parámetros de diseño, manejo postcosecha

Determination of physical characteristics and mechanical properties of potatoes cultivated in Columbia

Abstract: The aim of this work is to determine the physical and mechanical properties of three varieties of potatoes (Criolla, Pastusa and Capiro), in order to use them in the design and management of sowing, harvest and postharvest machines and adopt storage time of potato. Some of the physical properties like: axial dimensions, sphericity, roundness, repose angle, apparent density, real density and porosity were measured, as well as the mechanical properties like: compression, punction and cut strength and friction coefficient. The factor of variation such as size and the sampling time (every 15 days during 3 months) were involved for each variety of potato using a completely random block design. The data were analyzed statistically through the analysis of variance by the Duncan's method. The physical properties varied in similar way, the sphericity and roundness increased when the size reduced. The porosity is higher than 48% while the repose angle obtained is characteristic of approximately spherical shapes for three analyzed varieties. The principal influence over the variability in the mechanical properties is the change in the moisture content, besides, a turgency loss was observed during the storage time that provides more elasticity in the tuber which permit the tuber to bear higher loads. The Criolla variety showed a strength between three to five times more than Capiro and Pastusa varieties in cut, punction and compression test.

Key words: mechanicals properties, physical properties, *Solanum tuberosum*, design parameters, postharvest management

INTRODUCCIÓN

La calidad de los productos agrícolas hace referencia a una serie de características que determinan su grado de aceptación por parte del consumidor, relacionadas fundamentalmente con su sanidad general y con su vida comercial. Dentro de tales características se pueden mencionar entre otras: valor nutricional, características organolépticas, características físicas y propiedades mecánicas.

La firmeza mide la resistencia a daños físicos ocasionados por medios mecánicos durante la recolección, manipulación y transporte; depende del momento y método de recolección y de la temperatura de almacenamiento. Existen distintas técnicas para medir la firmeza, basadas en diferentes propiedades mecánicas como son, la punción, compresión, penetración, etc.; en general los ensayos tradicionales de firmeza miden la fuerza que opone un material biológico al ser perforado o comprimido hasta cierta profundidad y deformación.

En función de la calidad del producto, el conocimiento de las características físicas y las propiedades mecánicas juega un papel indispensable para lograr una buena presentación y conservación, permitiendo definir el manejo más adecuado del producto durante los periodos de pre cosecha, cosecha y poscosecha.

En relación con los cultivos transitorios, el cultivo de la papa en Colombia ocupa el tercer lugar en área sembrada, con alrededor de 170.000 has. cosechadas y el primer lugar en valor de la producción. Su participación en la producción agrícola (sin contar el café) durante el periodo 1970-1996, representó el 7.9% del valor real y el 12% del volumen.

Alrededor de 90.000 familias se encuentran vinculadas con la explotación directa de este cultivo. Es el producto de origen agrícola que demanda mayor cantidad de fungicidas e insecticidas y el segundo de fertilizantes químicos, después del café. Constituye así mismo la actividad que más utiliza los servicios de transporte terrestre, con más de 2'000.000 t año⁻¹, cifra que se incrementa con la movilización de los insumos requeridos para su producción.

Clasificación

De acuerdo con la “Norma NTC 341. Industria Alimentaria - Papa para Consumo”, en la Tabla 1 se presenta la clasificación del tubérculo por su tamaño, así como la clasificación comercial utilizada en Colombia.

Para este estudio se utilizó la clasificación comercial. La norma recomienda tomar el eje más largo como diámetro para conocer con exactitud cual es el grado del tubérculo.

Tabla 1. Clasificación comercial y clasificación según “Norma NTC 341. Industria Alimentaria - Papa para Consumo”

Clasificación Comercial		Clasificación “Norma NTC 341”	
Denominación	Diámetro (mm)	Denominación	Diámetro (mm)
Grado 0	> 90	Muy Grande	>90
Grado 1	70 – 89	Grande	65-90
Grado 2	50 – 69	Mediana	45-64
Grado 3	35 – 49	Pequeña	30-44

Características físicas

Las características físicas son importantes en muchos problemas asociados con el diseño de una maquina específica o para el análisis del comportamiento de un producto en el manejo del material.

- Dimensiones axiales: la forma y tamaño son inseparables en un objeto físico y el conocimiento de las dimensiones axiales son necesarios para que un objeto sea descrito satisfactoriamente

- Redondez: es un índice que indica que tanto se aproxima un sólido cualquiera a una forma redonda.

- Esfericidad: el fundamento geométrico del concepto de esfericidad descansa sobre la igualdad isoperimétrica de una esfera.

- Densidad y porosidad: la densidad de los sólidos se define como la masa del sólido dividida entre el volumen del sólido. La porosidad, o porcentaje de espacios vacíos de materiales no consolidados, es de gran utilidad en diversos procesos, como el paso de aire para su secado, almacenamiento, diseño de silos, separación de elementos indeseables etc.

- Angulo de reposo: cuando a un material de esta naturaleza se le permite fluir al vaciarlo sobre una superficie horizontal, forma una pila, que es una característica del mismo. el ángulo que forma la pendiente del material con la horizontal, es lo que se llama ángulo de reposo.

Propiedades mecánicas de materiales biológicos

De acuerdo con Mohsenin (1970), en un producto agrícola que posee el mismo comportamiento lineal de un material estructural, como se observa en la Figura 1, el denominado punto Y, dentro del diagrama fuerza-deformación, es el punto de biofluencia en el cual ocurre un incremento en la deformación con un decrecimiento o ningún cambio en la fuerza.

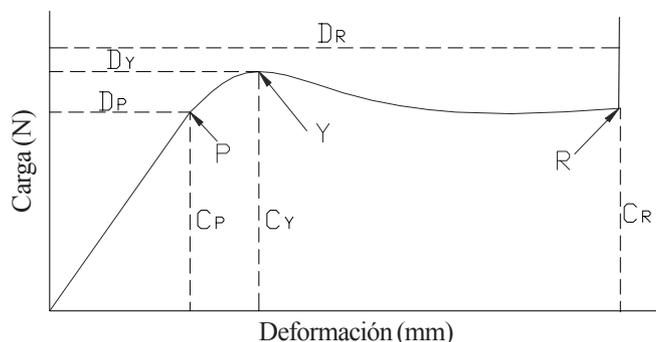


Figura 1. Curva típica fuerza-deformación de un material biológico

Para Mohsenin (1970), en muchos materiales biológicos, la presencia de este punto indica que hay una ruptura celular en la estructura interna del material. El término biofluencia es propuesto para materiales biológicos con el fin de diferenciar este fenómeno del punto de fluencia en materiales estructurales. La biofluencia puede ocurrir en cualquier punto más allá del punto P, donde la curva se aparta de su tendencia lineal.

Puede decirse que el punto de biofluencia corresponde a fallas en la microestructura, mientras que el punto de ruptura R, corresponde a fallas en la macroestructura de la muestra

(magulladuras, cortes, agrietamientos, fracturas, etc.) y ocurre después de que se ha sobrepasado el punto de biofluencia.

De la misma manera que ocurre en los materiales estructurales, cuando un material biológico es dúctil, se refiere a la capacidad de soportar largas deformaciones antes de romperse; pero si es un material biológico frágil su deformación es pequeña antes de llegar al punto de ruptura.

- Ensayo de compresión uniaxial: mediante este método es posible determinar la resistencia a la compresión ($N\ m^{-2}$) del material; su importancia radica en que los daños mecánicos en un material biológico son producto de cargas compresivas y ha sido esta problemática, probablemente, una de las principales razones para coleccionar más datos para ensayos de compresión que para los ensayos de tensión (Mohsenin, 1970).

Según el Standard: ASAE S368.1. Compresión Test of Food Materials of Convex Shape, y dentro del propósito de determinar las propiedades compresivas de un material biológico se necesita encontrar propiedades como: módulo de Young, tenacidad, punto de biofluencia y índice de esfuerzo.

- Ensayo de punción de la piel: es un método destructivo a partir del cual se mide la fuerza necesaria para pinchar la piel, indicando por tanto la "resistencia" de la piel. Otra medida importante que se establece en este ensayo es la deformación (mm) registrada durante la punción, que puede emplearse como indicador de la turgencia de los tejidos externos del fruto (Barreiro & Ruiz, 1996).

- Ensayo de corte: el corte de un material de origen biológico es un proceso muy común en la agricultura, horticultura, y a nivel forestal, también es muy usado en el procesamiento de materia prima para el área industrial.

La importancia para los profesionales que trabajan en áreas con actividades que involucran actividades de corte en materiales biológicos (entre ellos el ingeniero agrícola), es la necesidad de conocer la estructura y las propiedades del material para entender su comportamiento cuando es sometido a este tipo de pruebas.

- Ensayo coeficiente de fricción: el coeficiente de fricción entre la papa y la superficie de contacto servirá para conocer las pérdidas de potencia debida a la fricción en máquinas transportadoras y en cosechadoras. Es necesario entonces su conocimiento, para tener criterio de diseño de máquinas y lograr el mínimo de daño mecánico (Lozano, 2002).

Algunos datos de coeficientes de fricción de tubérculos de papa con diferentes materiales son los reportados por Kanafojski & Karwoski (1969), citado por Lozano (2002), los cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de coeficientes de fricción reportados por Kanafojski & Karwoski (1969) citado por Lozano (2002)

Superficie	Coefficiente de Fricción (μ)
Tubérculo - Acero Pulido	0,71 – 0,80
Tubérculo – Suelo	0,98 – 1,03
Tallos – Acero Pulido	0,47 – 0,74
Tallos – Caucho	0,71 – 0,93
Tallos – Suelo	0,67 – 0,96

El objetivo de la investigación fue determinar las propiedades físico-mecánicas a tres variedades de papa (criolla, pastusa y capiro), que sean útiles para el diseño y operación de maquinaria para siembra, cosecha y manejo poscosecha del producto.

MATERIAL Y METODOS

La materia prima utilizada para la realización de este estudio, estuvo conformada por tres variedades de papa a saber:

- CAPIRO (*Solanum tuberosum* × *Solanum andigena*). suministradas por un productor de papa industrial de la Sabana de Bogotá y obtenidas al azar de la producción.

- PARDA PASTUSA (*Solanum tuberosum* × *Solanum andigena*). Proviene de la finca El Portal del municipio de Saboyá – Boyacá, ubicada a una altitud de 2.900 m.

- CRIOLLA O YEMA DE HUEVO (*Solanum phureja*). Proviene de una compra al azar en un mercado de Bogotá.

Los equipos utilizados para la determinación de las propiedades físico-mecánicas fueron:

- Calibrador Pie de Rey (Precisión de 0.05 mm)
- Lámpara con bombillo de 60W a una altura de 50 cm
- Báscula electrónica marca August Sauter GMBH (Precisión 0.01g)
- Probeta con capacidad de 1000 mL
- Caja de madera de 0.30 × 0.30 × 0.30 m
- Caja de cartón de 0.34 × 0.2 × 0.2 m
- Máquina para determinación del coeficiente de fricción
- Máquina universal de esfuerzos Lloyd Instrument Serie 500 con capacidad de carga máxima de 500 N (precisión 0.001 N).

Para la determinación de las características físicas se aplicó la metodología desarrollada en el Departamento de Ingeniería Agrícola de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá, basada en Mohsenin (1970). Para la determinación de las propiedades mecánicas se desarrolló e implementó una metodología, para lo cual se procedió de la siguiente manera:

Diseño experimental

Se tomaron como factores de variación las variedades, los tamaños y el tiempo de toma de las observaciones. Los tamaños de la papa Pastusa fueron los grados comerciales 1, 2 y 3; los tamaños de la papa Capiro fueron los grados comerciales 0, 1, 2 y 3. Para la papa Criolla se tomó un solo tamaño dada su poca variación.

Las observaciones se realizaron durante 90 días, tiempo a partir del cual se iniciaron los procesos de brotación y de putrefacción de la papa. Se tomaron lecturas de las propiedades mecánicas cada quince días, con el fin de tener suficientes datos para el análisis del comportamiento de los productos.

Cada variedad fue separada y agrupada en cajas plásticas de dimensiones 0.50 x 0.30 x 0.15 m., clasificadas de acuerdo a su tamaño y almacenadas a temperatura ambiente (15 °C) durante los 90 días en el Laboratorio de Poscosecha y Maquinaria Agrícola, ubicado en las instalaciones del Centro Investigativo Tibaitatá de CORPOICA.

Determinación de propiedades físicas

Se consideró que estas características no variaban con el tiempo hasta la brotación del producto en el almacenamiento, por lo cual se determinaron en fresco. Se hicieron 30 observaciones para cada tamaño y variedad. Las propiedades físicas que se determinaron durante el estudio fueron las siguientes:

Dimensiones axiales: directamente con un calibrador pie de rey tomando tres medidas axiales perpendiculares entre si: x, y, z, para cada variedad y tamaño.

Densidad aparente: Se utilizó una caja de cartón de 0,34 x 0,2 x 0,2 m. En esta y para cada observación se introdujeron al azar tubérculos del mismo grado y variedad y se determinó su peso. La densidad aparente se determinó mediante la Eq. 1.

$$\text{Densidad Aparente } (\gamma_a) = \frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}} \quad (1)$$

donde:

Peso - peso en el aire del producto contenido en el recipiente
Volumen - volumen del recipiente que lo contiene

Densidad real: Una probeta con capacidad de 1000 mL se llenó con agua hasta 500 mL, en esta se introdujo un tubérculo de peso conocido, el volumen de agua desplazado es igual al volumen real de la papa. Finalmente se utilizaron los datos obtenidos para aplicarlos a la Eq. 2.

$$\text{Densidad Real } (\gamma_r) = \frac{\text{Peso del producto en el aire}}{\text{Volumen real del producto}} \quad (2)$$

Porosidad: La porosidad puede calcularse a partir de los valores de las densidades usando la Eq. 3.

$$\text{Porosidad} = \left(1 - \frac{\gamma_{\text{APARENTE}}}{\gamma_{\text{REAL}}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Esfericidad y redondez: Siguiendo la metodología propuesta por Curray (1951), citado por Mohsenin (1970), se tomó cada papa individualmente y se dibujó su silueta proyectada por una lámpara a 50 cm de altura. La silueta fue digitalizada y analizada mediante el programa AutoCad. Con estos dos datos se obtuvo la redondez y esfericidad para cada papa por variedad y tamaño, aplicando las Eq. 4 y 5.

$$\text{Redondez} = \frac{A_p}{A_c} \quad (4)$$

donde:

A_p - Es el área proyectada más larga de un objeto en posición de descanso.
 A_c - Es el área del círculo circunscrito.

$$\text{Esfericidad} = \frac{D_i}{D_c} \quad (5)$$

donde:

D_i - Es el diámetro del mayor círculo inscrito en el área proyectada.
 D_c - Es el diámetro del menor círculo circunscrito en el área proyectada.

Ángulo de reposo: Se diseñó un mecanismo para la medición de este parámetro, el cual consiste en una caja de madera de 0,30 x 0,30 x 0,30 m, esta se llenó con tubérculos de la misma variedad y tamaño, para luego abrir una cara lateral y dejar que esta rodara libremente y que se acomodara según su ángulo de reposo. Para leer su valor, se colocó papel cuadriculado en una de las caras de la caja y se midieron las distancias en x y y. Finalmente se utilizaron los datos obtenidos para aplicarlos a la Eq. 6.

$$\text{Angulo de Reposo } (^{\circ}) = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \quad (6)$$

Determinación de propiedades mecánicas

Usando la máquina universal de esfuerzos se realizaron las pruebas de compresión, punzonamiento y corte cada quince días durante tres meses de almacenamiento (90 días). Cada lectura se realizó sobre cinco tubérculos de cada tamaño y variedad. Para el caso de la “variedad Criolla” sólo se realizaron las pruebas cuando el tubérculo estaba fresco, dado que esta variedad es muy percedera y presenta brotes a escasos 4 días de almacenamiento.

Para las pruebas de compresión, corte y punzonamiento se siguieron estos pasos:

1. Registro de datos del tubérculo: variedad, tamaño, tiempo de almacenamiento y tipo de prueba.
2. Medición de las dimensiones axiales de la muestra.
3. Peso del tubérculo.
4. Ajuste de la máquina universal de esfuerzos con respecto al tubérculo, alineando el centro de la herramienta con el pico de la curvatura del espécimen.
5. Especificación de la velocidad adecuada dependiendo del tipo de prueba.
6. Comienzo de la prueba.

Prueba de compresión: La compresión se aplicó a tubérculos enteros de cada tamaño apoyados sobre sus dimensiones máximas. Se realizó mediante una esfera de 17,45 mm de diámetro, la cual se desplazaba verticalmente a una velocidad de 25 mm min⁻¹, según la norma ASAE S368.1

Prueba de punzonamiento: Según Valero & Ruiz (1996) la prueba se debe realizar a una velocidad de 20 mm min⁻¹, sin quitar la piel. La prueba se hizo con un cono de polímero liso con un ángulo de 45°.

Prueba de corte: Ante la ausencia de alguna bibliografía que recomendara una velocidad adecuada, se encontró por ensayo y error que para el tubérculo de la papa, se debe usar una velocidad de 10 mm min⁻¹, lo cual permite obtener una gráfica suficientemente clara. Se utilizó una cuchilla de acero con un espesor de 0,7 mm.

Prueba para determinar el coeficiente de fricción: Utilizando un modelo para la determinación del coeficiente de fricción se siguieron estos pasos:

1. Se colocaron las papas dentro del marco sobre el acero galvanizado, hasta cubrir la superficie delimitada por los lados del marco de madera.

2. Se colocó la tapa y el peso que proporciona el esfuerzo normal.

3. A una velocidad constante se accionó una manivela que jala el marco de madera y registra su valor en el dinamómetro. Se tomaron dos lecturas:

- Cuando se genera el primer movimiento de la papa sobre la superficie, se determina la fuerza de arrastre inicial. (Nº de repeticiones = 6).

- Cuando el marco se mueve a velocidad constante después de que se inicia el movimiento y se estabiliza la lectura en el dinamómetro, se determina la fuerza de arrastre dinámico

4. Sin cambiar los tubérculos, se repitió el mismo procedimiento para las diferentes cargas normales (2,5, 5,0 y 7,5 kg).

Luego de haber obtenido las lecturas de la fuerza horizontal para cada carga normal, se calculó el esfuerzo de arrastre y el esfuerzo normal por medio de las Eq. 7 y 8 (Ospina, 2000).

$$\tau(\text{Pa}) = \frac{\text{Fuerza de Arrastre}}{\text{Area base} \times (1 - \text{porosidad})} \quad (7)$$

$$\sigma(\text{Pa}) = \frac{\text{Fuerza Normal}}{\text{Area base} \times (1 - \text{porosidad})} \quad (8)$$

donde:

τ - Esfuerzo de arrastre (Pa)

σ - Esfuerzo normal a la superficie de arrastre (Pa)

Los datos obtenidos se registraron en una gráfica de esfuerzo normal en el eje de las ordenadas y esfuerzo de arrastre en el eje de las abscisas, con lo cual se obtuvieron curvas para:

- τ estático vs σ normal

- τ dinámico vs σ normal.

Las curvas obtenidas se ajustaron a la mejor línea de tendencia, que en general tuvo la ecuación de la forma

$$\tau = f(\sigma) \rightarrow \tau = A\sigma^2 + B\sigma \pm a$$

Al derivar la ecuación con respecto a σ , se obtuvo:

$$\frac{d\tau}{d\sigma} = A\sigma + B$$

teniendo en cuenta que el coeficiente de fricción, μ , viene dado por la relación entre las fuerzas de fricción existentes entre dos superficies.

$$\mu = \frac{d\tau}{d\sigma} \quad (9)$$

la relación se puede expresar como $\mu = A\sigma + B$; sin embargo, el valor del término $A\sigma$ obtenido *tiende* a cero, por lo tanto se podría desprestigiar para efectos prácticos, siendo representativo el valor del término independiente B como el valor de coeficiente de fricción.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variedad Criolla

Como se puede observar en la Tabla 3, las características físicas muestran homogeneidad, excepto el peso, pues este tiene una desviación estándar de 7,12 g, presentando un coeficiente de variación de 23,06%, lo cual indica la gran variabilidad de este parámetro en una variedad sin clasificar. El ángulo de reposo es muy homogéneo (50,32°), con valores cercanos al ángulo de reposo de formas esféricas, lo cual está acorde con los valores encontrados para esfericidad y redondez (0,79 y 0,8 respectivamente). El valor promedio de la densidad real fue de 1113,01 kg m⁻³, inferior al valor registrado por Mohsenin (1970) para la variedad Kerr Pink de 1232,48 kg m⁻³. El valor promedio encontrado para la porosidad puede

Tabla 3. Características físicas de tres variedades de papa cultivadas en Colombia

Característica	Variedad*			
	Criolla Media	Tamaño	Parda Pastusa Media	Capiro Media
Peso (g)	30,88 (7,12)	1	136,02 (25,75)	269,07 (36,19)
		2	95,81 (17,20)	149,71 (19,04)
		3	39,36 (6,09)	84,81 (14,60)
Densidad real (kg m ⁻³)	1113,01 (108,21)	1	1.228,45 (69,93)	1065,39 (87,81)
		2	1.179,58 (73,34)	1220,96 (69,87)
		3	1.187,27 (99,60)	1296,84 (109,17)
Densidad aparente (kg m ⁻³)	572,32 (14,80)	1	529,79 (15,37)	509,35 (15,96)
		2	610,24 (15,14)	496,26 (15,60)
		3	562,45 (7,88)	527,67 (12,36)
Esfericidad	0,80 (0,074)	1	0,76 (0,054)	0,71 (0,101)
		2	0,80 (0,054)	0,81 (0,045)
		3	0,83 (0,042)	0,82 (0,033)
Redondez	0,79 (0,066)	1	0,77 (0,046)	0,72 (0,084)
		2	0,80 (0,054)	0,81 (0,048)
		3	0,83 (0,047)	0,82 (0,041)
Porosidad (%)	48,15 (4,8)	1	56,74 (2,78)	51,92 (3,69)
		2	48,05 (3,90)	59,23 (2,60)
		3	52,31 (4,05)	59,06 (3,24)
Ángulo de reposo (grados)	50,32 (2,66)	1	43,39 (3,10)	43,45 (1,41)
		2	41,26 (1,32)	43,86 (0,99)
		3	39,68 (1,73)	41,81 (1,12)
				41,77 (0,91)

* Los valores entre paréntesis se refieren a la desviación estándar

considerarse alto (48,1%), lo cual es ideal para procesos de enfriamiento y almacenamiento refrigerado.

La Tabla 4 y la Figura 2 presentan los resultados obtenidos en las pruebas de compresión, pudiéndose observar que la parte elástica de la curva carga-deformación presenta una variación que oscila entre el 11% y el 24%. la carga máxima soportada en promedio fue de 150N. La carga en biofluencia que soportó el tubérculo en promedio fue de 135,19N.

En las pruebas de punzonamiento, de acuerdo con lo reportado en la Tabla 4, la carga máxima promedio necesaria para romper los tubérculos fue de $141,4 \pm 30,8$ N con un coeficiente de variación de 21,8%, para lo cual se presenta una deformación de 18,9 mm (unos milímetros después de atravesar el centro de la papa).

En las pruebas de corte, cuyos valores promedio se presentan en la Tabla 4 y en la Figura 3, el valor promedio

Tabla 4. Propiedades mecánicas de tres variedades de papa cultivadas en Colombia

Característica	Variedad*					
	Criolla Fresca		Parda Pastusa		Capiro	
	Media	Tamaño	Media		Media	
		Dia 0	Dia 90	Dia 0	Dia 90	
Compresión						
FB ^a (N)	135,19 (11,59)	0			10,5 (4,3)	30,4 (4,4)
		1	19,7 (9,8)	37,4 (6,9)	14,7 (3,7)	23,5 (5,9)
		2	29,8 (1,4)	32,5 (6,4)	15,5 (3,5)	19,3 (6,2)
		3	13,3 (4,5)	25,0 (5,8)	10,1 (3,8)	22,2 (8,6)
FM ^a (N)	150,01 (17,77)	0			12,3 (2,9)	32,6 (3,9)
		1	32,9 (11,2)	36,3 (9,5)	20,7 (14,4)	31,2 (10,8)
		2	33,7 (10,0)	43,9 (11,0)	16,9 (4,3)	24,1 (5,9)
		3	11,7 (3,1)	37,2 (5,1)	10,8 (3,4)	27,6 (6,9)
Punzonamiento						
FM (N)	141,40 (30,8)	0			19,9 (11,9)	48,6 (9,6)
		1	32,9 (11,2)	36,3 (9,5)	24,8 (9,5)	38,4 (12,1)
		2	33,7 (10,0)	43,9 (11,0)	20,7 (2,5)	46,7 (36,4)
		3	11,7 (3,1)	37,2 (5,1)	12,4 (6,7)	25,2 (5,8)
DM ^a (mm)	18,90 (2,86)	0			24,4 (8,0)	34,8 (10,2)
		1	30,5 (5,6)	30,7 (4,4)	25,0 (5,8)	29,3 (3,0)
		2	21,5 (3,1)	25,5 (2,3)	23,6 (3,7)	28,4 (4,3)
		3	16,3 (1,7)	22,7 (2,8)	18,0 (1,7)	24,3 (3,1)
WM ^a (J)	1,21 (0,42)	0			0,24 (0,16)	0,78 (0,50)
		1	0,43 (0,18)	0,60 (0,19)	0,27 (0,11)	0,48 (0,18)
		2	1,06 (0,47)	0,52 (0,15)	0,22 (0,05)	0,46 (0,35)
		3	0,10 (0,03)	0,37 (0,06)	0,11 (0,06)	0,25 (0,06)
Corte						
FM (N)	En cáscara:	0			3,5 (0,9)	8,4 (1,8)
	10,12 (2,6)	1	4,4 (1,3)	7,7 (1,8)	2,6 (0,4)	6,0 (1,7)
	En tubérculo:	2	1,7 (0,7)	9,0 (1,7)	2,0 (0,9)	8,4 (3,9)
	25,95 (4,07)	3	1,5 (0,4)	8,2 (2,0)	1,4 (0,8)	8,1 (1,8)
DM (mm)	En cáscara:	0			18,4 (4,7)	6,2 (1,1)
	1,66 (0,45)	1	16,3 (5,1)	5,1 (2,4)	13,1 (3,9)	5,4 (1,2)
	En tubérculo:	2	14,4 (9,2)	4,3 (0,5)	8,5 (6,6)	5,2 (1,9)
	13,59 (3,69)	3	8,8 (1,5)	5,5 (0,5)	4,0 (2,3)	5,6 (0,3)
WM (J)	En cáscara:	0			0,045 (0,02)	0,018 (0,004)
	0,008 (0,003)	1	0,05 (0,02)	0,02 (0,01)	0,023 (0,008)	0,012 (0,004)
	En tubérculo:	2	0,13 (0,09)	0,02 (0,01)	0,013 (0,012)	0,01 (0,006)
	0,24 (0,08)	3	0,01 (0,00)	0,02 (0,00)	0,003 (0,002)	0,016 (0,004)
Coefficiente de fricción						
Estático	Fresco: 0,12 Germinado: 0,13	0			Fresco: 0,36	Germinado: 0,069
		1	Fresco: 0,28	Germinado: 0,13	Fresco: 0,078	Germinado: 0,061
		2	Fresco: 0,10	Germinado: 0,19	Fresco: 0,154	Germinado: 0,131
		3	Fresco: 0,23	Germinado: 0,01	Fresco: 0,193	Germinado: 0,232
Dinámico	Fresco: 0,25 Germinado: 0,33	0			Fresco: 0,45	Germinado: 0,484
		1	Fresco: 0,3	Germinado: 0,40	Fresco: 0,341	Germinado: 0,645
		2	Fresco: 0,35	Germinado: 0,56	Fresco: 0,079	Germinado: 0,148
		3	Fresco: 0,67	Germinado: 0,18	Fresco: 0,058	Germinado: 0,722

* Los valores entre paréntesis se refieren a la desviación estándar. Los valores de las pruebas de corte para las variedades Pardo Pastusa y Capiro corresponde al tubérculo

^aFB: Carga necesaria para llevar el tubérculo al punto de fluencia (N); FM: Carga máxima soportada por el tubérculo (N); DM: Deformación máxima presentada por el tubérculo (mm); WM: Trabajo en carga máxima (J)

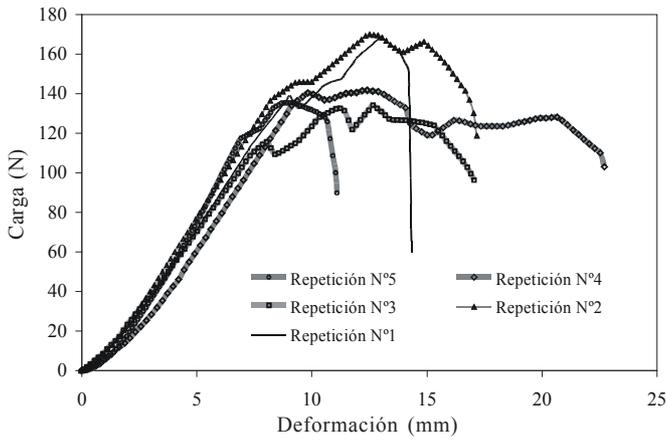


Figura 2. Curvas carga-deformación en la prueba de compresión para la variedad Criolla, obtenidas de cinco repeticiones

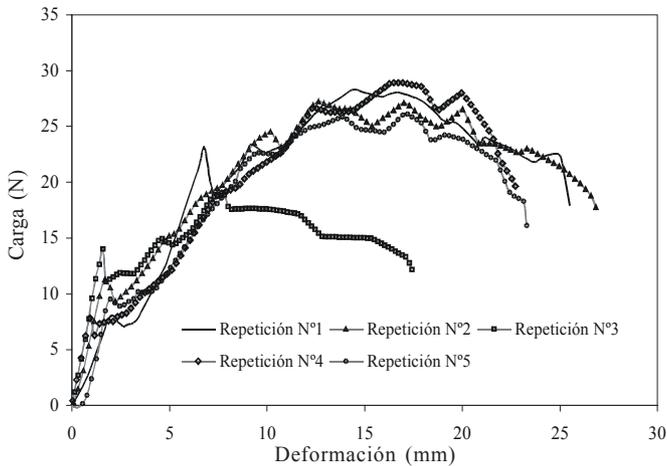


Figura 3. Curvas carga-deformación en la prueba de corte para la variedad Criolla, obtenidas de cinco repeticiones

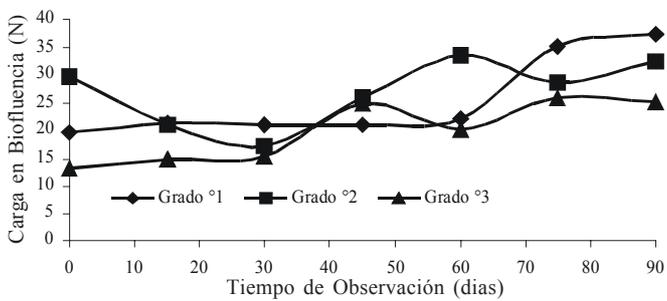


Figura 4. Evolución de la carga en biofluencia en prueba de compresión. Variedad Pastusa, tamaños grado 1, 2 y 3

soportado por la cáscara fue de $10,12 \pm 2,6$ N con un coeficiente de variación de 25,48% y un trabajo promedio de 0,008 J, lo cual demuestra gran susceptibilidad al daño mecánico; la carga soportada por el tubérculo en promedio fue de $25,9 \pm 4$ N con un coeficiente de variación de 15,6%. La deformación para esta carga ocurre justo unos milímetros antes de la mitad del tubérculo, en promedio a 13,59 mm. El trabajo tiene un valor promedio de $0,24 \pm 0,084$ J con un coeficiente de variación de 35,9%.

En las pruebas de fricción, cuyos valores promedio se presentan en la Tabla 4, se aprecia que los valores del coeficiente de fricción estático permanecen constantes pues en estado fresco su valor es de 0,12, mientras que en estado germinado

es igual a 0,13, lo cual se debe probablemente a la alta percibibilidad de esta variedad, lo cual no genera cambios significativos en corto tiempo. El valor para el coeficiente de fricción dinámica en estado fresco es de 0,25 y en estado germinado es de 0,33, siendo estos valores menores a los reportados por Kanafojski & Karwoski (1969), citado por Lozano (2001) para tubérculos-acero, cuyos valores están entre 0,71 y 0,80, lo cual se debe probablemente al uso de una variedad diferente a la utilizada por Kanafojski y Karwoski.

Variedad Parda Pastusa

Como se puede observar en la Tabla 3, se encontró muy buena uniformidad de las características físicas en cada uno de los tres grados estudiados, pues sus coeficientes de variación no son superiores al 9%. Los valores de redondez y esfericidad muestran que a medida que aumenta el tamaño del tubérculo, éste pasa de la forma redonda a la forma oblonga, lo cual se manifiesta por la disminución en el valor de estos parámetros.

En cuanto a la densidad real, el tamaño grado 1 presenta un valor promedio de $1228,4 \text{ kg m}^{-3}$, similar a la variedad Kerr Pink de 1232 kg m^{-3} reportado por Mohsenin (1970), mientras que el tamaño grado 2 presenta un valor promedio de $1179,6 \text{ kg m}^{-3}$ y el tamaño grado 3 de $1187,8 \text{ kg m}^{-3}$. La densidad aparente promedio para esta variedad está entre 530 kg m^{-3} y 610 kg m^{-3} ; esta variación se debe fundamentalmente a que la acomodación de los tubérculos en el recipiente fue al azar.

La porosidad es alta para el tamaño más grande y se encuentra entre 48 y 56% en promedio para los tres tamaños estudiados, con un coeficiente de variación no superior al 8,1%; de igual manera, el ángulo de reposo aumenta en proporción directa al aumento de tamaño, presentando valores promedio que oscilan entre $39,6^\circ$ y $43,3^\circ$.

La Tabla 4 y la Figura 4 muestran que en términos generales para los ensayos de compresión, la variación en el tiempo tanto de la carga de fluencia como de la carga máxima presentan una tendencia creciente para los tamaños estudiados, debido fundamentalmente a que ocurre una pérdida en la turgencia de los tubérculos, lo cual se refleja en un aumento en la elasticidad, manifestándose en una mayor respuesta del tubérculo a soportar cargas y deformaciones. La carga de biofluencia promedio para el tamaño grado 1 evoluciona de 19,7 a 37,4 N, para el tamaño grado 2 varía de 29,8 a 32,5 N y para el tamaño grado 3 de 13,3 a 25,0 N al final de los 90 días de almacenamiento. De igual manera, la carga máxima en promedio para el tamaño grado 1 evoluciona de 32,9 a 36,3 N, para el tamaño grado 2 de 33,7 a 43,9 N y para el tamaño grado 3 de 11,7 a 37,2 N.

En la prueba de punzonamiento, los resultados de la Tabla 4 muestran que el comportamiento es similar al encontrado para las pruebas de compresión, presentando la carga máxima una tendencia creciente a medida que transcurre el tiempo de almacenamiento. Se observa que las deformaciones máximas alcanzadas no variaron mucho con el tiempo, presentando valores promedio para los tamaños grado 1 y grado 2 de 30,6 y 23,5 mm respectivamente; para el tamaño grado 3 aumenta de 16,3 a 22,7 mm en promedio. El trabajo en carga máxima es significativamente menor en el tamaño grado 3, aumentando de 0,1 a 0,37 J mientras que los tamaños grado 1 y grado 2 varían entre 0,43 y 0,60 J.

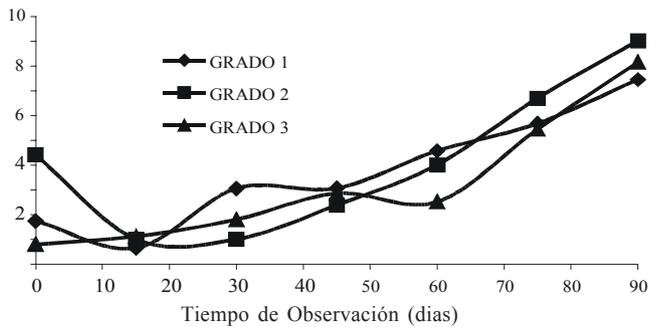


Figura 5. Evolución de la Carga Máxima en Cáscara para la prueba de Corte. Variedad Pastusa, tamaños grado 1, 2 y 3.

Los resultados de las pruebas de corte, presentados en la Tabla 4 y en la Figura 5, muestran que la carga máxima soportada por los tubérculos varía entre 1,5 y 9,0 N para los tres tamaños analizados, presentando una tendencia creciente a medida que transcurre el tiempo de almacenamiento, de manera similar a lo encontrado para las pruebas de compresión y punzonamiento. El trabajo necesario para llegar a la carga máxima se mantiene aproximadamente constante al final del almacenamiento para los tres tamaños estudiados, con un valor promedio de 0,02J.

Para la prueba de fricción, en general se presenta una disminución del coeficiente de fricción estática cuando el tubérculo pasa del estado fresco al germinado; para el tamaño grado 1 pasa de 0,28 a 0,13 y para el tamaño grado 3 varía de 0,23 a 0,01, en tanto que para el tamaño grado 2 aumenta de 0,10 a 0,19. Solamente el valor del coeficiente de fricción dinámico en estado fresco para el tamaño grado 3 igual a 0,67 se aproxima a los valores reportados por Kanafojski & Karwoski (1969), citado por Lozano (2001).

Variedad Capiro

Como se puede observar en la Tabla 3, se encontró muy buena uniformidad de las características físicas en cada uno de los cuatro grados estudiados para esta variedad, con coeficientes de variación inferiores al 10%. Los valores promedios de redondez y esfericidad para el tamaño grado 0 son 0,72 y 0,71 respectivamente, mientras que para el tamaño grado 3 son 0,83 y 0,82, lo cual indica que a medida que aumenta el tamaño, el tubérculo pasa de la forma redonda a la forma oblonga.

El tamaño grado 1 tiene una densidad real promedio de 1221 kg m^{-3} similar a la variedad Kerr Pink ($\gamma_{\text{real}} = 1232 \text{ kg m}^{-3}$) reportado por Mohsenin (1970), mientras que los tamaño grado 0 y grado 3 presentan valores promedio de 1065 kg m^{-3} y de 1114 kg m^{-3} respectivamente; el tamaño grado 2 presentó un valor promedio de densidad real de 1297 kg m^{-3} , superior a lo reportado por Mohsenin (1970).

La densidad aparente encontrada para esta variedad oscila entre 496 y 534 kg m^{-3} , siendo mayor para los tamaños grado 2 y grado 3 (los más pequeños). La porosidad es alta pues los valores promedios están entre el 52 y 59% con un coeficiente de variación no mayor al 7%; el ángulo de reposo en promedio se encuentra entre 41,7 y 43,9% con un coeficiente de variación no superior al 3%.

Las pruebas de compresión, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4 y en la Figura 6, muestran que la carga de Biofluencia presenta una tendencia creciente a través del

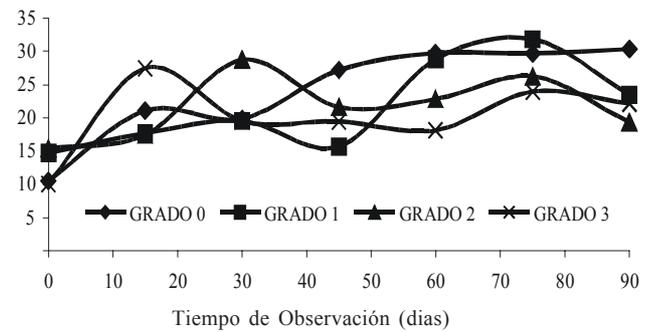


Figura 6. Evolución de la carga en biofluencia en prueba de compresión. Variedad Capiro, tamaños grado 0, 1, 2 y 3

almacenamiento para los diferentes tamaños, variando en promedio de 10,5 a 30,4 N para el tamaño grado 0, de 14,7 a 23,5 N para el tamaño grado 1, de 15,5 a 19,3 N para el tamaño grado 2 y de 10,1 a 22,2 N para el tamaño grado 3, al final de los 90 días de almacenamiento. La carga máxima presenta un comportamiento creciente a medida que transcurre el tiempo de almacenamiento, de manera similar a lo encontrado en los estudios para la variedad Pardo Pastusa.

La Tabla 4 muestra que en la prueba de punzonamiento el tamaño grado 3 registra los menores valores de carga máxima soportada, variando en promedio de 12,4 a 25,2 N; en general las características muestran una tendencia creciente a través del tiempo de almacenamiento, observándose que en promedio el tamaño grado 0 evoluciona de 19,9 a 48,6 N, el tamaño grado 1 de 24,8 a 38,4 N, el tamaño grado 2 de 20,7 a 46,7 N. Las deformaciones máximas presentan igualmente una tendencia creciente; así, para el tamaño grado 0 varía de 24,4 a 34,8 mm, para el tamaño grado 1 de 25,0 a 29,3 mm, para el tamaño grado 2 de 23,6 a 28,4 mm y para el tamaño grado 3 de 18,0 a 24,3 mm. El trabajo es significativamente menor en los tamaños grado 2 y grado 3; para el tamaño grado 0 el valor del trabajo en promedio evoluciona de 0,24 a 0,78 J, para el tamaño grado 1 de 0,27 a 0,48 J, para el tamaño grado 2 de 0,22 a 0,46 J y para el tamaño grado 3 de 0,11 a 0,25 J.

En las pruebas de corte, mostradas en la Figura 7, la carga máxima soportada por la cáscara evoluciona en promedio de 2 a 8 N para los cuatro tamaños analizados; sin embargo, en el día 75 se presenta un pico de resistencia entre los 9 y 12 N; después de este día se empezaron a notar síntomas de putrefacción en algunas muestras. El trabajo necesario para cortar la cáscara evoluciona en promedio de 0,002 hasta los 0,015 J para los cuatro tamaños, pero en el día 75 ocurre un pico muy notorio en los tamaños grado 1, 2 y 3 que está entre los 0,021 y 0,026 J. Los resultados de la Tabla 4 muestran que la carga y la deformación máximas presentan una tendencia creciente a través del tiempo de almacenamiento del tubérculo, de manera similar a lo observado para las otras propiedades mecánicas. Se observa que la carga máxima evoluciona en promedio de 1,4 a 8,4 N para los cuatro tamaños analizados y que los tubérculos presentan una resistencia directamente proporcional a su tamaño al comienzo del almacenamiento, pero al final del mismo esta resistencia presenta un valor semejante para todos los tamaños. En términos generales, el trabajo en carga máxima tiende a disminuir con el tiempo de almacenamiento, evolucionando de 0,045 a 0,018 J para el tamaño grado 0 y de 0,013 a

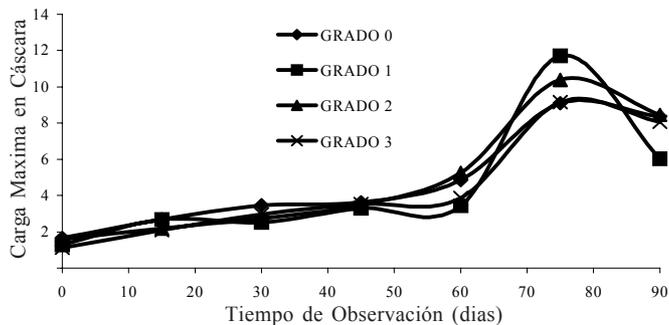


Figura 7. Evolución de la carga máxima en cáscara para la prueba de corte. Variedad Capiro, tamaños grado 0,1,2 y 3

0,010 J para el tamaño grado 2; tan solo el tamaño grado 3 presenta una tendencia creciente para este parámetro, variando de 0,003 J al inicio del almacenamiento a 0,016 J al final del mismo.

Para la prueba de fricción, en general se presenta una disminución del coeficiente de fricción estático cuando el tubérculo pasa del estado fresco al germinado; para el tamaño grado 0 el coeficiente de fricción estático pasa de 0,36 a 0,069, en el tamaño grado 1 de 0,078 a 0,061 y el tamaño grado 2 de 0,154 a 0,131, en tanto que para el tamaño grado 3 el coeficiente de fricción estática aumenta de 0,193 a 0,232. En general se observa que el coeficiente de fricción dinámico aumenta al pasar del estado fresco al germinado; solamente el coeficiente de fricción dinámico para el tamaño grado 1 y para el tamaño grado 3 con valores de 0,64 y 0,72 en estado germinado respectivamente, se acerca a los valores de Kanafojski & Karwoski (1969), citado por Lozano (2001).

CONCLUSIONES

1. Los parámetros encontrados para las tres variedades de tubérculos estudiadas presentan gran dispersión, debido fundamentalmente al carácter biológico de los tubérculos.
2. De acuerdo con los valores de esfericidad y redondez obtenidos, se aprecia que a medida que el tamaño aumenta, el tubérculo pasa de una forma redonda a oblonga, pareciéndose a las variedades americanas.
3. En general la porosidad presenta valores altos para las tres variedades estudiadas, lo cual puede ser favorable en los procesos de almacenamiento refrigerado.
4. La densidad real, la densidad aparente y la porosidad dependen del tamaño, aunque no se encontró una tendencia definida.
5. La principal influencia sobre la variabilidad en las propiedades mecánicas son los cambios en el contenido de humedad de los tubérculos.
6. La pérdida de turgencia de los tubérculos con el paso del tiempo está directamente relacionada con aumento de la elasticidad de los mismos, lo cual les permite soportar mayores cargas.
7. Las pruebas de compresión para las tres variedades de tubérculos estudiadas, muestran que la carga de biofluencia y la carga máxima presentan una tendencia ascendente.
8. En las pruebas de punzonamiento para las tres variedades estudiadas, la carga máxima, la deformación y trabajo máximos tienen una tendencia ascendente, siendo diferenciable el

comportamiento del tamaño grado 3 con los demás tamaños analizados.

9. En general las variedades Capiro y Pastusa soportan la mitad de la carga en cáscara que puede soportar la variedad Criolla y 1/5 la carga máxima soportado por el tubérculo con respecto a la variedad Criolla.

10. En la prueba de fricción el contenido de humedad, en las variedades Capiro y Pastusa, afecta el valor de los coeficientes de fricción estática.

11. Para las variedades Capiro y Pastusa, el valor del coeficiente de fricción estático disminuye cuando el tubérculo pasa del estado fresco al germinado. Para la variedad criolla el coeficiente de fricción estático permanece constante.

12. Para las tres variedades estudiadas, el valor del coeficiente de fricción dinámico aumenta cuando los tubérculos pasan del estado fresco al germinado.

LITERATURA CITADA

- ASAE Standard: ASAE S368.1. Compression test of food materials of convex shape. Diciembre, 1979. Revised and Preclassified
- Barreiro, P.; Ruiz, A. M. Propiedades mecánicas y calidad de frutos. Revista Fruticultura Profesional, n° 77, p.50, 1996.
- Canavos, G. Probabilidad y estadística. Aplicaciones y métodos. Bogotá, Editorial McGraw Hill, 1985. p. 403 - 404.
- Hernández, C. E.; Rodríguez, B. A. Catálogo de variedades colombianas de papa. Bogotá D.C.: Instituto Colombiano Agropecuario. p. 12, 14 y 30.
- <http://www.agen.tamu.edu/users/castell/3542.htm>. Fecha de consulta: Enero de 2002.
- Lewis, M.J. Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado. Zaragoza: Editorial Acirbia S.A., 1993, p.135-136.
- Lozano, O. F., Establecimiento y caracterización de los parámetros de diseño y construcción de máquinas cosechadoras de papa para condiciones colombianas. Bogotá: CORPOICA – Universidad de los Andes, 2002. p.8
- Mohsenin, N., Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Science Publisher, 1970, p.587-593.
- Montgomery, D. C. Diseño y análisis de experimentos. México: Grupo Editorial Iberoamérica. 1991, p. 60-69.
- Ospina, M. J. E. Características físico mecánicas y análisis de calidad granos. Bogotá: Unidad de Publicaciones Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, 2002, p.87-89.
- Pando, L. A.; Vargas, B. G. E. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas a tres variedades de tubérculos de papa (*Solanum tuberosum*). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, 2002. 226p. Tesis Ingeniero Agrícola
- Persson, S. Mechanics of cutting plant material. St. Joseph, 1987. p. 3-4, 36-38. Monograph of the American Society of Agricultural Engineers ASAE #7.
- Valero, C.; Ruiz, A. Grupos de medidas de calidad organoléptica de frutas. Revista Fruticultura Profesional, n. 95, p.41-42, 1998. www.redepapa.org.co