

Efecto del Contenido de Humedad sobre Propiedades Físicas de la Semilla de Vitabosa (*Mucuna deeringiana*)

Effect of Moisture Content on Physical Properties of Vitabosa Bean (*Mucuna deeringiana*) grains

Ángel Francisco Rojas Barahona¹ e Iván Darío Aristizábal Torres²

Resumen. La semilla de vitabosa (*Mucuna deeringiana*) es una alternativa de fuente proteica para la producción de alimento animal, actualmente en Colombia se obtiene un bajo aprovechamiento de esta semilla por el desconocimiento de su alto potencial nutricional, de sus propiedades medicinales, fitosanitarias y de su proceso agroindustrial. Es necesario obtener conocimiento de las propiedades físicas de la semilla, las cuales son importantes en los procesos postcosecha de esta leguminosa. Varias propiedades físicas fueron evaluadas con cuatro contenidos de humedad (10, 14, 18 y 22% b.h.). Las dimensiones ortogonales longitud, ancho y espesor, los diámetros medio aritmético y geométrico, y el ángulo de reposo se incrementaron significativamente cuando el contenido de humedad aumentó del 10 al 22%; mientras que la esfericidad no varió significativamente con la humedad. El área proyectada se incrementó con la humedad en los tres planos de orientación (horizontal, transversal y longitudinal). El coeficiente de fricción estático se evaluó sobre seis superficies de diferente material, en todas las superficies esta propiedad se incrementó significativamente con el aumento del contenido de humedad y fue significativamente diferente entre las superficies estudiadas; siendo en su orden de mayor a menor, la superficie de caucho, policloruro de vinilo (PVC), lona, acero inoxidable, hierro galvanizado y aglomerado de madera. La información generada puede ser utilizada para el diseño de equipos de procesamiento postcosecha y para el control de calidad de esta semilla.

Palabras clave: Vitabosa, *Mucuna deeringiana*, propiedades físicas, contenido de humedad.

Abstract. The vitabosa seed (*Mucuna deeringiana*) is a protein source alternative for the animal food production, currently in Colombia there is a low use of this seed by the ignorance of its nutritional high potential, medicinal, phytosanitary properties and their postharvest process. It is necessary to obtain knowledge of seed physical properties, which are important in the agro-industrial processes of this legume. For four moisture contents (10, 14, 18 and 22% w.b.) several physical properties were evaluated. The length, width, thickness, arithmetic and geometric mean diameters, angle of repose increased significantly when the moisture content increased from 10 to 22%, while sphericity did not vary significantly with moisture. The projected area increased with moisture in the three orientation planes (horizontal, transverse and longitudinal). In six different material surfaces the static friction coefficient (μ_0) was evaluated. In all surfaces μ_0 increased significantly with the humidity, also there was a difference significantly among the surfaces studied, being in order of bigger to minor: rubber, Polyvinyl Chloride (PVC), canvas, stainless steel, galvanized iron and chipboard. Information generated is very useful for postharvest processing equipment design and quality control of this seed.

Key words: Vitabosa, *Mucuna deeringiana*, physical properties, moisture content.

La *Mucuna deeringiana* es una planta de la familia de las leguminosas que en Colombia es conocida con el nombre de vitabosa. En otros lugares se identifica como velvet bean, frijol terciopelo o simplemente mucuna. Es un cultivo semestral de crecimiento vigoroso y su origen se reporta en el sur de China y en el este de la India. Actualmente se encuentra ampliamente distribuida en algunos países de Asia, África, Centroamérica y Suramérica (Duke *et al.*, 1981, citado por Trejo, 2005).

Esta leguminosa es importante por su aporte de nitrógeno al suelo y por su contribución al control

de malezas y prevención de la erosión. Como abono verde puede suministrar hasta 195 kg·ha⁻¹ de nitrógeno al suelo (Echeverry y Rodríguez, 1997). Se han encontrado en ella efectos alelopáticos contra nemátodos y algunos insectos (Caamal *et al.*, 2001). Con propósitos medicinales se ha extraído de las semillas la L-Dopa, compuesto empleado para el tratamiento de la enfermedad de Parkinson (Sathiyarayanan y Arulmozhi, 2007). Las semillas son ricas en proteína las cuales pueden ser una alternativa económica para alimentar animales (Maasdorp *et al.*, 2004). A pesar de la presencia de compuestos anti nutricionales

¹ Ingeniero Agrónomo, Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <angelfrb@hotmail.com>

² Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <idaristi@unal.edu.co>

Recibido: Abril 13 de 2011; aceptado: Junio 16 de 2011.

y tóxicos como los inhibidores de tripsina, taninos, las semillas de vitabosa con adecuados tratamientos para la extracción de éstos compuestos, se pueden destinar sin problemas aparentes para alimentar rumiantes o animales monogástricos (Matenga *et al.*, 2003; Chaparro, 2009). La semilla de vitabosa ha sido objeto de muchas investigaciones en diversas partes del mundo pero muy poco se conoce de su proceso postcosecha y de sus propiedades físicas; de hecho el desarrollo agroindustrial de un material vegetal parte del conocimiento básico que se tenga de sus propiedades físicas (Villamizar *et al.*, 2004).

Las propiedades físicas son importantes para diseñar y optimizar equipos requeridos en las etapas de procesamiento de un producto agrícola (Mohsenin, 1986; Stroshine y Hamann, 1993; Ospina, 2001; Cetin, 2007). Estudios realizados en otras semillas demuestran que las propiedades físicas son fuertemente influenciadas por el contenido de humedad (Haddad *et al.* 1999; Gupta y Das, 2000; Henry *et al.*, 2000; Molenda, *et al.*, 2005; Vursavus y Ozguven, 2004, 2005; Baumler *et al.*, 2006; Altuntas y Yildiz, 2007; Andrejko y Grochowicz, 2007; Dziki, 2007; Correa *et al.*, 2008; Saiedirad *et al.*, 2008; Kilickan y Guner, 2008).

El tamaño y forma (esfericidad) de la semilla son necesarios para el diseño de equipos de clasificación y control de calidad, el área proyectada es importante para el diseño de equipos de transporte y deshidratación. El coeficiente de fricción estático es necesario para el diseño de sistemas de transporte y para determinar la eficiencia y desgaste de equipos. El ángulo de reposo es un indicador de la fluidez de materiales sólidos, necesario para determinar el grado de inclinación de las superficies de transporte y de almacenamiento como tolvas y silos (Mohsenin, 1986; Stroshine y Hamann, 1993; Ospina, 2001; Molenda *et al.*, 2005). El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto de la humedad de la semilla de vitabosa sobre algunas propiedades físicas como tamaño, esfericidad, área proyectada, ángulo de reposo y coeficiente de fricción estático en el intervalo de humedad del 10 al 22% de base húmeda (b.h.).

MATERIALES Y MÉTODOS

Las semillas de vitabosa fueron obtenidas de un cultivo establecido en el Centro Agropecuario Cotové de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, localizado en Santa Fé de Antioquia con las

siguientes características: humedad relativa de 55,4%, temperatura media 27,3°C, 550 msnm, composición química del suelo; 3% de materia orgánica; pH de 7,2; P 26 ppm; Ca 17,1; Mg 5,4; y K 0,17 en -mili equivalentes/100 g de suelo. Se recolectaron manualmente las vainas secas del cultivo y luego las semillas fueron retiradas eliminando las dañadas y las impurezas presentes. Se llevó una muestra de 50 kg al Laboratorio de Procesos Agrícolas de la Universidad Nacional de Colombia, donde se realizaron los diferentes ensayos. De acuerdo con la metodología desarrollada por Gupta y Das (1997) y Saiedirad *et al.* (2008), las semillas fueron clasificadas en tres tamaños (pequeña, mediana y grande), utilizando tamices con las siguientes dimensiones: 30/64" (117 mm), 28/64" (110 mm), 22/64" (85 mm) y 20/64" (76 mm). Las semillas de tamaño mediano que pasaron por la malla No. 28 y quedaron retenidas en la malla No. 22, representando la mayor población de semilla en las muestras, fueron utilizadas para todas las pruebas y evaluaciones que se explican a continuación.

Evaluación de la humedad. El contenido de humedad promedio de las semillas cosechadas, determinado con una muestra aleatoria de 150 g distribuida en 10 bandejas de 15 g empleando el método de secado al horno a 103 °C durante 72 h, norma ASABE 352.2 (ASABE, 2006), fue de 13% b.h. Las propiedades físicas investigadas en el trabajo se evaluaron en cuatro diferentes niveles de humedad: 10, 14, 18, 22% b.h.

Para obtener semillas con el 10% humedad b.h., éstas fueron deshidratadas en horno de convección forzada, a una temperatura de 45 °C por 48 h y una humedad relativa de 65%. La humedad final requerida se determinó por medio del método gravimétrico, utilizando la ecuación (1).

$$H_f = \frac{(W_i - W_f) \cdot 100}{W_i} \quad (1)$$

Donde;

H_f : humedad final, % b.h.

W_i : peso inicial, g

W_f : peso final, g

Para acondicionar las semillas a los niveles de humedad del 14, 18 y 22%, se implementó un procedimiento propio basado en la metodología de absorción de agua en cámara húmeda. Para esto se utilizó un recipiente plástico de 25 cm de diámetro y altura de 40 cm y un porta muestra, elaborado con

una malla con abertura de 1 mm, ubicado 10 cm de la base del recipiente, en el que se depositaron 1.000 g de semilla. Antes de colocar las semillas, se llenó el recipiente con agua destilada hasta una altura de 8 cm de tal manera que las semillas permanecieran a una distancia de 2 cm por encima del nivel del agua.

La prueba de absorción en la cámara húmeda se realizó por triplicado a temperatura ambiente, correlacionando el peso del agua absorbida por las semillas con el tiempo de permanencia en la cámara. El análisis de varianza reportó que el efecto del tiempo que permanecen las semillas dentro de la cámara húmeda es significativo, con un r^2 de 0,98, y se representa con la siguiente ecuación:

$$Y = 0,22t + 0,48 \quad (2)$$

Donde;

Y: g agua adsorbida/1000 g semilla

t: tiempo, horas

El tiempo necesario para mantener las muestras en la cámara húmeda y alcanzar la humedad deseada fue directamente proporcional a su contenido de humedad final, así; para 14% b.h. fueron 45 h, para 18% b.h. fueron 235 h y para 22% b.h. fueron 444 h. Al cabo de este tiempo no se observó presencia de hongos en las semillas hidratadas.

Con la ecuación (2) se calcularon los gramos de agua absorbida por hora y a partir de la humedad inicial y del peso de la muestra, se acondicionó la humedad final de la semilla. Con este procedimiento se obtuvo una homogeneidad de absorción sin daños mecánicos en la testa de la semilla, metodología de hidratación de semillas que hasta el momento no ha sido mencionada en investigaciones sobre cambios físico-mecánicos por efecto de la humedad.

Las muestras acondicionadas con los niveles de humedad: 10, 14, 18 y 22% fueron almacenadas en recipientes de vidrio herméticamente sellados para evitar pérdida o ganancia de humedad y los contenidos de humedad de las semillas fueron verificados empleando la norma S352.2 ASABE (2006). No hubo cambios de la humedad de las semillas almacenadas en el recipiente hermético.

En los cuatro contenidos de humedad se evaluaron las propiedades físicas: dimensiones ortogonales y tamaño, esfericidad, área proyectada, coeficiente de fricción estático, y ángulo de reposo. Las muestras

fueron estandarizadas por número de semillas, excepto las muestras para evaluar el coeficiente de fricción, las cuales se estandarizaron por peso.

Medición de las características físicas

Dimensiones y tamaño. En 80 semillas tomadas al azar por cada nivel de humedad, las dimensiones ortogonales longitud (L), ancho (W), espesor (T) se midieron con un calibrador digital de una exactitud de 0,001 mm y mediante la técnica de análisis de imagen, explicada más adelante. A partir de ellas, se calculó el diámetro medio geométrico (D_g) y el diámetro medio aritmético (D_a), utilizando las siguientes ecuaciones (Altuntas y Yildiz, 2007; Cetin, 2007; Dursun *et al.*, 2007):

$$D_a = \frac{(L + W + T)}{3} \quad (3)$$

$$D_g = (L \cdot W \cdot T)^{1/3} \quad (4)$$

Esfericidad. Es un criterio definido para determinar la forma de un material biológico. Con las dimensiones ortogonales anteriormente determinadas y al mismo tamaño muestral, se aplicó la ecuación (5) para evaluar la esfericidad de las semillas según método utilizado por Dursun *et al.* (2007), Joshi *et al.* (1993) y Dutta (1988):

$$\phi = \frac{D_g}{L} \quad (5)$$

Donde:

ϕ : esfericidad (adimensional)

D_g : diámetro geométrico (mm)

L: longitud (mm)

Área proyectada y dimensiones ortogonales.

El área proyectada y las dimensiones ortogonales de la semilla, se determinaron aplicando el método de procesamiento de imagen de acuerdo a la metodología propuesta por Sahoo y Srivastava (2002) y Koc (2007). Para estas pruebas se utilizaron 80 semillas (repeticiones) tomadas al azar por cada nivel de humedad. Las semillas fueron fotografiadas en diferentes planos con una cámara Canon® Power Shop A460 de 5,0 MP. Las imágenes adquiridas fueron almacenadas en un computador equipado con un software de procesamiento de imagen (Matrox Inspector 2.2®), con el cual se determinó, basado en el recuento del número de píxeles, el área proyectada

(Ap) en mm² y las dimensiones ortogonales (longitud, ancho y espesor) en mm de las semillas en cada plano.

Para estas pruebas se montó la cámara sobre un soporte metálico fijo con una base plana de fondo blanco; en la parte superior de la cámara se acopló una lámpara circular de luz blanca, de esta manera se garantizó que las imágenes presentaran igual distancia e intensidad de luz difusa (Koc, 2007).

La distancia entre la base y el lente de la cámara fue de 80 mm. Cada semilla fue colocada en el centro de la base y ubicada en tres planos diferentes (longitudinal, transversal y horizontal). Para sostener las semillas en los planos longitudinal y transversal se utilizó una lámina delgada de plastilina como adherente.

La imagen original (en color) se convirtió a una imagen en escala de grises de 256 niveles, que va desde el negro (0) hasta el blanco (255), luego fue transformada a una imagen binaria de dos niveles (blanco y negro). Para evaluar los parámetros de interés se trabajó con el nivel de gris promedio de la imagen de la superficie de la semilla, definiéndose tres umbrales de niveles de gris para la segmentación de las imágenes (118 para el plano longitudinal, 108 para el trasversal, y 115 para el horizontal).

En el programa de análisis de imagen, las dimensiones (en píxeles) de las imágenes fueron transformadas a unidades de longitud (mm), mediante factores de calibración (pixel/mm) el cálculo del área proyectada y de las tres dimensiones, las cuales se compararon con las mediciones realizadas con el calibrador.

Coefficiente de fricción estático. La relación entre la fuerza máxima de fricción necesaria para mover las semillas y el peso de estas, definida como coeficiente de fricción estático, se determinó con la ecuación (6) (Altuntas y Yildiz, 2007):

$$\mu_0 = \frac{F_0}{W} \quad (6)$$

Donde:

μ_0 : coeficiente de fricción estático (adimensional)
 F_0 : fuerza máxima requerida para mover la muestra, kgf.
 W : peso de las semillas, kgf.

Esta propiedad fue medida sobre seis superficies de diferentes materiales: acero inoxidable, aglomerado

de madera, lona, hierro galvanizado, caucho y polivinilo de cloruro (PVC) para los diferentes niveles de humedad de las semillas. Estos materiales se seleccionaron considerando que son comúnmente empleados para superficies de transporte en una planta de procesamiento agroindustrial. Para realizar las pruebas se diseñó un montaje con un sistema de acoplamiento de superficie intercambiable para utilizar con un analizador de textura universal (TA. XT Plus, Stable Micro System), empleando la celda de carga de 50 kg. El texturómetro permitió, en el modo de prueba de tensión y con la ayuda de una polea, ejercer una fuerza horizontal sobre una caja sin fondo de poco peso que contiene y permite el desplazamiento desde el reposo de una muestra de semillas a una velocidad constante de 10 mm/s. Las semillas, previamente pesadas, fueron depositadas en la caja de madera con unas dimensiones de 90x90x90 mm. La caja con las semillas se colocó sobre la superficie de prueba y se levantó 3 mm para permitir que solo las semillas tengan contacto con la superficie, luego se ejerció una fuerza paralela a la superficie horizontal. La fuerza para desplazar la caja con las semillas sobre la superficie fue registrada directamente por el texturómetro. La fricción entre la polea y el delgado cable conectado al texturómetro fue considerada despreciable e igual para todas las superficies (Amin *et al.*, 2004).

Para estas pruebas se utilizaron muestras de 548 g de semilla. La caja vacía pesó 202 g. Se realizaron 10 repeticiones por cada superficie y nivel de humedad de las semillas.

Ángulo de reposo. Cuando las semillas son descargadas sobre una superficie horizontal plana, el material forma un montículo similar a un cono invertido. El ángulo formado por la horizontal y el talud es definido como el ángulo de reposo y está influenciado por el tamaño, forma volumen, densidad, superficie de la semilla, contenido de humedad y orientación de las partículas. Para esta prueba fue necesario realizar un montaje con un acople especial para el texturómetro, lo cual garantizó que el equipo en modo de prueba de tensión levantara el tubo contenedor de la semillas a velocidad constante.

Para determinar el ángulo de reposo, se utilizó un tubo de plástico de 76,2 mm de diámetro interno y 200 mm de longitud, el cual fue acoplado al texturómetro de tal manera que descansara perpendicularmente en una superficie horizontal. En esta posición el tubo fue

llenado con la muestra de semillas hasta una altura de 150 mm. Luego, accionando el texturómetro, se levantó el tubo a una velocidad constante de 10 mm/s, hasta lograr que todas las semillas fluyeran del tubo formando un montículo sobre la superficie horizontal. Se determinó la altura y el diámetro del montículo. El ángulo de reposo fue medido utilizando la ecuación (7) (Jha, 1999).

$$\theta = \text{Tan}^{-1} \left(2 \cdot \frac{H}{D} \right) \quad (7)$$

Donde:

θ = ángulo de reposo, °.

H = altura del montículo, mm

D = diámetro de la base del montículo, mm.

Para estos ensayos, el tamaño de muestra fue el número de semillas que ocuparon el 75% del volumen del tubo. Se realizaron 10 repeticiones para cada nivel de humedad.

Análisis estadístico. Las propiedades físicas fueron analizadas con un diseño completamente aleatorizado. El área proyectada, se hizo bajo un arreglo factorial 4x3 (factor: humedad, nivel: plano de la semilla) y el coeficiente de fricción se hizo bajo un arreglo factorial de 7 x 4 (factor: superficies y nivel: humedad). Los resultados fueron analizados a partir del análisis de varianza. La prueba F fue utilizada para determinar el efecto significativo de cada tratamiento (contenido de humedad), para identificar diferencias significativas entre las medias se utilizó la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 95% ($\alpha = 0,05$). El análisis estadístico fue realizado con el paquete SAS versión 8.0. Para determinar la relación entre la humedad y las propiedades físicas se efectuaron análisis de

regresión lineal y no lineal de los valores promedios de cada variable evaluada.

RESULTADOS

Dimensiones y tamaño. Las dimensiones ortogonales longitud (L), ancho (W), espesor (T) de la semilla de vitabosa evaluadas para cada contenido de humedad, con calibrador digital y por análisis de imagen, se muestran en la Tabla 1. Los valores son expresados como media \pm desviación estándar (n= 80).

Las dimensiones longitud, ancho y espesor de las semillas se incrementaron significativamente cuando se incrementó la humedad. Similares resultados fueron obtenidos en otras semillas, Altuntas y Yildiz (2007) en haba, Dursun y Dursun (2005) en alcaparra, Bart-Plange y Baryeh (2003) en cacao, Abalone *et al.* (2004) en amaranto, Garnayak *et al.* (2008) en jatropha, Amin *et al.* (2004) en lenteja y Karababa (2006) en cilantro; quienes manifiestan que un incremento de la humedad de la semilla genera un estiramiento de los tejidos proporcionalmente en sus tres planos longitudinales sin cambiar su forma. Contrariamente a lo hallado en vitabosa, los investigadores Coskuner y karababa (2007) encontraron que la longitud del fruto de cilantro (*Coriandrum sativum*) disminuye cuando la humedad se incrementa de 7,1 a 16,05%. Según los autores esto se debe a un cambio de forma de la semilla volviéndose globular por el estiramiento de los bordes longitudinales cuando se incrementan los contenidos de humedad. Mientras que Baumler *et al.* (2006) en semillas de girasol, no encontraron cambios de la longitud, ancho y espesor cuando la humedad se incrementa en un rango de 3,7 a 15,6%.

Tabla 1. Dimensiones ortogonales (mm) de la semilla de vitabosa evaluadas con calibrador digital y con análisis de imagen.

Humedad % b.h.	Longitud (L)		Ancho (W)		Espesor (T)	
	Calibrador	Imagen	Calibrador	Imagen	Calibrador	Imagen
10	16,29 \pm 0,68 a	16,31 \pm 0,64	10,68 \pm 0,27 a	10,68 \pm 0,27	6,94 \pm 0,28 a*	7,08 \pm 0,26*
14	16,52 \pm 0,65 ab	16,52 \pm 0,68	10,82 \pm 0,24 b	10,82 \pm 0,26	6,98 \pm 0,3 b	7,1 \pm 0,25
18	16,76 \pm 0,68 b	16,75 \pm 0,71	11,02 \pm 0,28 c	11,09 \pm 0,28	7,18 \pm 0,32 c	7,13 \pm 0,26
22	17,21 \pm 0,61 c	17,35 \pm 0,64	11,28 \pm 0,25 d	11,44 \pm 0,32	7,41 \pm 0,32 c*	7,52 \pm 0,31*

Valores en la misma columna seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes de acuerdo con Tukey (P<0,05).

Valores en la misma fila para cada dimensión ortogonal marcados con * son significativamente diferentes de acuerdo con Tukey (P<0,05).

Según el análisis de varianza no se presentaron diferencias estadísticas en las dimensiones longitud y ancho de la vitabosa evaluadas con los dos métodos de medición; esto demuestra que la técnica de análisis de imagen es una herramienta para determinar las características geométricas de longitud y ancho de la semilla de vitabosa. Sin embargo, el espesor de las semillas con contenido de humedad del 10 y 22% presentó diferencias estadísticas entre los dos métodos empleados. Esto indica que el método de análisis de imagen para evaluar el espesor de la semilla perdió exactitud en esos contenidos de humedad y se podría atribuir a que en el plano transversal las imágenes de la semilla presentaron mayor variabilidad de tonalidades en la superficie (bordes oscuros, blancos y brillantes); lo cual distorsiona la segmentación de la imagen

afectando el recuento de píxeles y el cálculo de esa dimensión ortogonal.

Los cambios de las dimensiones ortogonales (mm) por efecto del contenido de humedad (M, % b.h.) se ajustaron a ecuaciones lineales, así: $L = 0,08 \cdot M + 15,49$; con un coeficiente de regresión de 0,97; $W = 0,05 \cdot M + 10,1$; con un coeficiente de regresión de 0,98 y $T = 0,04 \cdot M + 6,48$; con un coeficiente de regresión de 0,93.

Los diámetros medio aritmético (D_a) y medio geométrico (D_g) de las semillas, calculados con las ecuaciones (3) y (4), respectivamente, se incrementaron significativamente en el rango de 10% al 22% de humedad como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Diámetro medio aritmético (D_a) y diámetro medio geométrico (D_g) de la semilla de vitabosa en los diferentes niveles de humedad.

Humedad % b.h.	D_a (mm)	D_g (mm)
10	11,31 ± 0,32 a	10,65 ± 0,28 a
14	11,44 ± 0,32 b	10,76 ± 0,29 a
18	11,65 ± 0,31 c	10,98 ± 0,28 b
22	11,97 ± 0,29 d	11,28 ± 0,27 c

Valores en la misma columna seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes de acuerdo con Tukey ($P < 0,05$). Los valores son expresados como la media ± desviación estándar ($n = 80$).

Según Cetin (2007) un incremento de la humedad de las semillas genera un dilatamiento de las estructuras celulares aumentando su tamaño. Los diámetros medio aritmético (D_a) y medio geométrico (D_g) de la semilla de vitabosa se correlacionaron de manera lineal con el contenido de humedad (M), así: $D_a = 0,054 \cdot M + 10,71$; con un coeficiente de regresión de 0,96 y $D_g = 0,052 \cdot M + 10,07$; con un coeficiente de regresión de 0,96.

Esfericidad. La esfericidad de la semilla no cambió significativamente con el cambio de humedad como lo muestra la Tabla 3. Igual resultado hallaron Bart-Plange y Baryeh (2003) en semillas de cacao. En otras investigaciones realizadas por Abalone *et al.* (2004), Altuntas *et al.* (2005), Dursun y Dursun (2005), Selvi *et al.* (2006), Cetin (2007) Coskuner y Karababa (2007), se observan cambios leves de la esfericidad cuando se incrementa la humedad de las semillas.

Tabla 3. Esfericidad (Φ) de las semillas de vitabosa en los diferentes niveles de humedad.

Humedad % b.h.	Φ	Rango % b.h.
10	0,65 ± 0,02 a	0,63 - 0,69
14	0,65 ± 0,02 a	0,61 - 0,69
18	0,66 ± 0,02 a	0,62 - 0,70
22	0,66 ± 0,02 a	0,63 - 0,70

Valores en la misma columna seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes de acuerdo con Tukey ($P < 0,05$). Los valores son expresados como la media ± desviación estándar ($n = 80$).

Los resultados obtenidos indican que la forma de la semilla no cambia significativamente por efectos de la humedad, es decir la semilla sigue conservando sus proporciones ortogonales. Esta propiedad no fue correlacionada con el cambio en el contenido de humedad.

Área proyectada. El área proyectada (Ap), en los tres planos de la semilla se aumentó significativamente cuando el contenido de humedad fue del 22% b.h. como lo muestra la Tabla 4.

Similares resultados encontraron los investigadores Dursun y Dursun (2005) en semillas de alcaparra, y Cetin (2007) en semillas de frijol var. Barbutia, quienes

manifiestan que la humedad dilata las estructuras celulares de la semilla aumentando su tamaño, el área proyectada y el área superficial.

El mayor valor del Ap fue de 160,17 mm² para las semillas en el plano horizontal con un contenido de humedad del 22%, mientras que el menor valor fue de 59,96 mm² para las semillas con un contenido de humedad de 10% dispuestas en el plano longitudinal. Los valores de Ap en los diferentes planos están influenciados directamente por la forma de la semilla (elipsoide). El incremento de Ap por la humedad se debe a un dilatamiento volumétrico de la semilla ocasionado por cambios estructurales de la matriz de proteínas y almidones presentes en los tejidos.

Tabla 4. Área proyectada (mm²) de la semilla de vitabosa para diferentes niveles de humedad y orientación.

Humedad % b.h.	Orientación de la semilla		
	Horizontal	Transversal	Longitudinal
10	141,00 ± 8,23 a	95,90 ± 6,38 b	59,96 ± 4,62 c
14	144,02 ± 8,22 a	96,30 ± 6,24 b	60,33 ± 4,60 c
18	149,49 ± 8,74 d	97,31 ± 4,24 b	61,33 ± 4,15 c
22	160,17 ± 9,11 e	106,44 ± 6,78 f	64,19 ± 4,78 g

Valores en la misma columna seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes de acuerdo con Tukey (P<0,05). Los valores son expresados como la media ± desviación estándar (n= 80).

Los cambios de AP en función de la humedad (M) en los tres planos (Horizontal, Transversal y Longitudinal) se ajustaron, respectivamente, a ecuaciones lineales así: $H=1,57 \cdot M+123,4$; con un coeficiente de regresión de 0,93, $T=0,82 \cdot M+85,93$; con un coeficiente de regresión de 0,1 y $L=0,34 \cdot M+55,97$; con un coeficiente de regresión de 0,85.

Coefficiente de fricción. El coeficiente de fricción estático (μ_0) se incrementó significativamente con la humedad de las semillas, además, fue significativamente diferente entre las superficies estudiadas (Tabla 5); siendo en su orden de mayor a menor; caucho, PVC, lona, acero inoxidable, hierro galvanizado y aglomerado de madera.

Tabla 5. Coeficiente fricción estático (μ_0) de las semillas de vitabosa en diferentes superficies y contenidos de humedad.

Humedad % b.h.	Superficies					
	Caucho	PVC	Acero Inox	Lona	Galvanizado	Madera
10	0,86 ± 0,02 aw	0,87 ± 0,07 aw	0,3 ± 0,02 bw	0,33 ± 0,02 bw	0,24 ± 0,01 cw	0,16 ± 0,01 dw
14	0,83 ± 0,03 aw	0,88 ± 0,09 aw	0,35 ± 0,02 bx	0,34 ± 0,02 bcw	0,29 ± 0,01 cx	0,21 ± 0,01 dx
18	1,04 ± 0,05 ax	1,09 ± 0,06 ax	0,44 ± 0,05 by	0,41 ± 0,02 bcx	0,38 ± 0,01 cy	0,3 ± 0,04 dy
22	1,05 ± 0,05 ax	1,13 ± 0,04 bx	0,58 ± 0,02 dz	0,45 ± 0,02 cy	0,4 ± 0,01 ez	0,36 ± 0,01 ez

Valores seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes de acuerdo con Tukey (P<0,05), primera letra para la misma fila y segunda letra para la misma columna. Los valores son expresados como media ± desviación estándar (n= 10).

Estos resultados concuerdan con algunas investigaciones realizadas en otras semillas con diferentes superficies por Bart-Plange y Baryeh (2003), Amin *et al.* (2004), Dursun y Dursun (2005), Nimkar *et al.* (2005), Coskuner y Karababa, (2007), Gamayak *et al.* (2008); quienes expresan que el coeficiente de fricción estático es mayor en semillas con contenidos de humedad altos porque el agua presente en las semillas ejerce una fuerza de adhesión en la superficie de contacto. De acuerdo a los valores de μ_0 se puede seleccionar el material más adecuado para el sistema de transporte

de la semilla. En un sistema de transporte neumático o un sistema de transporte por gravedad, se utilizan materiales con coeficientes de fricción bajos y en un sistema por bandas transportadoras se utiliza coeficientes de fricción altos, en este último caso los materiales más adecuados serían caucho y PVC.

En la Tabla 6 se presentan las ecuaciones de regresión ajustadas para los valores experimentales de coeficiente de fricción estático en la semilla de vitabosa, en función del contenido de humedad.

Tabla 6. Ecuaciones para expresar el comportamiento del coeficiente de fricción estático de la semilla de vitabosa en función de la humedad (M).

Variable	Superficie	$\mu = a \cdot M + b$		R ²
		a	b	
Coeficiente de fricción estático (μ_0)	Caucho	0,02	0,63	0,75
	PVC	0,04	0,60	0,87
	Acero inoxidable	0,02	0,04	0,95
	Lona	0,01	0,21	0,94
	Galvanizado	0,01	0,10	0,95
	Madera	0,02	0,02	0,98

Angulo de reposo. El ángulo de reposo se aumentó con el incremento de humedad de la semilla como lo muestra la Tabla 7.

Se presentaron diferencias de θ en los contenidos de humedad mayores (18 y 22%) respecto a los menores (10 y 14%).

Tabla 7. Ángulo de reposo (θ) de la semilla de vitabosa con diferente contenido de humedad.

Humedad %	θ (°)	Rango
10	16,90 ± 0,57 a	15,64 – 17,22
14	17,37 ± 0,86 a	15,64 – 18,26
18	21,28 ± 1,80 b	18,26 – 24,23
22	22,09 ± 1,32 b	19,80 – 24,23

Valores en la misma columna seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes de acuerdo con Tukey ($P < 0,05$).

Los valores son expresados como la media ± desviación estándar (n= 10).

En investigaciones realizadas en otras semillas por Visvanathan *et al.* (1996), Bart-Plange y Baryeh (2003), Amin *et al.* (2004), Selvi *et al.* (2006), Coskuner y karababa (2007), Gamayak *et al.* (2008), hallaron el mismo efecto de la humedad sobre el ángulo de reposo aunque estos autores registran valores más altos. Se podría explicar que el menor valor de θ obtenido en las semillas de vitabosa se debe la superficie lisa de la testa,

lo cual representa menor fuerza de adhesión entre semillas y eso permite una mayor fluidez del grano. Un incremento de θ cuando aumenta la humedad se debe un ensanchamiento del área proyectada de la semilla, la cual puede intensificar la fricción interna de las semillas (Dursun y Dursun, 2005). Pradhan *et al.* (2008) manifiestan que un crecimiento de θ con la humedad es debido a la tensión superficial formada en

la capa superficial de las semillas originando agregados de semillas.

Los resultados indican que la semilla de vitabosa, en los intervalos de humedad evaluados, presenta un ángulo de reposo relativamente bajo, indicando esto que la semilla presentaría buena fluidez en tolvas utilizadas para llenar o vaciar granos y en los sistemas de transporte por gravedad. Según Barbosa *et al.* (2005), un ángulo de reposo cerca a 35° indica libre fluidez, 35° - 45° flujo algo cohesivo, 45° - 55° flujo cohesivo (pérdida de libre fluidez), y mayores de 55° el flujo es limitado. El modelo obtenido entre el ángulo de reposo y contenido de humedad de la semilla (M), se ajustó de forma lineal y se expresa con la ecuación; $\theta = 0,49M + 11,61$ con un coeficiente de regresión de 0,90.

CONCLUSIONES

El contenido de humedad de la semilla afectó significativamente las propiedades físicas de vitabosa. Propiedades como, tamaño, área proyectada, ángulo de reposo, coeficiente de fricción estático, se incrementaron con el contenido de humedad. La forma de la semilla (esfericidad) no fue afectada por el contenido de humedad. Las propiedades físicas estudiadas, excepto la esfericidad, se correlacionan directamente con el aumento del contenido de humedad mediante modelos lineales. El contenido de humedad afecta de forma diferente las propiedades físicas de las semillas, los valores y modelos encontrados pueden ser utilizados para el diseño de equipos de procesamiento postcosecha como también para el control de calidad de la semilla. Otros factores como la orientación de la semilla afectan algunas propiedades físicas como el área proyectada. La técnica de análisis de imagen sirve para determinar las dimensiones ortogonales y el área proyectada de la semilla de vitabosa y podría ser utilizada para desarrollar procesos de clasificación y control de calidad de la semilla.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la DIME (Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín) el apoyo financiero para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Abalone, R., A. Cassinera, A. Gaston y M. Lara. 2004. Some physical properties of amaranth seeds. *Biosystems Engineering* 89(1): 109-117.

Altuntas, E., E. Ozgoz and F. Taser. 2005. Some physical properties of fenugreek (*Trigonella foenum-graceum* L.) seeds. *Journal of Food Engineering* 71: 37-43.

Altuntas, E. and M. Yildiz. 2007. Effect of moisture content on some physical and mechanical properties of faba bean (*Vicia faba* L.) grains. *Journal of Food Engineering* 78(1): 174-183.

American Society of Agricultural and Biological Engineering (ASABE). 2006. Standards engineering practices data. 53rd edition. Asabe, USA. 950 p.

Amin M.N., M.A. Hossain and K.C. Roy. 2004. Effects of moisture content on some physical properties of lentil seeds. *Journal of Food Engineering* 65(1): 83-87.

Andrejko, D. and J. Grochowicz. 2007. Effect of the moisture content on compression energy and strength characteristic of lupine briquettes. *Journal of Food Engineering* 83(1): 116-120.

Barbosa G., E. Ortega, P. Juliano and H. Yan. 2005. Food powders, physical properties, processing and functionality. pp. 55-88. *Food Engineering Series*. Klumer Academic, New York. 361 p.

Bart-Plange, A. and E. Baryeh. 2003. The physical properties of category B cocoa beans. *Journal of Food Engineering* 60(3): 219-227.

Baumler, E., A. Cuniberti, S. Nolasco and I. Riccobene. 2006. Moisture dependent physical and compression properties of safflower seed. *Journal of Food Engineering* 72(2): 134-140.

Caamal, J., J. Jiménez, A. Torres and A. Anaya. 2001. The use of allelopathic legume cover and mulch species for weed control in cropping systems. *Agronomy Journal* 93: 27-36.

Cetin, M. 2007. Physical properties of barbania bean (*Phaseolus vulgaris* L. cv. 'Barbania') seed. *Journal of Food Engineering* 80: 353-358.

Chaparro, S. 2009. Efecto de diferentes procesos físico-químicos en la reducción de factores antinutricionales de la semilla de vitabosa (*Mucuna deeringiana*). Tesis Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 67 p.

- Correa, P.C., O. Resende, R. Menezes, C. Jarén y S. Arazuri. 2008. Resistance of edible beans to compression. *Journal of Food Engineering* 86(2):172-177.
- Coskuner, Y. and E. Karababa. 2007. Physical properties of coriander seeds (*Coriandrum sativum* L.). *Journal of Food Engineering* 80(2): 408-416.
- Dursun, I. and E. Dursun. 2005. Some physical properties of caper seed. *Biosystems Engineering* 92(2): 237–245.
- Dursun, I., K.M. Tugrul and E. Dursun. 2007. Some physical properties of sugar beet seed. *Journal of Stored Products Research* 43(2): 149-155.
- Dutta, S.K., V.K. Nema and R.K. Bhardwaj. 1988. Physical properties of gram. *Journal of Agricultural Engineering Research* 39(4): 259-268.
- Dziki, D. 2007. The crushing of wheat kernels and its consequence on the grinding process. *Powder Technology* 185(2): 181-186.
- Echeverry, C. y H. Rodríguez. 1997. La vitabosa (*Mucuna deeringiana*), una alternativa para el mejoramiento de suelos y control de malezas. SENA. Rionegro. 37 p.
- Garnayak, D.K., R.C. Pradhan, S.N. Naik, y N. Bhatnagar. 2008. Moisture-dependent physical properties of jatropha seed (*Jatropha curcas* L.). *Industrial Crops and Products* 27(1): 123–129.
- Gupta, R.K. and S.K. Das, 1997. Physical properties of sunflower seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research* 66(1): 1-8.
- Gupta, R.K. and S.K. Das. 2000. Fracture resistance of sunflower and kernel to compressive loading. *Journal of Food Engineering* 46:1-8.
- Haddad, Y., F. Mabile, A. Mermet, J. Abecassis and J.C. Benet. 1999. Rheological properties of wheat endosperm with a view on grinding behaviour. *Powder Technology* 105(1-3):89–94.
- Henry, Z.A., B. Su and H. Zhang. 2000. Resistance of soya beans to compression. *Journal of Agricultural Engineering Research* 76(2): 175-181.
- Jha, S.N. 1999. Physical and hygroscopic properties makhana. *Journal of Agricultural Engineering Research* 72(2):145–150.
- Joshi, D.C., S.K. Das and R.K. Mukherji, 1993. Physical properties of pumpkin seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research* 54: 219-229.
- Karababa, E. 2006. Physical properties of popcorn kernels. *Journal of Food Engineering* 72(1):100–107.
- Kilickan, A. and M. Guner. 2008. Physical properties and mechanical behavior of olive fruits (*Olea europaea* L.) under compression loading. *Journal of Food Engineering* 87(2): 222–228.
- Koc, A.B. 2007. Determination of watermelon volume using ellipsoid approximation and image processing. *Postharvest Biology and Technology* 45(3): 366-371.
- Maasdorp, B., O. Jiri and E. Temba. 2004. Contrasting adoption, management, productivity and utilization of *Mucuna* in two different smallholder farming systems in Zimbabwe. pp. 154-163. In: Whitbread, A.M. and B.C. Pengelly (ed.). *Tropical legumes for sustainable farming systems in southern Africa and Australia*. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR). Australia, <http://www.aciar.gov.au/publication/PR115>. 171 p.; consulta: junio de 2010.
- Matenga, V.R., N.T. Ngongoni, M.Y. Titterton and B.V. Maasdorp. 2003. *Mucuna* seed as a feed ingredient for small ruminants and effect of ensiling on its nutritive value. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 1(2-3): 97-105.
- Mohsenin, N. 1986. Physical properties of food and agricultural materials, a teaching manual. Gordon and Breach Science Publishers, New York. 147 p.
- Molenda, M. and J. Horabik. 2005. Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice. Institute of Agrophysics PAS, Lublin, http://www.ipan.lublin.pl/mat_coe/mat_coe24.pdf. 112 p.; consulta: febrero 2008.
- Nimkar, P.M., D. Mandwe and R. Dudhe. 2005. Physical properties of moth gram. *Biosystems Engineering* 91(2):183-189.
- Ospina, J.E. 2001. Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Agrícola, Bogotá. 225 p.

- Pradhan, R.C., S.N. Naik, N. Bhatnagar and S.K. Swain. 2008. Moisture-dependent physical properties of karanja (*Pongamia pinnata*) Kernel. *Industrial Crops and Products* 28(2): 155-161.
- Sahoo, P.K. and A.P. Srivastava. 2002. Physical properties of okra seed. *Biosystems Engineering* 83(4): 441-448.
- Saiedirad, M.H, A. Tabatabaeefar, A. Borghei, M. Mirsalehi, F. Badii and M.G. Varnamkhasti. 2008. Effects of moisture content, seed size, loading rate and seed orientation on force and energy required for fracturing cumin seed (*Cuminum cyminum* Linn.) under quasi-static loading. *Journal of Food Engineering* 86: 565-572.
- Sathiyarayanan, L. and S. Arulmozhi. 2007. *Mucuna pruriens* Linn. a comprehensive review *Pharmacognosy Review* 1(1):1-6.
- Selvi, C.K., P. Yunus and E. Yesiloglu. 2006. Some physical properties of lin seed. *Biosystems Engineering* 95(4): 607-612.
- Stroshine, R. and D. Hamann. 1993. Physical properties of agricultural materials and food products. Department of Food Science, North California State University, LA, California. pp. 82-112.
- Trejo, L.W. 2005. Strategies to improve the use of limited nutrient resources in pig production in the tropics. In: *Journal of agriculture and rural development in the tropics and subtropics. Supplement 85*. In: Kassel University Press GmbH (ed.), <http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-1874.volltext.frei.pdf>.Germany. 113 p.; consulta: abril 2008.
- Villamizar, F., J. Galvis, D. Miranda, J. Ospina, M. Perea, P. Restrepo y V. Flórez. 2004. Inventario de las investigaciones realizadas en postcosecha de productos agrícolas en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Grupo de Postcosecha. UNAL. Bogotá. 317 p.
- Visvanathan, R.,P. Palanisamy, L. Gothandapani and V. Sreenarayanan. 1996. Physical properties of neem nut. *Journal of Agricultural Engineering Research* 63(1): 19-26.
- Vursavus, K. and F. Ozguven. 2004. Mechanical behaviour of apricot pit under compression loading. *Journal of Food Engineering* 65(2): 255-261.
- Vursavus, K. and F. Ozguven. 2005. Fracture resistance of pine nut to compressive loading. *Biosystems Engineering* 90(2): 185-191.