

Resistencia a ruptura y calidad fisiológica en semillas de maíz bajo compresión axial*

Fracture resistance and physiological quality of corn seeds under axial compression

Arturo Mancera Rico^{1§}, G. García de los Santos¹, H. A. Zavaleta Mancera², A. Carballo Carballo¹, J. A. Carrillo Salazar³, E. González Estrada⁴ y C. A. Villaseñor Perea⁵

¹Colegio de Postgraduados- Producción de Semillas, Montecillo, Estado de México. ²Botánica. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. ³Fisiología Vegetal. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. ⁴Estadística. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. ⁵Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo Estado de México. [§]Autor para correspondencia: arturomr@colpos.mx.

Resumen

La calidad física, fisiológica y sanitaria de la semilla se reduce debido al daño mecánico ocasionado por la mecanización del proceso de beneficio. Conocer los valores críticos de la fuerza y el desplazamiento a la compresión en función del tipo de endospermo, permitirá ayudar a disminuir el daño durante dicho proceso de limpieza, secado, almacenaje y manejo. En el presente estudio se evaluaron: la fuerza y el desplazamiento a compresión de ruptura, el daño visible y la calidad fisiológica de semillas de maíz de las variedades: Cacahuacintle (harinoso), HS-2 (semi-harinoso) y Palomero (duro) con humedad de 12 y 20%. El porcentaje de endospermo suave en Cacahuacintle, HS-2 y Palomero fue de 76.20, 33.43 y 15.27%, mientras que el de endospermo duro fue 5.25, 48.93 y 65.21%. El desplazamiento y la fuerza para Cacahuacintle, HS-2 y Palomero fue de 0.8264 mm y 274.71 N, 0.5499 mm y 309.07 N, y 0.5066 mm y 356.29 N; mientras que para 12 y 20% de humedad fue de 0.3279 mm y 312.52 N y 0.9520 mm y 313.81 N. Los índices de daño en semillas comprimidas fueron 276.67, 327.78 y 220.01 para Cacahuacintle, HS-2 y Palomero; mientras que para semillas sin comprimir (testigos) fue de 0.00. La germinación fue de 85.20 y 55% para semillas sin comprimir y para las sometidas a ruptura. El índice de daño

Abstract

The physical, physiological and sanitary qualities of corn seeds are reduced due to the mechanical damage caused by the mechanization of the production process. Knowing the strength and displacement critical values according to the type of endosperm will help decrease the damage during the cleaning, drying, storing and handling processes. This study assessed the strength and displacement from compression, the visible damage and the physiological quality of corn seeds from the following varieties: Cacahuacintle (floury), HS-2 (semi-floury) and Popcorn (hard) considering a humidity of 12 and 20%. The percentage of soft endosperm in Cacahuacintle, HS-2 and Popcorn was 76.20, 33.43 and 15.27%, respectively, while the percentage of hard endosperm was 5.25, 48.93 and 65.21%, respectively. The displacement and the strength for the Cacahuacintle variety was 0.8264 mm and 274.71 N, for the HS-2 variety was 0.5499 mm and 309.07 N and for the Popcorn variety was 0.5066 mm and 356.29 N, while for 12 and 20% humidity it was 0.3279 mm and 312.52 N and 0.9520 mm and 313.81 N, respectively. The damage indexes in compressed seeds were 276.67, 327.78 and 220.01 for Cacahuacintle, HS-2 and Popcorn,

estuvo afectado por la variedad y la compresión, pero no por la humedad. La germinación no estuvo afectada por el índice de daño, pero sí por la variedad, la humedad y la compresión.

Palabras clave: *Zea mays* L., cristalino, daño mecánico, endospermo, harinoso.

Introducción

La resistencia a daño mecánico en semillas es un factor que condiciona distintas etapas del proceso de producción como son la siembra, la cosecha, el secado, la limpieza, el beneficio y el almacenaje (Basu, 1994; Desai *et al.*, 1997). La semilla se ve afectada porque el daño mecánico reduce la calidad física, fisiológica y sanitaria. Por otro lado, el diseño de las máquinas agrícolas con frecuencia considera las características físicas de los productos que procesa para realizar un trabajo eficiente y efectivo en relación al consumo de energía (Mohsenin, 1986).

La resistencia de la semilla a la compresión juega un papel importante en las operaciones que realiza la industria, así como en el diseño de maquinaria (Mohsenin, 1986), pues es deseable que la maquinaria utilizada y la velocidad de proceso infrinjan el menor daño posible a la semilla. La resistencia a compresión es importante también en el mejoramiento genético para producir semilla que se ajuste a esa maquinaria y a esos procesos, entre otros factores de gran importancia. Durante su manejo y procesamiento, las semillas, además de estar sujetas a compresión, también están sujetas a impacto. De acuerdo a Mohsenin (1986), para causar un daño equivalente de magulladura en frutos de manzana, se requiere aproximadamente 1.5 veces más energía de impacto que de compresión, por lo que se considera que un ensayo de compresión en semillas de maíz podría reflejar de manera significativa la resistencia al impacto. Tipler y Mosca (2005) señalan que es posible determinar la fuerza promedio ejercida durante una colisión por lo que se considera factible relacionar la fuerza y el desplazamiento en una prueba de compresión, con la fuerza y el desplazamiento en un ensayo de impacto mediante el uso de las ecuaciones adecuadas a estos fenómenos.

Los resultados obtenidos por algunos autores sugieren que la resistencia mecánica de las semillas depende de varios factores, entre los que se puede mencionar su contenido de humedad, su madurez y la variedad a la que estas pertenecen.

respectively, while for uncompressed seeds (control group) the damage indexes were 0.00. Germination was 85.20% for uncompressed seeds and 55% for those seeds subjected to fracture. The damage index was affected by the variety and the compression, but not by the humidity. Germination was not affected by the damage index, but it was affected by humidity and compression.

Keywords: *Zea mays* L., crystalline, endosperm, floury, mechanical damage.

Introduction

Resistance to mechanical damage in corn seeds is a factor that is present at different stages of the production process, such as the sowing, harvesting, drying, production and storage stages (Basu, 1994; Desai *et al.*, 1997). The seeds are affected because mechanical damage reduces the physical, physiological and sanitary qualities. On the other hand, the design of agricultural machines frequently takes into consideration the physical characteristics of the products that it processes in order to perform an efficient and effective job in relation to the consumption of energy (Mohsenin, 1986).

Seed resistance to compression plays an important role in the operations performed by the industry, as well as the machine design (Mohsenin, 1986), as it is deemed important for the machines used and the speed of the process to inflict as little damage as possible to the seed. Resistance to compression is also important in the genetic improvement to produce seeds that adjust to the machinery and to the processes, among other important factors. In addition to being subjected to compression during their handling and processing, the seeds are also subjected to impact. According to Mohsenin (1986), in order to cause equivalent bruise damage in apple fruit, approximately 1.5 more times the impact energy is needed than compression; it is therefore considered that a corn seed compression test could significantly reflect its resistance to impact. Tipler and Mosca (2005) indicate that it is possible to determine the average force exerted during one collision; it is therefore considered possible to relate the strength and the displacement from one compression test with the strength and the displacement from an impact test through the use of the appropriate equation.

Mesquita y Hanna (1993) encontraron una menor resistencia con bajos contenidos de humedad en semilla de soya. Bilanski (1966) citado por Mohsenin (1986) encontró que la energía necesaria para ocasionar fractura en semillas de maíz, trigo y soya se incrementó de manera proporcional al contenido de humedad. Al respecto, Mohsenin (1986) y Multon (1981) citado por Foutz *et al.* (1993) mencionan que el aumento en el contenido de agua “ligada” a la matriz de proteína, almidón y pentosas, ocasionó que las semillas fueran menos resistentes a la deformación, pero más resistentes al quebrado. Por otra parte, King y Riddolls (1959) citados por Mohsenin (1986) encontraron que conforme aumentó el contenido de humedad de la semilla de trigo durante la trilla, disminuyó el daño visible pero también el porcentaje de germinación, lo cual indica que la evaluación de daño mecánico no reflejó el daño fisiológico.

Por otro lado, Gaytán-Martínez *et al.* (2006) encontraron diferencias en la dureza de la semilla en 21 variedades de maíz, la cual se explicó mediante una función cuyos componentes fueron el índice de flotación y la densidad; esta última se pudo explicar en función del tamaño del grano de almidón, cristalinidad y porcentaje de endospermo.

No obstante, los estudios realizados sobre el daño mecánico a la semilla, aún falta conocer diversos aspectos que permitan tener una mejor comprensión de ese fenómeno, y con ello poder disminuir el daño mecánico y sus efectos sobre la calidad de la semilla.

El objetivo de esta investigación fue estudiar la respuesta de ruptura en semilla de maíz, mediante la fuerza y desplazamiento en un ensayo de compresión, en función de la textura de endospermo y contenido de humedad, y evaluar su efecto sobre la calidad fisiológica. Se desea probar la hipótesis que plantea que la fuerza a ruptura es superior en un fenotipo con mayor porcentaje de endospermo cristalino y con mayor contenido de humedad.

Materiales y métodos

El estudio se realizó de 2012 a 2013 en el laboratorio de materiales del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y en el laboratorio de Análisis de Semillas del Programa de Producción de Semillas, Colegio de Postgraduados.

The results obtained by some authors suggest that the mechanical resistance of the seeds depends on several factors, among which the humidity content, ripeness and the seed variety can be found. Mesquita and Hanna (1993) found a minimal resistance with lower humidity contents in soy beans. Bilanski (1966) cited by Mohsenin (1986) found that the necessary energy in order to cause a fracture in corn, wheat and soy seeds increases proportionally to the humidity content. In regards to this, Mohsenin (1986) and Multon (1981) cited by Foutz *et al.* (1993) mention that the increase in the water content “linked” to the protein, starch and pentose matrixes made the seeds less resilient to deformation, but more resistant to fracture. On the other hand, King and Riddolls (1959) cited by Mohsenin (1986) found that as the humidity content of the seed rose, the visible damage decreased but so did the percentage of germination, which indicates that the assessment of mechanical damage did not reflect any physiological damage.

On the other hand, Gaytán-Martínez *et al.* (2006) found differences between the seed hardness in 21 corn varieties. This was explained through a function, the components being the flotation index and the density. The density could be explained through the size of the starch grain, crystallinity and percentage of endosperm.

Notwithstanding the studies done on the mechanical damage of the seed, we still need to research several aspects that can help us better understand this phenomenon, and thus we could decrease the mechanical damage and its effect on the seed quality.

The aim of this investigation is to study the fracture response of the corn seed considering its strength and displacement in a compression test, according to the texture of the endosperm and the humidity content, and to evaluate the effects on the physiological quality. Our objective is to prove the hypothesis that states that the fracture strength is superior in a phenotype with a greater percentage of crystalline endosperm and with a higher humidity content.

Materials and methods

The study was done from 2012 to 2013 in the materials laboratory of the Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, at the Universidad Autónoma Chapingo

Para evaluar qué tipo de endospermo requiere mayor fuerza, desplazamiento (por deformación) y mayor energía al punto de ruptura por compresión, se utilizaron semillas de maíz provenientes de tres variedades con diferente tipo de endospermo: a) harinoso (Cacahuacintle); b) semi-harinoso (híbrido HS-2); y c) cristalino (Palomero). La semilla utilizada del híbrido HS-2 (semi-harinoso, conocido también como semi-dentado) y de la variedad Cacahuacintle (harinoso) se produjo en 2011 en Texcoco, Estado de México; mientras que la semilla de maíz palomero (cristalino) se adquirió en el mismo año en una casa comercial, la cual al momento de su adquisición presentó una germinación de 97%, muy similar a la germinación inicial del híbrido HS-2 (97%) y de la variedad Cacahuacintle (95%); previo al estudio, la humedad de Cacahuacintle, HS-2 y Palomero fue de 7.66, 9 y 8.87% en base húmeda (b. h.). Se determinó el porcentaje de endospermo harinoso y cristalino para cada variedad, así como el porcentaje de pedicelo, pericarpio y embrión, con la finalidad de relacionar la fuerza, desplazamiento y energía en el punto de ruptura por compresión con el tipo de endospermo.

Para conocer el efecto de la humedad sobre la fuerza, el desplazamiento (por deformación) y la energía al punto de ruptura por compresión, se evaluaron dos niveles de humedad de la semilla: 12 y 20% \pm 0.1 en base húmeda (b. h.). Para lograr estos porcentajes de humedad, las semillas se humedecieron con agua destilada, de 2 a 2.5% por encima de la humedad deseada, y posteriormente fueron secadas a temperatura ambiente hasta obtener la humedad de evaluación (12 y 20%); las semillas se mantuvieron (no más de 4 h) en frascos herméticos hasta el momento de la compresión. Posterior a la compresión, las semillas fueron deshidratadas bajo condiciones ambientales por 24 h, y en estufa a 30 °C de 20 a 24 h más; finalmente, las semillas fueron expuestas a temperatura ambiente hasta alcanzar una humedad de 9 a 10%.

Se evaluó la fuerza, el desplazamiento (por deformación) y la energía al punto de ruptura por compresión en las semillas con los factores de estudio mencionados (variedad y humedad), aplicando la compresión según la metodología recomendada por la ASAE (2005) como se menciona en el párrafo siguiente. Posteriormente, se comparó la energía de compresión necesaria para la ruptura en el Híbrido HS-2 obtenida en este estudio con la energía de impacto para el mismo caso reportada por Mancera *et al.* (2007), con la finalidad de estimar el grado de similitud entre ambos tipos de energía.

(UACH) and in the laboratory of Análisis de Semillas of the Programa de Producción de Semillas, Colegio de Postgraduados.

In order to evaluate which type of endosperm requires greater strength, displacement (by deformation) and more energy at the fracture point by compression, corn seeds from three varieties were used with different types of endosperm: a) Cacahuacintle (floury); b) HS-2 hybrid (semi-floury); and, c) Popcorn (crystalline). The seeds used from the HS-2 hybrid (semi-floury, also known as semi-dented) and from the Cacahuacintle variety (floury) were produced in 2011 in Texcoco, State of Mexico. The Popcorn seed (crystalline) was acquired in the same year in a commercial house, which at the moment of its acquisition presented a germination of 97%, similar to the initial germination of the HS-2 hybrid (97%) and of the Cacahuacintle variety (95%); prior to the study, the humidity of the Cacahuacintle, HS-2 and Popcorn was 7.66 and 8.87% in a humid base (h.b.). The percentage of floury and crystalline endosperm for each variety was determined, as well as the percentage of pedicel, pericarp and embryo, with the objective of relating the strength, displacement and energy at the fracture point by compression with the type of endosperm.

In order to find out the effect of humidity on strength, displacement (by deformation) and energy at the fracture point by compression, two levels of seed humidity were evaluated: 12 and 20% \pm 0.1 in humid base (h.b.). To achieve these humidity percentages, the seeds were moistened with distilled water from 2 to 2.5% above the humidity desired and were then dried at room temperature until obtaining the moisture assessment (12 and 20%). The seeds were kept (no more than 4 h) in airtight containers until the moment of compression. After compression, the seeds were dehydrated under environmental conditions for 24 h, and placed in a stove at 30 °C for 20 to 24 h. Finally, the seeds were exposed to room temperatures until reaching a humidity of 9 to 10%.

The strength, displacement (by deformation) and energy were assessed at the fracture point by compression in the seeds using the study factors previously mentioned (variety and humidity), applying compression according to the methodology recommended by the ASAE (2005) as indicated in the following paragraph. Subsequently, the compression energy necessary for the fracture of the HS-2

Para conocer el efecto de la ruptura ocasionada por la compresión de las semillas sobre la calidad fisiológica, se evaluaron dos niveles de compresión: testigo (sin compresión) y ruptura. Para aplicar la compresión a ruptura, cada semilla fue colocada en posición de descanso, con el embrión hacia arriba entre superficies planas y pulidas (ASAE, 2005), a una velocidad de desplazamiento de la cruceta de 1 mm/min, en una máquina de ensayo universal Instron® modelo 3385H (Instron, Corp., Norwood, MA, USA) con una célula de carga de 250 kN (kilonewton). El desplazamiento de la cruceta se detuvo en cuanto se observó el cambio de pendiente característico de la ruptura en la curva “fuerza-desplazamiento” o cuando se detectó ruido ocasionado por la ruptura de la semilla; en este último caso se utilizó un micrófono en contacto con el soporte de la semilla (plato inferior) conectado a la computadora con una amplificación de sonido de 36 dB (decibeles) y supresión digital de ruidos y eco acústico; el volumen de las bocinas se ajustó a un nivel suficientemente audible con auxilio del gráfico de nivel de sonido para evitar descartar sonidos de baja intensidad.

Diseño del experimento y análisis estadístico

Para describir la textura de la semilla para cada variedad a través de los componentes de la semilla, se utilizó un diseño experimental completamente al azar DECA con un factor de estudio: la variedad; luego se efectuó un análisis de varianza y una comparación de medias (Tukey, 0.05) entre variedades para cada componente de la semilla. Para conocer el efecto de la humedad y el tipo de endospermo sobre la fuerza, desplazamiento (por deformación) y energía al punto de ruptura por compresión y sobre el índice de daño, se utilizó un DECA con dos factores de estudio: la variedad (Cacahuacintle, HS-2 y Palomero) y contenido de humedad en la semilla (12 y 20% ± 0.1 b. h.); luego se efectuó para cada caso un análisis de varianza y una comparación de medias (Tukey, 0.05) para efectos principales.

Mientras que para conocer el efecto de la humedad, el tipo de endospermo y el nivel de compresión sobre la calidad fisiológica, se utilizó un DECA con tres factores de estudio: la variedad (Cacahuacintle, HS-2 y Palomero), contenido de humedad en la semilla (12 y 20% ± 0.1 b. h.) y nivel de compresión (testigo y ruptura); luego se efectuó para cada caso un análisis de varianza y una comparación de medias (Tukey, 0.05) para efectos principales. Los análisis de varianza y las pruebas de medias se realizaron con el auxilio de software SAS versión 8 (1999).

hybrid obtained in this study was compared to the impact energy for the same case reported by Mancera *et al.* (2007) with the objective of estimating the degree of similarity between both types of energy.

In order to understand the effect of the fracture caused by the compression of seeds on the physiological quality, two compression levels were assessed: control (without compression) and fracture. To apply the compression to fracture, each seed was placed in a resting position with the embryo facing upwards between flat and polished surfaces (ASAE, 2005) at a displacement crosshead speed of 1 mm/min in an Instron® universal testing machine model 3385H (Instron, Corp., Norwood, MA, USA) with a cell charge of 250 kN (kilonewton). The displacement of the crosshead stopped when a change in slope was observed characteristic of a fracture in the “strength-displacement” curve or when noise caused by the rupture of the seed was detected. For the latter, a microphone placed close to the support of the seed (bottom plate) and connected to a computer with a sound-amplifier of 36 Db (decibels) was used, along with digital noise cancelling and acoustic echo. The volume of the speakers was adjusted to a sufficiently audible level, with the help of the sound level graphic in order to prevent discarding low intensity sounds.

Experiment design and statistical analysis

In order to describe the seed texture for each variety by using the seed components, a completely random DECA experimental design was used with one study factor: seed variety. Afterwards, an analysis of variance and a comparison of averages (Tukey, 0.05) between varieties for each seed component were carried out. To know the effect of humidity and the type of endosperm on the strength, displacement (by deformation) and energy to the fracture point by compression and on the damage index, a DECA with two study factors was used: the variety (Cacahuacintle, HS-2 and Popcorn) and humidity content in the seed (12 and 20% ± 0.1 h.b.). Then, an analysis of variance and a comparison of averages were performed for each of them (Tukey, 0.05).

In order to know the effect of humidity, the type of endosperm and the compression level on the physiological quality, a DECA was used with three study factors: variety (Cacahuacintle, HS-2 and Popcorn), humidity content in the seed (12 and 20% ± 0.1 h.b.) and compression level

Variables evaluadas

Componentes de la semilla. El peso de la biomasa seca de los componentes de la semilla se determinó utilizando el método de disección descrito por Salinas y Vázquez (2006): se pesaron tres repeticiones de 25 semillas, y se remojaron en agua a 70-80 °C por 15 min; posteriormente se separaron el pedicelo, pericarpio, embrión y endospermo con la ayuda de un bisturí, a los que se les determinó su peso de biomasa seca mediante la metodología descrita por la ASABE (2006), la cual consiste en secar las muestras en la estufa a 103 °C por 24 h. Las muestras utilizadas para esta evaluación fueron independientes a las utilizadas para las demás evaluaciones, ya que esta evaluación fue destructiva.

Fuerza y desplazamiento a ruptura por compresión. Para cada tratamiento se analizaron los datos correspondientes a fuerza (F) y desplazamiento (D) recabados con el Software BlueHill 2.0® (Instron®, 2006). La energía (E) se determinó mediante el cálculo del área aproximada bajo la curva ($E=D \times F/2$). La metodología seguida para efectuar la compresión se mencionó anteriormente. Cada tratamiento se evaluó en muestras de 30 semillas con seis repeticiones.

Índice de daño. Con la ayuda de un microscopio estereoscópico, se realizó la caracterización morfológica de daños externos en muestras de 45 semillas, en tres repeticiones de quince semillas; se contó el número de semillas: 1) sin fractura (SF); 2) con desprendimiento de tejido, es decir, fractura severa (FS); 3) con fractura en la base (B), que corresponde a la zona del primer cuarto proximal de la semilla con respecto al hilo; 4) en la región media de la semilla (M); 5) en la región del embrión y escutelo (EE); y 6) en la corona (C), que corresponde al ¼ distal de la semilla (Figura 1). Posteriormente, se categorizó el tipo y ubicación del daño asignándole un grado de severidad a cada categoría: SF=0, FC=1, FB y FM=2 y FS y FE=3; se considera que los valores más elevados reflejarán un daño más severo y en consecuencia una menor calidad física y fisiológica de la semilla. Las submuestras utilizadas para esta evaluación fueron provenientes de las muestras donde se determinó la fuerza y desplazamiento a ruptura y se reintegraron a las muestras donde se determinó la calidad fisiológica, ya que esta evaluación no fue destructiva.

Calidad fisiológica. La calidad fisiológica se evaluó mediante la prueba de germinación estándar, velocidad de emergencia de radícula y el peso de la biomasa seca de los componentes de la plántula. La prueba de germinación se llevó a cabo con la metodología “entre papel”, que consiste en

(control and fracture). Afterwards, an analysis of variance and comparison of averages were done (Tukey, 0.05) for the main effects. The analysis of variance and the comparison of averages were done with the help of the SAS version 8 software (1999).

Evaluated variables

Seed components. The dry biomass weight of the seed components was determined using the dissection method described by Salinas and Vázquez (2006). Three repetitions of 25 seeds were weighed and then moistened with water at 70-80 °C for 15 min. Subsequently, the pedicel, pericarp, embryo and endosperm were separated with the help of a scalpel, determining their dry biomass weight through the methodology described by the ASABE (2006), which consists in drying the samples on the stove at 103 °C for 24 h. The samples used for this evaluation were independent to the ones used for the rest of the evaluations, as this evaluation was destructive.

Strength and displacement by compression. For each treatment, the information was analyzed corresponding to the strength (S) and displacement (D) collected by the BlueHill 2.0® software (Instron®, 2006). The energy (E) was determined by the calculation of the approximate area under the curve ($E=D \times F/2$). The methodology followed in order to carry out the compression is mentioned above. Each treatment was evaluated in samples of 30 seeds with six repetitions.

Damage index. With the help of a stereoscopic microscope, a morphological characterization of external damage was done in samples of 45 seeds, in three repetitions of fifteen seeds. The seeds were numbered as follows: 1) without fracture (WF); 2) with tissue detachment, severe fracture (SF); 3) with base fracture (B), which corresponds to the zone of the first proximal quarter of the seed regarding the thread; 4) in the medium region of the seed (M); 5) in the region of the embryo and scutellum (ES); and, 6) in the crown (C), which corresponds to ¼ distal seed (Figure 1). Subsequently, the type and location of the damage were categorized, assigning a severity level to each category: WF=0, FC=1, FB and FM=2 and SF and FE=3. The most elevated values will reflect more severe damage and therefore lower physical and physiological seed qualities. The sub-samples used for this evaluation came from the samples where the strength and displacement by fracture were determined and reintegrated to the samples where the physiological quality was determined, since this evaluation was not destructive.

colocar las semillas en toallas de papel “sanitas” enrolladas e hidratadas dentro de bolsas de polietileno (25 x 35 cm) en una cámara de germinación a 25 ± 5 °C; después de 7 días se calculó el (%) de número de plántulas normales (ISTA, 2005). La velocidad de emergencia y germinación estándar se evaluaron con una muestra de 90 semillas las cuales se agruparon en 3 repeticiones de 30 semillas por tratamiento.

Tanto la evaluación de la velocidad de emergencia de radícula como la prueba de germinación estándar, se realizaron sobre las mismas unidades experimentales. Se contó el número de semillas con emisión de radícula diariamente durante siete días y el índice de velocidad de emisión radicular se calculó con la ecuación propuesta por Maguire (1962):

$$VG = X_1/Y_1 + (X_2 - X_1)/Y_2 + \dots + (X_n - X_{n-1})/Y_n$$

Donde: VG= velocidad de emisión de radícula; X_1 , X_2 y X_n = porcentaje de semillas con emisión de radícula, diariamente por siete días; Y_1 , Y_2 y Y_n = número de días desde la siembra [adimensional].

El peso de la biomasa seca de los componentes de la plántula: remanentes de las semilla, parte aérea y raíz, se determinó a los nueve días mediante la metodología descrita por la ASABE (2006).

Resultados y discusión

Componentes de la semilla

Hubo significancia estadística en los porcentajes de pedicelo ($p \leq 0.05$), pericarpio ($p \leq 0.01$), embrión ($p \leq 0.01$) y endospermo suave ($p \leq 0.01$), duro ($p \leq 0.01$) y total ($p \leq 0.01$) entre variedades (Cuadro 1). La semilla de la variedad Cacahuacintle mostró el porcentaje más alto de biomasa seca de: embrión (11.5%), endospermo suave (76.2%) y pedicelo (2.5%), aunque el porcentaje de esta última variable no fue estadísticamente diferente al de la biomasa del pedicelo de HS-2 (2%). En contraparte, la semilla de Palomero tuvo los porcentajes más altos de la biomasa seca de pericarpio (9.3%) y endospermo duro (65.2%); mientras que la semilla de HS-2 presentó el mayor porcentaje de biomasa seca de endospermo total (82.3%, Figura 2). De acuerdo con Serna *et al.* (2008), las semillas más pequeñas tienen una proporción mayor de pericarpio que las grandes, lo que explica la diferencia de pericarpio entre Palomero (semilla de menor tamaño), HS-2 y Cacahuacintle (semilla de mayor tamaño).

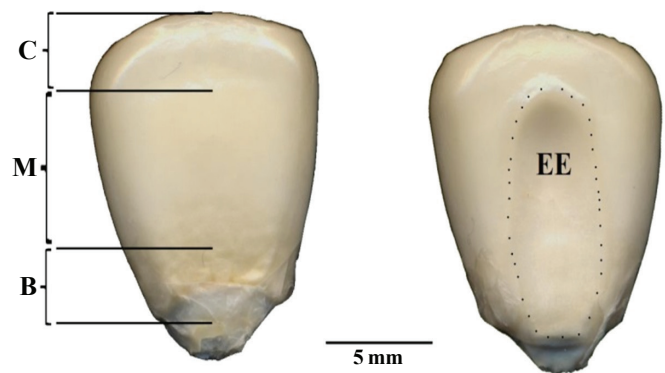


Figura 1. Zonas de daño en la semilla: fractura en la base B, comprendida por el primer cuarto de la longitud; en la parte media M, comprendida entre el 25 y 75% de la longitud; en la corona C, correspondiente al cuarto distal de la longitud de la semilla; y en la región sobre el embrión y escutelo EE, en la cara ventral.

Figure 1. Damage zones in the seed: fracture in base B, comprised by the first quarter of the longitude; in the medium part M, comprised between 25 and 75% of the longitude; in crown C, corresponding to the distal quarter of the seed's longitude; and in the region over the embryo and scutellum ES, in the ventral side.

Physiological quality. The physiological quality was evaluated by the standard germination test, emergence speed of the radicle and the dry biomass weight of the seedling components. The germination test was done using the “between paper” methodology, which consists in wrapping the seeds in paper towels and hydrating them inside polyethylene bags (25 x 35 cm) in a germination chamber at 25 ± 5 °C; after 7 days the (%) of the number of normal seedlings was calculated (ISTA, 2005). The standard emergence speed and germination were evaluated with a sample of 90 seeds which were grouped into 3 repetitions of 30 seeds per treatment.

Both the evaluation of the emergence speed of the seedling and the standard germination test were done on the same experimental units. The number of seeds with root emergence was counted on a daily basis during seven days and the root emergence speed index was calculated with the equation proposed by Maguire (1962):

$$VG = X_1/Y_1 + (X_2 - X_1)/Y_2 + \dots + (X_n - X_{n-1})/Y_n$$

Where: VG= root emergence speed; X_1 , X_2 y X_n = percentage of seeds with root emergence, daily for seven days; Y_1 , Y_2 and Y_n = number of days since the sowing of seeds [a dimensional].

Cuadro 1. Cuadrados medios de los componentes de la semilla en las variedades Cacahuacintle, HS-2 y Palomero.
Table 1. Mean squares of the seed components in the Cacahuacintle, HS-2 and Popcorn varieties.

Fuente de variación	Grados de libertad	Pedicelo (%)	Pericarpio (%)	Embrión (%)	Endospermo suave (%)	Endospermo duro (%)	Endospermo Total (%)
Variedad	2	0.4728 *	21.7414 **	7.5917 **	2936.03 **	2883.49 **	2.6808 **
Error	6	0.0553	0.0565	0.1067	3.84	3.79	0.0217
CV (%)		10.91	3.82	3.20	4.70	4.89	0.18
R ²		0.74	0.99	0.96	0.99	0.99	0.98

* y ** significativo con $\alpha=0.05$ y 0.01 , respectivamente.

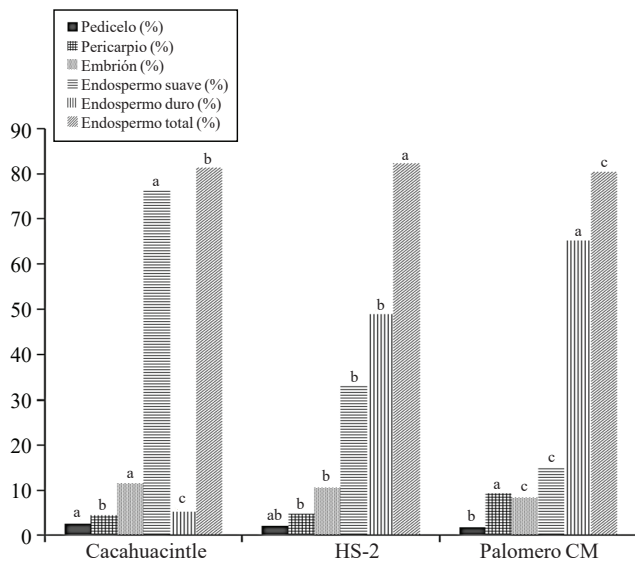


Figura 2. Componentes de la semilla en las variedades Cacahuacintle, HS-2 y Palomero. La diferencia de cada componente entre variedades se denota por letras minúsculas (Tukey, 0.05).

Figure 2. Seed components of the Cacahuacintle, HS-2 and Popcorn varieties. The difference of each component between varieties is indicated by minuscule letters (Tukey, 0.05).

Fuerza y desplazamiento en el punto de ruptura por compresión de las semillas

El factor variedad tuvo efecto significativo sobre el desplazamiento, la fuerza y la energía en el punto de ruptura de la semilla ($p \leq 0.01$); mientras que el contenido de humedad de la semilla tuvo efecto significativo ($p \leq 0.01$) sobre el desplazamiento y la energía de ruptura de la semilla (Cuadro 2). La variedad harinosa (Cacahuacintle) obtuvo el mayor desplazamiento y requirió la menor fuerza en ruptura, mientras que el cristalino (Palomero) obtuvo el menor desplazamiento y requirió la mayor fuerza, no difiriendo estadísticamente del semi-harinoso (HS-2) en cuanto a desplazamiento. La interacción entre los factores variedad y humedad fue

The dry biomass weight of the seedling components (seed remnants, aerial part and root) was determined on day nine through the methodology described by the ASABE (2006).

Results and discussion

Seed components

There was a statistical significance in the percentages of pedicel ($p \leq 0.05$), pericarp ($p \leq 0.01$), embryo ($p \leq 0.01$), soft endosperm ($p \leq 0.01$), hard endosperm ($p \leq 0.01$) and total ($p \leq 0.01$) between the seed varieties (Table 1). The seed from the Cacahuacintle variety showed the highest percentage of dry biomass by: embryo (11.5%), soft endosperm (76.2%) and pedicel (2.5%), even though the percentage of the pedicel was not statistically different than that of the HS-2 pedicel biomass (2%). Conversely, the Popcorn seed had the highest percentages of dry pericarp biomass (9.3%) and hard endosperm (65.2%), while the HS-2 seed presented the highest dry biomass percentage of total endosperm (82.3%, Figure 2). According to Sema *et al.* (2008), the smaller seeds had a higher proportion of pericarp than the bigger seeds, which explains the pericarp difference between Popcorn (smaller seed), HS-2 and Cacahuacintle (bigger seed).

Strength and displacement of the seeds in the fracture point by compression

The variety factor had a significant effect on the displacement, strength and energy in the fracture point of the seed ($p \leq 0.01$), while the humidity content had a significant effect ($p \leq 0.01$) on the displacement and the fracture energy of the seed (Table 2). The floury variety (Cacahuacintle) obtained the lowest displacement and required the most strength, not differing statistically from the semi-floury (HS-2) in regards to displacement. The interaction between the variety and

significativa para el desplazamiento, la fuerza y la energía, lo que implica que la tendencia de estos valores en función de la humedad fue específica para cada variedad (Cuadro 2).

humidity factors was significant for displacement, strength and energy, which indicates that the tendency of these values in regards to humidity was specific to each variety (Table 2).

Cuadro 2. Cuadrados medios y efectos principales y combinados de los factores de estudio variedad y humedad, sobre el desplazamiento, la fuerza y la energía a ruptura.

Table 2. Mean squares and main and combined effects of the variety and humidity study factors on displacement, strength and energy at fracture.

Fuente de variación	GL	Desplazamiento (mm)		Fuerza (N)		Energía (mJ)	
Variedad (V)	2	0.1835	**	10 073.05	**	1 928.64	**
Humedad (H)	1	1.8452	**	7.91	NS	45 304.40	**
V*H	2	0.0467	**	3 654.35	**	1 457.21	**
Error	13	0.0022		509.63		208.06	
CV		7.55		7.21		14.92	
R ²		0.99		0.81		0.95	
Efectos principales							
Variedad							
Cacahuacintle		0.8264	a	274.71	c	117.61	a
HS-2		0.5499	b	309.07	b	86.48	b
Palomero		0.5066	b	356.29	a	87.55	b
DMS 0.05		0.07		33.59		21.46	
Humedad (%)							
12		0.3279	b	312.52	a	50.33	b
20		0.9520	a	313.81	a	148.12	a
DMS 0.05		0.0467		22.41		14.32	

**significativo con $\alpha=0.01$; NS, no significativo. Medias con letra distinta en columnas difieren estadísticamente.

Cuadro 2. Cuadrados medios y efectos principales y combinados de los factores de estudio variedades y humedad, sobre el desplazamiento, la energía y la fuerza a ruptura (Continuación).

Table 2. Mean squares and main and combined effects of the variety and humidity study factors on displacement, strength and energy at fracture (Continuation).

Fuente de variación	GL	Desplazamiento (mm)		Fuerza (N)		Energía (mJ)	
Variedad x humedad	5	0.4611	**	5 492.54	**	10 415.22	**
Error	13	0.0022		509.63		208.06	
CV		7.55		7.21		14.92	
R ²		0.99		0.81		0.95	
Efectos combinados de Variedad y humedad							
Cacahuacintle 12%		0.4096	d	256.29	c	52.45	c
Cacahuacintle 20%		1.2432	a	293.14	bc	182.78	a
HS-2 12%		0.2889	d	300.96	bc	43.48	c
HS-2 20 %		0.8978	b	319.89	b	143.82	b
Palomero 12%		0.2981	d	384.17	a	57.34	c
Palomero 20%		0.7150	c	328.40	ab	117.77	b
DMS 0.05		0.1247		59.84		38.23	

**significativo con $\alpha=0.01$; NS, no significativo. Medias con letra distinta en columnas difieren estadísticamente.

Por otro lado, el desplazamiento promedio fue mayor a 20% de humedad que a 12%, aunque la fuerza no difirió significativamente (Cuadro 2); no obstante, un cálculo de energía ejercida durante una colisión por impacto puede

On the other hand, the average displacement was higher for 20% humidity than for 12% humidity, even though the strength did not significantly differ (Table 2); however, the calculation of the force exerted during a collision by

resultar en diferencias significativas al ser una combinación lineal de la fuerza y el desplazamiento obtenidas en este ensayo de compresión; resultando en una mayor energía de impacto para ocasionar una fractura conforme se incrementa la humedad (Tipler y Mosca, 2005). En cambio, Isik e Izli (2007) encontraron que la resistencia mecánica disminuye conforme la humedad de la semilla incrementa; esto se puede deber al método usado, ya que estos autores midieron la dureza con un penetrómetro; puede deberse también a una relación no lineal entre la humedad y la fuerza, como en el caso de semillas de cártamo evaluado en un ensayo de compresión (Baümler *et al.*, 2006).

No obstante, los resultados obtenidos en el presente trabajo concuerdan con los obtenidos por Mesquita y Hanna (1993) en soya, con Bilanski (1966) citado por Mohsenin (1986) en maíz, trigo y soya, en los cuales se requirió de mayor energía para producir ruptura en semilla con alto contenido de humedad. Además, Mohsenin (1986) y Multon (1981, citado por Foutz *et al.*, 1993) indican que las semillas con mayor humedad se deforman en mayor magnitud sin llegar a la ruptura, lo que les permite soportar una mayor cantidad de energía durante la colisión por impacto sin experimentar fractura (Tipler y Mosca, 2005).

La variedad harinosa (Cacahuacintle) obtuvo el valor más alto de la energía necesaria para producir ruptura, a pesar que la fuerza fue menor que en el dentado (HS-2) y el cristalino (Palomero). Se requirió más energía para producir ruptura en semillas con alta humedad (20%) que en semillas con baja humedad (12%, Cuadro 2).

Para las tres variedades, el desplazamiento se incrementó a mayor humedad, aunque con pendiente diferente, en este caso se atribuye a que la semilla pudo deformarse más en las tres variedades antes de la ruptura. La fuerza tendió a incrementarse a mayor humedad en la variedad harinosa y semi-harinosa, mientras que en la cristalina presentó un decremento, lo que se atribuye a que el turgor provocado por la hidratación proporcionó más resistencia en el endospermo harinoso, mientras que en el cristalino ocasionó un decremento en la resistencia atribuido al posible rompimiento o ablandamiento de la matriz de proteína que es abundante en este tipo de endospermo (White y Johnson, 2003). La energía fue mayor con humedad de 20 % en las tres variedades pero los incrementos no tuvieron la misma proporción, es decir, las pendientes de las curvas que trazarían, serían diferentes

impact could result in significant differences as it is a lineal combination of the force and the displacement obtained in this compression test, resulting in a higher impact energy in order to cause a fracture as the humidity rises (Tipler and Mosca, 2005). In contrast, Isik and Izli (2007) found that the mechanical resistance decreases as the humidity of the seed increases; this can be due to the method used, as these authors measured the hardness with a penetrometer. It could also be due to a non-linear relation between humidity and strength, such as is the case for safflower seeds in a compression test (Baümler *et al.*, 2006).

Nonetheless, the results obtained in this work are consistent with the ones obtained by Mesquita and Hanna (1993) in soy seeds, and with Bilanski (1966) cited by Mohsenin (1986) in corn, wheat and soy seeds, in which more energy was required to produce a fracture in the seed with high humidity content. Furthermore, Mohsenin (1986) and Multon (1981, cited by Foutz *et al.*, 1993) indicate that the seeds with higher humidity become deformed without reaching fracture, which allows them to withstand a greater amount of energy during the collision by impact without fracturing (Tipler and Mosca, 2005).

The floury variety (Cacahuacintle) had the highest energy level necessary to produce a fracture, even though the force was lower than in the semi-floury variety (HS-2) and in the crystalline variety (Popcorn). More energy was required in order to produce a fracture in seeds with high humidity (20%) than in seeds with low humidity (12%, Table 2).

For the three varieties, the displacement increased in relation to higher levels of humidity. Although with a different slope, it is attributed to the fact that the seed was able to deform itself more in the three varieties before fracturing. The strength tended to increase in relation to higher humidity in the floury and semi-floury varieties while it decreased in the crystalline variety, which is attributed to the turgor caused by hydration, providing more resistance in the floury endosperm, while in the crystalline it caused a decrease in the resistance attributed to the possible fracture or softening of the protein matrix, which is abundant in this type of endosperm (White and Johnson, 2003). The energy was greater with a humidity of 20% in the three varieties but the increases did not have the same proportion. The slopes of the curves observed would be different (Table 2), which was attributed to the fact that in the energy equation, the magnitude of the displacement was greater than that of the strength.

(Cuadro 2), lo que se atribuyó a que en la ecuación de la energía, la magnitud del aporte del desplazamiento fue superior al aporte de la fuerza.

Al comparar la energía a ruptura en la compresión de HS-2 con la energía en un ensayo de impacto (Mancera *et al.*, 2007), como se muestra en el Cuadro 3, la energía desarrollada por el impacto resultó en 1.63 veces la de compresión, y ocasionó un daño similar, o ligeramente superior; este resultado es relativamente comparable al mencionado por Mohsenin (1986), quien midió la magulladura sobre frutos de manzana, y la energía de impacto fue 1.5 veces la de compresión para ocasionar un daño similar. La correspondencia entre los resultados de ambos experimentos permite sugerir la utilidad que representa la determinación de la resistencia a compresión de las semillas, con la ventaja de que los estudios de compresión son más sencillos, pues aún los aparatos más avanzados para realizar estudios de impacto en colisiones físicas no permiten medir la energía necesaria para ocasionar la fractura de las semillas, ya que el valor de la energía de impacto es preestablecido; más complicado aún resultaría estimar dicha energía en evaluaciones efectuadas con equipo o maquinaria agrícola.

Cuadro 3. Energía y semillas sin fractura en un ensayo de impacto y compresión realizado en la variedad HS-2.

Table 3. Energy and seeds without fracture in impact and compression tests done on the HS-2 variety.

Método de fractura	Energía (mJ)	Semillas sin fractura (%)
Impacto	141.00	9.89
Compresión	86.48	2.22
Resta aritmética	54.52	7.67
Relación	1.63	--- §

§Los porcentajes de semillas sin fractura, tanto en impacto como en compresión, denotan que el daño aplicado se encontró en el umbral de fractura; es decir, justo en la cantidad de energía necesaria para ocasionar la fractura.

Efecto de la variedad y de la humedad de la semilla sobre el índice de daño

En la Figura 3 se muestran algunas semillas clasificadas en cuanto al índice de daño para la evaluación. La variedad tuvo efecto significativo ($p \leq 0.05$) sobre el índice de daño, mientras que el contenido de humedad de la semilla (Cuadro 4). La variedad HS-2 presentó el mayor índice de daño y el Palomero presentó el menor (Cuadro 4).

When comparing the energy at fracture in the compression of HS-2 with the energy in an impact test (Mancera *et al.*, 2007), as shown in Table 3, the energy caused by the impact resulted to be 1.63 times that of compression and caused a similar or slightly superior damage. This result is relatively comparable to the one observed by Mohsenin (1986), who measured the bruises on apple fruit, and the impact energy was 1.5 times that of the compression needed to cause a similar damage. The correspondence between the results of both experiments suggests the usefulness represented by the determination of the resistance to seed compression. Furthermore, compression studies are simpler, as even the most advanced gadgets used to carry out impact studies on physical collisions do not measure the energy necessary to cause seed fractures given that the impact energy value is pre-established. It would be even more complicated to estimate such energy in evaluations done with agricultural equipment or machinery.

Effect of seed variety and humidity on the damage index

Some seeds classified in accordance to their index damage for the evaluation are shown in Figure 3. The variety had a significant effect ($p \leq 0.05$) on the damage index, while the humidity content of the seed (Table 4). The HS-2 variety presented the highest damage index and the Popcorn variety presented the lowest (Table 4).

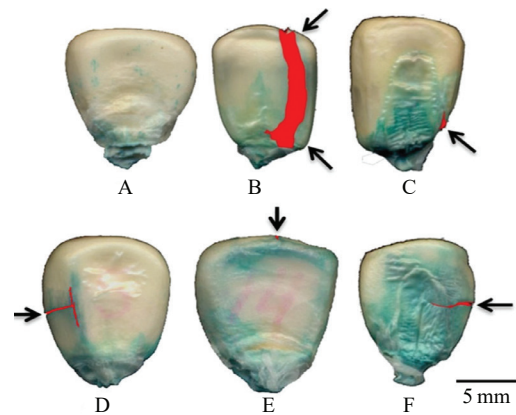


Figura 3. Daños externos en la semilla de Cacahuacintle: A) semilla sin fractura; B) con fractura severa; C) fractura en la base; D) fractura en la parte media; E) fractura en la corona; y F) fractura en el embrión.

Figure 3. External damages in the Cacahuacintle seed: A) seed without fracture; B) with severe fracture; C) fracture on the base; D) fracture on the middle part; E) fracture on the crown; and F) fracture on the embryo.

Conclusiones

La semilla de la variedad de maíz Cacahuacintle, de endospermo harinoso, presentó la menor resistencia a la fuerza de compresión y el mayor desplazamiento para su ruptura. La variedad Palomero, de grano cristalino, necesitó de mayor fuerza de compresión que las otras dos variedades para su ruptura, aunque no fue estadísticamente diferente que la variedad HS-2 de grano semidentado, en cuanto al desplazamiento para su ruptura en el ensayo de compresión. No hubo diferencia estadística en la fuerza de compresión requerida para la ruptura de la semilla entre las humedades de la semilla de 12 y 20%, pero con 20% de humedad hubo mayor desplazamiento. La variedad con mayor índice de daño fue HS-2, la cual tuvo el mayor porcentaje de endospermo y de germinación; esto último tal vez por el mayor vigor de la semilla. La humedad no tuvo efecto significativo sobre el índice de daño, pero sí sobre el porcentaje de germinación.

Literatura citada

- ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers). 2006. ASABE standard S358.2 FEB03: Moisture Measurement-Forages. ASABE Standards 2006. 53th Edition. Standards Engineering Practices Data. 608 p.
- ASAE (American Society of Agricultural Engineers). 2005. ASAE standard S368.4 DEC00: Compression test of food materials of convex shape. ASAE Standards 2005. 52th Edition. Standards Engineering Practices Data. 601-608 pp.
- Basu, R. N. 1994. Seed viability. *In*: Seed quality: basic mechanisms and agricultural implications. Food products press: an imprint of the haworth press, Inc. New York, United States of America. 10-12 pp.
- Bäumler, E.; Cuniberti, A.; Nolasco, S. M. and Riccobene, I. C. 2006. Moisture dependent physical and compression properties of safflower seed. *J. Food Eng.* 72:134-140.
- Bewley, D. and Black, M. 1994. Seeds: physiology of development and germination. Second edition. Plenum Press. New York, United States of America. 445 p.
- Bosoi, E. S.; Vernaiev, O. V.; Smirnov, I. I. and Sultan-Shakh, E. G. 1991. Theory, construction and calculations of agricultural machines. Jaganmohan, A. A. A. Balkema/Rotterdam. India. 810 p.
- Desai, B. B.; Kotecha, P. M. and Salunkhe, D. K. 1997. Seeds handbook. Marcel Dekker. New York, United States of America. 475-588 pp.
- Foutz, T. L.; Thompson, S. A. and Evans, M. D. 1993. Comparison of loading response of packed grain and individual kernels. *Am. Soc. Agric. Eng.* 36:569-576.
- Gaytán-Martínez, M.; Figueroa-Cárdenas, J. D.; Reyes-Vega, M. L.; Rincón-Sánchez, F. and Morales-Sánchez, E. 2006. Microstructure of starch granule related to kernel hardness in corn. *Rev. Fitotec. Mex.* 29(2):135-139.

Cuadro 4. Cuadrados medios y efectos principales de los factores de estudio: variedad y contenido de humedad de la semilla, sobre el índice de daño.

Table 4. Mean squares and main effects of the study factors: variety and humidity content of the seed on the damage index.

Fuente de variación	Grados de libertad	Índice de daño	
Variiedad (V)	2	17 438.61	*
Humedad (H)	1	1 670.81	NS
V*H	2	1 452.27	NS
Error	12	3 246.65	
CV (%)		20.73	
R ²		0.50	
Efectos principales			
Variiedad			
HS-2		327.78	a
Cacahuacintle		276.67	ab
Palomero		220.01	b
DMS 0.05			
Humedad (%)			
12		265.19	a
20		284.45	a
DMS 0.05			
		58.5240	

*significativo con $\alpha=0.05$; NS= no significativo. Medias con letra distinta en columnas difieren estadísticamente (Tukey).

Conclusions

The seed of the Cacahuacintle corn variety with floury endosperm presented the lowest resistance to the compression force and the most displacement for its fracture. The Popcorn variety with crystalline grain needed more compression strength than the other two varieties for its fracture, even though it was not statistically different than the HS-2 variety of semi-floury grain in regards to the displacement for its fracture in the compression test. There was no statistical difference in the compression force required for the seed fracture between the seed humidity of 12 and 20%, but with 20% humidity there was a greater displacement. The variety with the highest damage index was HS-2, which had the highest percentage of endosperm and germination; the latter may be due to the strength of the seed. Humidity had no significant effect on the damage index, but it had an effect on the percentage of germination.

End of the English version



- Instron®. 2006. Instron BlueHill referencia de cálculos. Manual de referencia de software. Revisión A (Help V 2.3). Instron Corporation.
- ISTA International Seed Testing Association). 2005. International rules for seed testing. Edition 2005. Bassersdorf, CH-Switzerland.
- Isik, E. and Izli, N. 2007. Moisture dependent physical and mechanical properties of dent corn (*Zea mays* var. *indentata* Sturt.) Seeds (Ada-523). *Am. J. Food Technol.* 2:342-353.
- Mancera, R. A.; García, G. S.; Carballo, A. C.; Villaseñor, C. A. P.; Martínez, A. G. y Estrada, V. T. 2007. Calidad fisiológica y daño físico en semilla de maíz sometida a impacto. *Agric. Téc. Méx.* 33(2):125-133.
- Marín, S. J.; Mejía, J. A. C.; Hernández, A. L.; Peña, A. L. y Carballo, A. C. 2007. Acondicionamiento osmótico de semillas de tomate de cascara. *Agric. Téc. Méx.* 33(2):115-123.
- Mesquita, C. M. and Hanna, M. A. 1993. Soybean threshing mechanics: II Impact. *Am. J. Food Technol.* 36:281-284.
- Mohsenin, N. N. 1986. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach science publishers. Second Edition. United States of America. 1-8 pp.
- SAS (Statistical Analysis System Institute). 1999. SAS/STAT. User's Guide. Version 8.1. SAS Publishing, Cary, N. C. 3848 p.
- Serna, S. S. O.; Amaya, C. A. G.; Herrera, P. M.; Melesio, J. L. C.; Preciado, R. E. O.; Terrón, A. D. I.; and Vázquez, G. C. 2008. Evaluation of the lime cooking and tortilla making properties of quality protein maize hybrids grown in Mexico. *Plant Foods Human Nutrition.* 63:119-125.
- Tipler, P. A. y Mosca, G. 2005. Física para la ciencia y la tecnología. 5ª edición. Traducido de Physics for Scientists and Engineers, fifth Edition. Editorial Reverté. México. 217-218 pp.
- White, J. P. and Johnson, A. L. 2003. Corn chemistry and technology. American Association of Cereal Chemists, Inc. Minnesota, USA. 71-74. 76 p.