



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

**CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA DEL GRANO DE
HABA (*Vicia faba L.*) PARA OCHO VARIEDADES DE
MÉXICO**

TESIS
QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:
CUAPANTECATL GARRIDO NORBERTO

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:
NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ, DR.



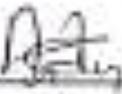
ENERO 2019
CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO

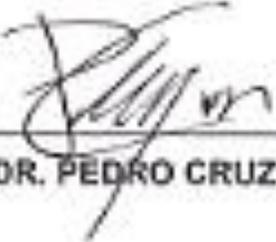
**CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA DEL GRANO DE HABA
(*Vicia faba L.*) PARA OCHO VARIEDADES DE MÉXICO**

Tesis realizada por **Norberto Cuapantecatl Garrido** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: 
DR. NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ

ASESOR: 
DR. AGUSTÍN RUIZ GARCÍA

ASESOR: 
DR. PEDRO CRUZ MEZA

Chapingo, Estado de México, enero de 2019

CONTENIDO

CONTENIDO	PÁG.
1 CAPÍTULO I. Introducción General	1
1.1 Referencias bibliográficas	3
2 CAPÍTULO II. Revisión De Literatura	4
2.1 El cultivo de haba.....	4
2.1.1 Planta.....	4
2.1.2 Semilla o grano	4
2.1.3 Consumo.....	5
2.1.4 Producción.....	5
2.2 Propiedades físicas	7
2.2.1 Contenido de humedad	7
2.2.2 Forma y tamaño.....	8
2.2.3 Esfericidad.....	8
2.2.4 Densidad.....	9
2.2.5 Porosidad.....	9
2.2.6 Masa.....	9
2.3 Propiedades mecánicas	9
2.3.1 Fuerza de compresión	10
2.3.2 Deformación	10
2.3.3 Esfuerzo	10
2.3.4 Módulo de deformabilidad o elasticidad aparente	10
2.3.5 Energía absorbida	10

2.3.6	Razón de Poisson	10
2.4	Referencias bibliográficas	11
3	CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN físico-mecánica del grano de haba (<i>Vicia faba L.</i>) para ocho variedades de México	12
3.1	Resumen.....	12
3.2	Abstract	13
3.3	Introducción	14
3.4	Materiales Y Métodos	16
3.4.1	Material vegetativo.	16
3.4.2	Contenido de humedad.	17
3.4.3	Forma y tamaño.....	17
3.4.4	Área superficial.	18
3.4.5	Masa.....	19
3.4.6	Densidad y porosidad	19
3.4.7	Medición de las propiedades mecánicas.....	20
3.4.8	Medición de la fuerza de ruptura.	23
3.4.9	Medición del desplazamiento en el punto de ruptura.	24
3.4.10	Medición de la energía absorbida.....	24
3.4.11	Análisis estadístico.	24
3.5	Resultados y discusión	25
3.5.1	Normalidad de los datos.....	25
3.5.2	Contenido de humedad	25
3.5.3	Dimensiones.....	26

3.5.4	Área superficial.....	27
3.5.5	Grosor del tegumento	27
3.5.6	Masa	28
3.5.7	Densidad y porosidad	28
3.5.8	Diámetro medio geométrico y diámetro media aritmético	29
3.5.9	Esfericidad.....	30
3.5.10	Resistencia a la compresión	30
3.5.11	Desplazamiento	31
3.5.12	Energía absorbida	32
3.5.13	Módulo proporcional de deformabilidad.....	33
3.5.14	Análisis estadístico	36
3.6	Conclusiones	37
3.7	Referencias Bibliográficas.....	37
4	APÉNDICES	41

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.1. Composición química del grano de haba (% materia seca)	5
Cuadro 2.2. Valor en el mercado del cultivo del haba a nivel nacional, año de 2015.....	6
Cuadro 2.3. Principales datos de la producción del cultivo del haba seca en el año de 2015.....	7
Cuadro 3.1. Valores de la constante K en función del ángulo β	22
Cuadro 3.2. Análisis de comparación de Tukey, propiedades físicas de ocho variedades de haba del altiplano mexicano.	36
Cuadro 3.3. Análisis de comparación de Tukey, propiedades mecánicas de ocho variedades de haba del altiplano mexicano.	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Desarrollo de cultivares de haba sembrados bajo condiciones de lluvia estacional en Ciudad Serdán, Puebla. Primavera 2006. S=siembra; VE= emergencia; V5= cinco hojas; R4= inicio de floración; R6= inicio de fructificación; R11= madurez fisiológica.	6
Figura 3.1. Orientación de las muestras (grano de haba) respecto a los ejes de prueba.	18
Figura 3.2. Gráfico de Fuerza-Deformación de un ensayo de compresión uniaxial de una semilla de haba en el eje Y.	20
Figura 3.3. Esquema para calcular los radios de curvatura de la semilla en los diferentes planos (Rojas Barahona & Aristizábal Torres, 2012)	22
Figura 3.4. Radios de curvatura de dos habas, usando hojas milimétricas para ajustar la escala en el programa AutoCAD 2018.	22
Figura 3.5. Humedad vs ocho variedades de haba.	26
Figura 3.6. Dimensiones de los ejes X, Y y Z, vs ocho variedades de haba. ...	26
Figura 3.7. Área superficial del grano vs ocho variedades de haba.	27
Figura 3.8. Grosor del tegumento [mm] vs ocho variedades de haba.	27
Figura 3.9. Valores de Masa vs ocho variedades de haba	28
Figura 3.10. Densidad aparente ρ_a y densidad a granel ρ_g vs ocho variedades de haba.	29
Figura 3.11. Porosidad vs ocho variedades de haba	29
Figura 3.12. Diámetro medio aritmético y diámetro medio geométrico vs ocho variedades de haba.	30
Figura 3.13. Esfericidad para 8 variedades de haba	30
Figura 3.14. Gráfico de la Carga Máxima en el punto de ruptura del grano para 8 variedades de haba, unidades en Newtons	31
Figura 3.15. Gráfica del desplazamiento en el punto de deformación del grano de haba de 8 variedades.	32

Figura 3.16. Valores de la Energía Absorbida durante la prueba de compresión axial para cada eje de coordenadas del grano de haba para ocho variedades, hasta el punto de ruptura del tegumento.	32
Figura 3.17. Gráfica del módulo proporcional de deformabilidad para ocho variedades de haba.	33
Figura 4.1. Imagen del equipo de clasificación automática mediante visión artificial para granos de haba	41
Figura 4.2. Vistas frontal, lateral y superior, así como Isométrico del equipo de clasificación	42
Figura 4.3. Isométrico y vistas de la Estructura de soporte, material aluminio (perfil cuadrado tipo Bosch de 45mm) con uniones en escuadra a 90°, 2 tornillos y tuercas de seguridad por unión.....	43
Figura 4.4. Isométrico y vistas de la zaranda del equipo de clasificación.....	44
Figura 4.5. Isométrico y vistas de la banda transportadora.....	45
Figura 4.6. Sentido de avance de la semilla o grano de izquierda a derecha.	46
Figura 4.7. Detección de impurezas adheridas al grano mediante el software de visión por computadora.....	47
Figura 4.8. Actuadores ubicados en la parte final de la rampa de frenado.	47

LISTA DE APENDICES

Apéndice 4.1. Desarrollo de equipo de clasificación mediante la detección de impurezas y residuos de cáscara en el grano de haba.....	41
---	----

DEDICATORIA

A mi esposa María Guadalupe e hijas Melina y Daniela, quienes son lo más hermoso de mi vida

A mis padres Joaquina y Jorge, así como a mis hermanos Heraclio, Antonia, Agustín y Laura.

AGRADECIMIENTOS

Al CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACyT).

A la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, particularmente al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA).

Al DR. NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ, su ejemplo y enseñanzas acerca de la investigación y la tecnología han tenido gran impacto en mi formación académica.

Al DR. PEDRO CRUZ MEZA y al DR. AGUSTÍN RUÍZ GARCÍA, por su asesoría y disposición para la realización de esta investigación.

A la Dirección General de Investigación y Posgrado (DGIP).

A los compañeros del IAUIA.

A los directivos, profesores y técnicos del departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola (DIMA).

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Norberto Cuapantecatl Garrido
Fecha de nacimiento: Julio 1, 1985
Lugar de nacimiento: Unión Ejidal Tierra y Libertad, Tlaxco, Tlaxcala, México
No. De Cartilla militar: C-8640272
CURP: CUGN850701HTLPRR05
Profesión: Ingeniero Mecánico Agrícola.
Cédula profesional: 10230305

Desarrollo académico

Licenciatura: Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Generación 2008.

Maestría: Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Generación 2016-2018.

Desarrollo profesional

Primer Empleo: Área de pruebas de levante hidráulico en el Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola (2008-2009); Gerente de módulos de maquinaria: Secretaria de Desarrollo Rural, Estado de Puebla (2010); Gerente de Servicio: Distribuidor Agroequipos de Texcoco [Equipos John Deere] (2011); Capacitador Técnico: Grupo Comercom [Equipos Mekatech] (2012); Gerente de Operaciones: Grupo Comercom [Equipos Mekatech] (2013-2015).

CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA DEL GRANO DE HABA (*Vicia faba L*) PARA OCHO VARIEDADES DE MÉXICO

RESUMEN GENERAL

Los costos y rendimientos bajos en cultivos básicos en el medio rural, así como el minifundio, en México hacen de la agricultura una labor poco redituable para los campesinos. Por lo anterior, el presente trabajo es parte del desarrollo de componentes para dar valor agregado al cultivo de haba (*Vicia faba L.*), como equipos de descascarado y clasificación mediante visión artificial. Se presenta la caracterización paso a paso de las propiedades físico mecánicas del grano de haba, de 8 variedades disponibles en el altiplano Mexicano: humedad [%] (base húmeda), dimensiones en 3 ejes [mm], área superficial [mm²], grosor del tegumento (cáscara) [mm], Esfericidad (Φ), Densidad (ρ) [g/mm³], resistencia a la compresión [kN], desplazamiento [mm], energía absorbida (E_a) [J], módulo de proporcionalidad de deformabilidad (E_p) [MPa] y masa [kg]; Dichos ensayos se realizaron en los laboratorios correspondientes de la Universidad Autónoma Chapingo. El tamaño de muestra se definió en 30 granos por ensayo y se repitieron dichas pruebas, en sus 3 ejes (longitud, ancho, espesor), para cada variedad, finalizando con un análisis estadístico (prueba de Tukey). Con dichos resultados, se diseñó un disco de descascarado de 80 cm de diámetro, dispuesto por 28 cuchillas. El grosor del borde se basa en el grosor del grano y la velocidad de corte variable. El método (continuo), se diseñó un cilindro de descascarado con 90 cm de diámetro por 4 m de largo, con 40 cuchillas colocadas, a lo largo del diámetro, separadas a 30 mm; Finalmente, se desarrolló un equipo de clasificación de grano, utilizando visión artificial, con un programa que detecta el color de la cáscara de haba y los actuadores controlados electrónicamente para su separación. Mediante este sistema de clasificación, el costo del grano se incrementa de \$ 8 a 15 pesos por kg a \$20 a \$30 pesos por kg.

Palabras clave: compresión, *Vicia faba L.* axial, caracterización, deformación

Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Norberto Cuapantecatl Garrido.

Director de tesis: Noé Velázquez López.

GENERAL ABSTRACT

MECHANICAL PHYSICAL CHARACTERIZATION OF HABA GRAIN (*Vicia faba L*) FOR EIGHT VARIETIES OF MEXICO

Low costs and yields of basic crops in rural areas, as well as the smallholding in Mexico, make agriculture unprofitable for farmers. Therefore, the present work focuses on the development of components to add value to the bean crop (*Vicia faba L*). As a first stage, get the physical mechanical properties of bean grain of 8 varieties available in the Mexican highlands, such as: humidity [%] (wet basis), 3-axes dimension [mm], thickness of the tegument (shell) [mm], resistance to compression [kN], deformation [mm], absorbed energy (Ea) [J], deformability proportionality modulus (Ep) [MPa], mass [kg], volume [mm³] and density [g/mm³] were obtained. These tests were carried out in the corresponding laboratories of the Universidad Autónoma Chapingo. The sample size was defined as 30 grains per assay and these tests were repeated for each variety, in its 3 axes, to finish with a statistical analysis (Tukey test). Based on the results, two dehulling methods were designed, one discontinuous and one continuous. The first consists of a dehulling disc of 80 cm in diameter, arranged by 28 cutting blades whose thickness of the edge is based on the thickness of the bean grain, and the cutting speed is variable. For the second (continuous) method, a dehulling cylinder with 90 cm in diameter by 4 m long was designed, with 40 blades placed, Separated lengthwise every 30 mm. Finally, a grain classification equipment was developed, using artificial vision, with a program that detects the color of the bean shell and electronically controlled actuators for its separation, using this classification system, the cost of the grain is increased from \$ 8 to 15 pesos per kg to \$20 to \$30 pesos per kg.

Key words: peeling, sorting, artificial vision, compression, *Vicia faba L*.

Master's Thesis in Engineering, Postgraduate in Agricultural Engineering and Integral Use of Water, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Norberto Cuapantecatl Garrido.

Advisor: Noé Velázquez López.

LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRONIMOS

H_f	Contenido de humedad
P_i	Peso húmedo
P_f	Peso seco
L_x	Dimensiones eje X
L_y	Dimensiones eje Y
L_z	Dimensiones eje Z
D_a	Diámetro medio aritmético
D_g	Diámetro medio geométrico
S	Área superficial
M	masa
E	Módulo de elasticidad aparente
E_p	Módulo proporcional de deformabilidad
D	Desplazamiento
F	Fuerza de compresión hasta el punto de ruptura
K	Factor de ajuste de Kosman & Cunningham
$r_1, R_1:$	Radios de curvatura de la semilla convexa en contacto con el plato superior [m]
$r_2, R_2:$	Radios de curvatura de la semilla convexa en contacto con el plato inferior

Letras Griegas

β	Ángulo de curvatura de las superficies de contacto
μ	Relación de Poisson
ε	Porosidad
ρ	Densidad
ϕ	Esfericidad

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

Con el objetivo de cubrir las necesidades de un mercado cada día más exigente, la ingeniería agrícola ha realizado múltiples esfuerzos para conseguir el máximo perfeccionamiento de los procesos de producción agrícola; sin embargo, muchos factores son los que intervienen, de los cuales todavía no están suficientemente controlados. Además de las labores culturales de producción y cosecha, gran parte de los productores no posee tecnología que le permita dar un valor agregado a su producto, ya sea por los elevados costos o la ausencia de tecnología en el mercado. El presente trabajo se plantea para atender un mercado nacional que para el 2015, cubría una superficie del orden superior a 26 mil hectáreas y produjo a su vez casi 35 mil toneladas (SIAP, 2016), del haba "*Vicia faba L.*"; El descascarado de granos secos, ya sea por su forma, tamaño, humedad, peso, dureza de la cáscara y falta de uniformidad, representa una dificultad que obliga a vender la producción cosechada a bajos costos (con cascara). Las semillas secas sin cascara son de gran interés por el precio y la demanda, debido a que la tarea manual de descascarado, apenas y permite obtener 25 kg por persona, en un lapso de una semana.

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, 1995). 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 con el 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 con 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 podría reflejar de manera significativa la resistencia al impacto. (Tipler & 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. (Mesquita & 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; Multon, 1981) citado por (Foutz, Thompson, & Evans, 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. 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 haba, mediante la fuerza y desplazamiento en un ensayo de compresión, para ocho variedades del altiplano mexicano, así como otras propiedades físicas, y evaluar si sus propiedades son estadísticamente similares o diferentes, con ello sirvan para el diseño de equipo agrícola especializado en este cultivo.

1.1 Referencias bibliográficas

- Basu, R. (1995). Seed Viability. In. Seed Quality: Basic Mechanisms and Agricultural Implications. Amarjit, S. Basra. In: Food Products Press. An Imprint of the Haworth Press Inc. New York, London, Norwood (Australia).
- Bilanski, W. (1966). Damage resistance of seed grains. Transactions of the ASAE, 9(3), 360-0363.
- Foutz, T., Thompson, S., & Evans, M. (1993). Comparison of loading response of packed grain and individual kernels. Transactions of the ASAE, 36(2), 569-576.
- Mesquita, C., & Hanna, M. (1993). Soybean threshing mechanics: II. Impact. Transactions of the ASAE, 36(2), 281-284.
- Mohsenin, N. N. (1986). Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach science publishers, Unites States of America, Second Edition, 1-8.
- Multon, F. (1981). L'Etat actuel des travaux de la commission, Aliments a humidite, intermedicines du CNERNA Ind. Aliment. April, 98, 291-302.
- SIAP, S. (2016). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario estadístico de la información agrícola.
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2005). Física para la ciencia y la tecnología: Electricidad y magnetismo, luz, física moderna (Vol. 2): Reverté.

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El cultivo de haba

2.1.1 Planta

Las habas son plantas anuales, de germinación hipogea, de habito determinado e indeterminado (ICAMEX, 2005), de clima templado-frio semihúmedo, de raíces profundas, las raíces laterales muy desarrolladas y fuertes, los tallos llegan a alcanzar en ciertos tipos hasta un metro de altura. Las hojas compuestas; las flores agrupadas en racimos cortos axilares (Guerrero, 1997). Los frutos son vainas muy variables en longitud, con un número de semillas también variable que puede llegar de ocho a diez (Guerrero, 1997). Su clasificación taxonómica es:

Reino: *Plantae*;
División: *Magnoliophyta*;
Clase: *Magnoliopsida*;
Subclase: *Rosidae*;
Orden: *Fabales*;
Familia: *Fabaceae*;
Subfamilia: *Faboideae*;
Tribu: *Fabeae*;
Género: *Vicia*;
Especie: *Vicia faba L.*

2.1.2 Semilla o grano

Es oblonga, el color basal de la testa puede ser negra, verde oscuro, verde claro, blanca, café oscuro, café clara, violeta, amarilla, El color del hilum puede ser negro o blanco, el negro tiene carácter dominante; la longitud de la semilla puede ser de 0.5 a 3 cm y el ancho va de 0.5 a 2 cm, el peso de una semilla puede variar de 0.5 a 2.6 g. El tegumento presenta varias partes que sirven para reconocer las especies, entre ellas está el hilum, situado en la parte anterior de la semilla y es la cicatriz que deja el funículo. El peso de la semilla es de 1 a 2 g. Un litro de

semilla pesa 325 a 650 g y en 1 kg se tienen 400 a 1000 semillas. El poder germinativo dura entre cuatro a seis años. En la semilla comercial el porcentaje mínimo de germinación es del 90 % y la pureza mínima de 99 % (Cano, 1997). Por su composición química, es usado en distintas áreas como la Industrial y la Química, ver Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Composición química del grano de haba (% materia seca)

Variable	Valor	Variable	Valor	Variable	Valor
Energía total (MJ Kg ⁻¹)	89.1	K (mg Kg ⁻¹)	15486.05 ± 53.74	Cu (ppm)	18.0 ± 0.57
Materia seca (%)	18.87	Mg (mg Kg ⁻¹)	1426.27 ± 26.89	Fe (ppm)	89.17 ± 0.96
Proteína cruda (%)	29.63	Na (mg Kg ⁻¹)	499.70 ± 12.95	Ga (ppm)	0.33 ± 0.27
Celulosa cruda (%)	6.39	S (mg Kg ⁻¹)	497459.95 ± 3552.47	Li (ppm)	0.067 ± 0.02
Aceite crudo (%)	1.06	Al (mg Kg ⁻¹)	15.46 ± 0.22	Mn (ppm)	15.91 ± 0.05
A sh (%)	2.9	B (ppm)	10.97 ± 0.37	Ni (ppm)	3.83 ± 0.19
Extracto de N libre (%)	48.82	Ba (ppm)	31.01 ± 3.45	Pb (ppm)	1.50 ± 0.13
Ca (mg Kg ⁻¹)	728.6 ± 19.39 6545.46 ±	Co (ppm)	0.066 ± 0.002	Sr (ppm)	5.25 ± 0.14
P (mg Kg ⁻¹)	8.75	Cr (ppm)	11.25 ± 0.04	Zn (ppm)	52.83 ± 0.77

Fuente: (Haciseferoğulları, Gezer, Bahtiyarca, & Mengeş, 2003)

2.1.3 Consumo

A nivel nacional el consumo per cápita de haba es de aproximadamente 6.8 kg y dicha producción es suficiente para cubrir esta demanda (Cruz, 1996). La producción de haba en nuestro país tiene como destino principal el mercado nacional, ya que a lo largo de su historia no se ha distinguido por ser una hortaliza que genere importantes cantidades de divisas.

2.1.4 Producción

Las variedades que actualmente se siembran en las regiones productoras son: criollas principalmente cuyo inconveniente agronómico es el de tener un ciclo biológico demasiado largo (160±10 días de siembra a cosecha), ver Figura 2.1, generalmente son sembradas bajo condiciones de temporal (Solórzano, 2001). Véase Cuadro 2.2 y Cuadro 2.3. (SIAP, 2016).

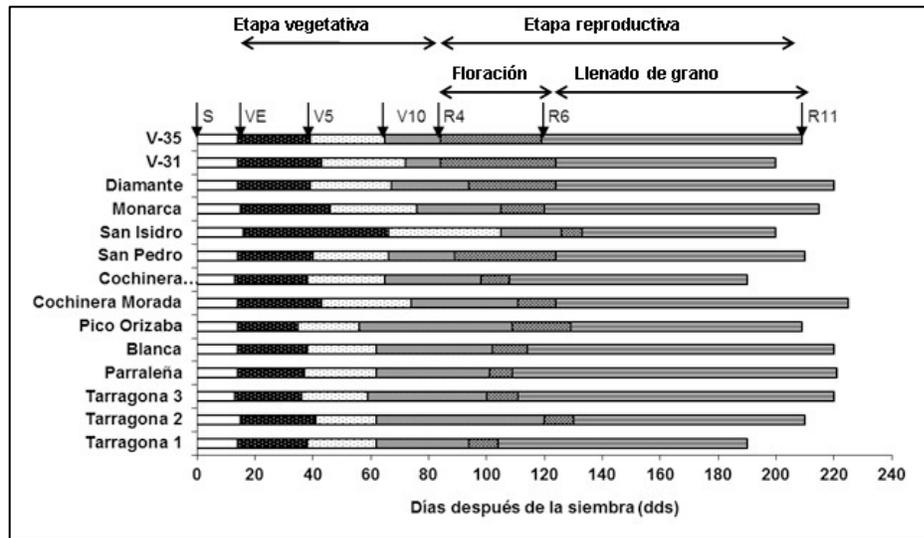


Figura 2.1. Desarrollo de cultivares de haba sembrados bajo condiciones de lluvia estacional en Ciudad Serdán, Puebla. Primavera 2006. S=siembra; VE= emergencia; V5= cinco hojas; R4= inicio de floración; R6= inicio de fructificación; R11= madurez fisiológica. Fuente: (Pichardo-Riego et al., 2013)

Cuadro 2.2. Valor en el mercado del cultivo del haba a nivel nacional, año de 2015.

Cultivo	Sup. Sembrada Ha	Sup. Cosechada Ha	Sup. Siniestrada Ha	Producción T	Rendimien to T Ha ⁻¹	PMR \$ T ⁻¹	Valor Producción Miles de Pesos
Haba grano	26,924.50	26,831.20	93.3	34,993.95	1.30	11,663.11	408,138.29
Haba grano semilla	5.80	5.80	0.00	5.44	0.94	61,250.00	333.20
Haba verde	13,415.61	13,191.61	224.00	81,311.51	6.16	5,164.88	419,964.04

Fuente: Anuario estadístico de la producción agrícola. SIAP, SAGARPA (Consulta: agosto de 2016)

Cuadro 2.3. Principales datos de la producción del cultivo del haba seca en el año de 2015.

Haba grano	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Sup. Siniestrada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
2015	Ha	Ha	Ha	T	T Ha ⁻¹	\$ T ¹	Miles de Pesos
NACIONAL	26,924.50	26,831.20	93.30	34,993.95	1.30	11,663.11	408,138.29
PUEBLA	16,083.30	16,053.00	30.30	18,284.37	1.14	14,843.13	271,397.28
VERACRUZ	6,098.20	6,098.20	0.00	10,255.09	1.68	8,298.82	85,105.18
TLAXCALA	2,831.00	2,831.00	0.00	3,774.05	1.33	7,145.25	26,966.55
HIDALGO	1,143.70	1,080.70	63.00	1,183.57	1.10	6,481.74	7,671.60
EDO. MÉXICO	359.50	359.50	0.00	779.72	2.17	15,572.58	12,142.25
MORELOS	64.10	64.10	0.00	205.51	3.21	11,625.92	2,389.24
OTROS	344.70	344.70	0.00	511.64			2,466.19

Fuente: Anuario estadístico de la producción agrícola. SIAP, SAGARPA (Consulta: agosto de 2016)

2.2 Propiedades físicas

Para determinar las propiedades físicas del grano de haba se requiere de la experimentación y registro de distintas características como son: contenido de humedad, forma y tamaño, dimensiones en 3 ejes, área superficial, grosor del tegumento, volumen, color, densidad y porosidad. Las cuales son algunas de las propiedades físicas importantes para la caracterización de granos. Entre mayor número de propiedades se determinan es mejor al momento de realizar una comparación de granos, al igual dichas propiedades sirven de partida al momento de diseñar equipos especializados para el tratamiento de cosecha y post cosecha de dichos granos.

2.2.1 Contenido de humedad

Es la cantidad de líquido “agua” que contiene un material, dicha magnitud se obtiene mediante un analizador de humedad como el de un horno de secado con balanza, ambos métodos son habituales para determinar el contenido de humedad por pérdida por secado. Se puede mostrar tanto en base húmeda como en base seca dependiendo del tipo de tratamiento de secado y la propiedad de interés del trabajo, la fórmula para base húmeda y base seca, difieren una de

otra, por lo que es importante prestar atención al tipo de base que se elige para el contenido de humedad.

2.2.2 Forma y tamaño

Los granos de haba presentan formas caprichosas, por lo que no es sencillo determinar su forma de manera general, lo que conviene es dimensionar los puntos extremos del grano, área superficial, grosor del tegumento, volumen, densidad, porosidad y masa. Son características que pretenden servir de punto de comparación entre distintas variedades y distintos granos.

2.2.2.1 Dimensiones en 3 ejes

Se define como la distancia entre los extremos de la longitud del grano, el ancho y el grosor. Se mide en milímetros.

2.2.2.2 Área superficial

Es la superficie externa del grano en unidades cuadradas, se obtiene mediante el cálculo debido a que el grano de haba presenta una forma caprichosa.

2.2.2.3 Grosor del tegumento

Es la distancia transversal que va desde la superficie del grano hasta el contacto con el grano, entre lo cual se encuentra el recubrimiento definido como tegumento o comúnmente llamado cáscara. Se mide en milímetros mediante instrumentación especial con puntas esféricas para mejor toma de mediciones.

2.2.2.4 Volumen

Se obtiene mediante el ensayo en un recipiente graduado con un volumen conocido de agua destilada, este es desplazado de acuerdo con la cantidad de granos que se introduzcan, dicho volumen es necesario para los cálculos de densidad aparente y densidad a granel, se mide en unidades cúbicas.

2.2.3 Esfericidad

La esfericidad es el grado de redondez que posee un cuerpo, en este caso se toma en cuenta las dimensiones de los tres ejes en relación con su eje mayor.

2.2.4 Densidad

Es la relación de la masa por la unidad de volumen. Sus unidades en el sistema internacional son kg/m^3 . Distingue diferentes formas de densidad que se usan en cálculos de proceso:

Densidad verdadera: Es la que se calcula a partir de las densidades de los componentes de un material, suponiendo conservación de la masa y el volumen.

Densidad sustancia: La que se mide cuando un material se ha pulverizado de tal forma que no hay poros en su interior.

Densidad de partícula: La de una muestra que no ha sido modificada estructuralmente por lo que incluye el volumen de todos los poros cerrados y no la de los poros que tienen conexiones externas.

Densidad aparente: Es la densidad de una sustancia cuando se incluye el volumen de todos sus poros.

Densidad a granel: La del material cuando está empacado o apilado a granel (Bulk en inglés). (Orrego, 2003)

2.2.5 Porosidad

La porosidad o fracción de huecos es una medida de espacios vacíos en un material, y es una fracción del volumen de huecos sobre el volumen total, entre 0-1, o como un porcentaje entre 0-100 %.(Machado, 2001)

2.2.6 Masa

Es una magnitud que expresa la cantidad de materia de un cuerpo, medida por la inercia de este, que determina la aceleración producida por una fuerza que actúa sobre él. Determina la medida de la masa inercial y de la masa gravitacional. Su unidad es el (kg).

2.3 Propiedades mecánicas

La resistencia de un material depende de su capacidad para soportar una carga excesiva sin presentar deformación o falla. Esta propiedad es inherente al material y debe determinarse mediante la experimentación. (Charles, 1998)

2.3.1 Fuerza de compresión

Durante el ensayo de compresión se mide mediante la instrumentación de sensores que registran la magnitud de la fuerza durante el lapso del ensayo. Se mide en Newtons

2.3.2 Deformación

Se define como la distancia recorrida durante el ensayo en uno de sus ejes donde se ejerce la fuerza de compresión y es registrada mediante el uso de instrumentación en un banco de prueba de materiales, se mide en metros.

2.3.3 Esfuerzo

El esfuerzo es una fuerza que actúa sobre el área unitaria en la que se aplica, existen esfuerzos de tensión, flexión, compresión y cortantes. La deformación unitaria se define como el cambio de dimensión por unidad de longitud. El esfuerzo suele se suele expresar en pascales (Pa) o en psi (libras por pulgadas cuadradas, por sus siglas en ingles). La deformación unitaria no tiene dimensiones y con frecuencia se expresa en pulg/pulg o en cm/cm.

2.3.4 Módulo de deformabilidad o elasticidad aparente

Relación entre el esfuerzo y la deformación. En la curva de esfuerzo deformación se concibe como la pendiente de la curva en la zona que va del inicio al límite de proporcionalidad se le conoce como módulo de elasticidad. (Gere & Goodno, 1988)

2.3.5 Energía absorbida

Es la cantidad de energía requerida hasta el punto de falla de un material durante un ensayo, se mide en Joules, y se interpreta como el área bajo la curva de fuerza-deformación de un material.

2.3.6 Razón de Poisson

Se define como una propiedad adimensional de los materiales que relaciona la deformación lateral con la deformación longitudinal. Su rango de valores es $0 \leq \mu \leq 0.5$. (Charles, 1998), para el caso de materiales biológicos no es posible definir dicha relación debido a que cada muestra presenta composiciones no homogéneas de sus partículas.

2.4 Referencias bibliográficas

- Cano, B. J. (1997). Habas de huerta. Diez temas sobre la huerta. *Ministerio de Agricultura, Madrid, España, 2da Edición, Tomo V*, 7-18.
- Charles, H. R. (1998). Mecánica de Materiales. In: México: Prentice-Hall.
- Cruz, L. G. (1996). Regionalización agroclimática para cultivo de haba (*Vicia faba* L.) en los valles altos de México. . *Departamento de Fitotecnica. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.*
- Guerrero, G. A. (1997). Haba. Cultivos herbáceos extensivos. . *Ediciones Mundiprensa*, 335-345.
- Gere, J. M., & Goodno, B. J. (1988). Mecánica de materiales. Thomson.
- ICAMEX. (2005). Tecnología de producción para el cultivo de haba. *Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuicola y Forestal del Estado de México.*
- Machado, J. E. O. (2001). Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos: Univ. Nacional de Colombia.
- Orrego, C. (2003). Procesamiento de alimentos. Primeira Edição. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Pichardo-Riego, J. C., Escalante-Estrada, J. A. S., Díaz-Ruíz, R., Quevedo-Nolasco, A., Volke-Haller, V., & Morales-Rosales, E. J. (2013). Rendimiento y eficiencia en el uso del agua de cultivares de haba (*Vicia faba* L.) para doble propósito. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 19(1), 71-84.
- SIAP, S. (2016). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. *Anuario estadístico de la información agrícola.*
- Solórzano, V. E. L., R. J., (2001). Mejoramiento genético en el cultivo del haba (*Vicia faba* L). *No publicado.*

CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DEL GRANO DE HABA (*Vicia faba L.*) PARA OCHO VARIEDADES DE MÉXICO

Cuapantecatl-Garrido, N¹. Velázquez-López, N^{2*}. Ruiz-García, A². Cruz-Meza, P³. Villaseñor-Perea, C.A³. Venegas- Ordoñez, M.R³.

¹ Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. De México. Correo: norbertocuapantecatl@gmail.com

² Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. De México. Correo: noe.velazquez@gmail.com tel. (595)1143092 (*Autor de correspondencia)

³ Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. De México.

3.1 Resumen

Este trabajo se realizó con el objetivo de determinar las características físicas de 8 variedades disponibles en el altiplano Mexicano de semillas secas de haba (*Vicia faba L.*); como parte de la caracterización se obtuvieron los valores promedio de cada característica de estudio: (9.66 % (b.h.); 1.48 g de masa; 21 mm, 17 mm y 8 mm para L_x, L_y y L_z, respectivamente; 0.16 mm del grosor de la cáscara; 396, 377 y 689 [N] de resistencia a la deformación para los ejes X, Y y Z, respectivamente; 0.87, 0.68 y 1.01 [mm] de desplazamiento; 0.18, 0.13 y 0.36 [J] de Energía absorbida hasta la falla del tegumento; 15, 12 y 19 [MPa] de Ep). Los cuales son datos relevantes también en el diseño de equipo agrícola para postcosecha (transportadores, molinos, tolvas, sembradoras, silos, entre otros). La metodología consistió en seguir una serie de etapas propuestas por distintos autores y organismos internacionales, correspondiente a la obtención de las características listadas anteriormente. El tamaño de muestra se definió en 30 granos por ensayo, en sus 3 ejes principales (longitud, ancho y grosor) y se repitieron dichas pruebas para cada variedad para finalizar con un análisis estadístico. Se concluye que existe en un mismo cultivo (*Vicia Faba*), diferencias significativas entre variedades distintas, por lo que los equipos tecnológicos que pretendan diseñarse deberán contar con márgenes de ajuste para adaptarse a las distintas características de sus variedades.

Palabras clave: **axial, compresión, haba, *Vicia faba L.***

Mechanical physical characterization of haba grain (*Vicia faba* L.) for eight varieties of Mexico

Cuapantecatl-Garrido, N¹. Velázquez-López, N^{2*}. Ruiz-García, A². Cruz-Meza, P³. Villaseñor-Perea, C.A³. Venegas-Ordoñez, M.R³.

¹ Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. De México.

² Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. De México. E-mail: noe.velazquez@gmail.com

³ Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. De México.

3.2 Abstract

This work was carried out with the objective of determining the physical characteristics of 8 varieties available in the Mexican highlands of dried bean seeds (*Vicia faba* L.), for subsequent evaluation in the development of dehulling and grading technology for said grain; as part of the characterization was obtained: (9.66% (w.b.), 1.48 g of dough, 21 mm, 17 mm and 8 mm for DX, DY and DZ, respectively, 0.16 mm of shell thickness, 396, 377 and 689 [N] of resistance to deformation for the X, Y and Z axes, respectively: 0.87, 0.68 and 1.01 [mm] of deformation, 0.18, 0.13 and 0.36 [J] of Energy absorbed until the tegument failure, 15, 12 and 19 [MPa] of Ep) which are also relevant data in the design of agricultural equipment for post-harvest (conveyors, mills, hoppers, seeders, silos, among others). The methodology consisted of following a series of stages proposed by different authors and international organizations, corresponding to obtaining the characteristics listed above. The sample size was defined in 30 grains per test, in its 3 main axes (length, width and thickness) and these tests were repeated for each variety to finish with a statistical analysis. It is concluded that exists in the same crop (*Vicia Faba*), significant differences between different varieties, so that the technological equipment that they intend to design must have adjustment margins to adapt to the different characteristics of their varieties.

Key words: axial, compression, broad bean, *Vicia Faba* L.

3.3 Introducción

El haba (*Vicia Faba*) es uno de los cultivos más antiguos y difundidos en el mundo, se cree que fue domesticado hace 7000 años (Zohary, Hopf, & Weiss, 2012). Es una importante leguminosa con alto valor nutricional de sus semillas, ricas en proteínas. y almidón. Las semillas se consumen secas, frescas, congeladas o enlatadas (Duc et al., 2010). La producción mundial para el 2015 fue de más de 4 millones de toneladas (FAO, 2015) y la producción en México para el mismo año fue de casi 35 mil toneladas (SIAP, 2016). El haba tiene un alto contenido de proteínas (aproximadamente un 25% en grano seco), pero carece de algunos aminoácidos. Además, contiene cobre, niacina, folato y vitamina C. Por supuesto, hay más de estos nutrientes, especialmente vitamina C, en los granos frescos que en los secos (Crépon et al., 2010). El haba a veces se clasifica en subespecies según las variedades y sus usos en varios países. Las habas comunes reciben su nombre de los granos que son grandes y planos. Los granos son variables en tamaño y forma, una vez secado el grano poseen colores característicos que van de blancos, amarillos, verdes, marrones, vinos y morados u oscuros. Se usan en la industria y en aplicaciones farmacéuticas. 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, 1995). 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 con el consumo de energía (Mohsenin, 1986). El haba es una buena alternativa a la costosa proteína de carne y pescado. La longevidad de su vida de almacenamiento, su facilidad de transporte y su bajo costo son puntos atractivos para los agricultores, se consumen como habas frescas, secas y en conservas. Se utiliza como fármaco medicinal para cálculos renales, disfunción hepática y enfermedades oculares. Al mismo tiempo, se utilizan para la alimentación animal. Los granos rotos se mezclan en la dieta

animal y las partes vegetativas de la planta se usan como capa térmica en los corrales de animales (Altuntaş & Yıldız, 2007).

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 con 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 haba podría reflejar de manera significativa la resistencia al impacto. (Tipler & 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. (Kumar, Prasad, Chandra, & Debnath, 2016) y (Sologubik, Campañone, Pagano, & Gely, 2013) sostienen las siguientes consideraciones respecto a la importancia de las características físico-mecánicas del grano: El conocimiento de la morfología y la distribución del tamaño de las semillas es esencial para el diseño adecuado de los equipos de limpieza, clasificación y separación. Además, las dimensiones características permiten un cálculo de la superficie y el volumen de granos, aspectos importantes para modelar el secado y la ventilación (Al-Mahasneh & Rababah, 2007). Diferentes investigadores informan sobre el uso de las dimensiones características para determinar el

tamaño de las semillas y los granos (Gupta & Das, 2000). La densidad aparente se usa para determinar la capacidad de almacenamiento y transporte, mientras que la densidad real es útil para diseñar equipos de separación adecuados. Además, la porosidad de la masa de grano determina la resistencia al flujo de aire durante la operación de aireación y secado (Brooker, Bakker-Arkema, & Hall, 1992; Kachru, Gupta, & Alam, 1994). Las propiedades de fricción como el ángulo de reposo y el coeficiente de fricción son reconocidas por los ingenieros como propiedades importantes para el diseño de contenedores de semillas y otras estructuras de almacenamiento (Vilche, Gely, & Santalla, 2003). (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 propensas a la falla.

El objetivo de esta investigación fue estudiar la respuesta de ruptura en semilla de haba, mediante la fuerza y desplazamiento en un ensayo de compresión, para ocho variedades del altiplano mexicano, así como otras propiedades físicas, y evaluar si sus propiedades son estadísticamente similares o diferentes.

3.4 Materiales Y Métodos

Este estudio fue realizado de octubre 2017 a julio 2018 en el laboratorio de materiales del departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Texcoco, Estado de México, México.

3.4.1 Material vegetativo.

Los granos corresponden a la leguminosa conocida en México como haba (*Vicia faba L.*). Se evaluaron 8 variedades colectadas que se denominan localmente como (Bordo (Br), Criolla (Cr), F Can-110 (Fc), Icamex-v31 (Ic), Líbano morada (Lm), Diamante (Dm), Toluca o Tarragona (Tr), y Zacatecas-22 (Zc)); muestras colectadas de cultivos establecidos en la región Noroeste del estado de Tlaxcala, coordenadas 19.657229N, -98.335549W, México. Las semillas fueron cosechadas en el ciclo primavera-verano del año 2017, la selección se realizó al

azar de manera manual, y se depuraron semillas dañadas e impurezas. Se colectaron muestras de 10 kg por cada variedad, para usarlas durante la experimentación dentro del “Laboratorio de Prueba de Materiales”, donde se realizaron diferentes ensayos. De acuerdo con la metodología desarrollada por (Gupta & Das, 2000) y (Saiedirad et al., 2008), se realizaron las pruebas en como se explica a continuación.

3.4.2 Contenido de humedad.

Se determinó de una muestra aleatoria de 1000g de semilla por muestra para las 8 variedades de haba, empleando el método de secado al horno a 103 °C durante 72 h, norma ASABE 352.2 (ASABE, 2006). El cual coincide en gran medida con (ISTA, 2005), este último sugiere en (*Vicia Spp*), moler la muestra, para lo que se utilizó un molino modelo (Tecator Cyclotec Sample Mill, Hecho en Suecia, 570W, 110V, 60 Hz), de igual modo (Cucci, Lacolla, Summo, & Pasqualone, 2019) indicaron éste método a 105°C. El contenido de humedad H_f en base húmeda (b.h.) se registró a la par de las muestras usadas en el ensayo de compresión, mediante la Ecuación (1) que requiere medir el peso húmedo P_i y el peso seco P_f en gramos [g].

$$H_f = \frac{(P_i - P_f) * 100}{P_i} \quad (1)$$

3.4.3 Forma y tamaño.

Las dimensiones en el eje X L_x , el eje Y L_y , y eje Z, L_z , en milímetros [mm], ver Figura 3.1, fueron tomadas con un pie de rey con precisión de 0.01 mm y para el caso del grosor de la cáscara G (tegumento), se usó un micrómetro con precisión 0.001 mm, este último equipado con puntas con terminación esférica de 2 mm de diámetro. (ambos de la marca Mitutoyo).

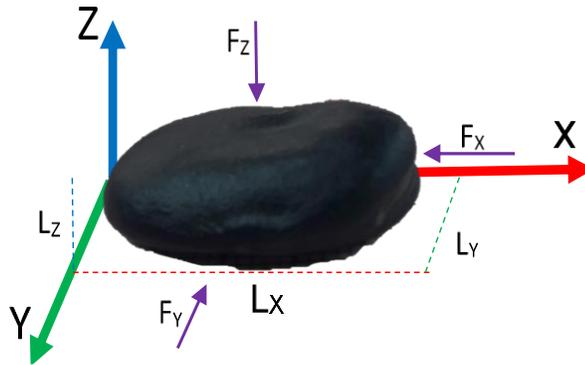


Figura 3.1. Orientación de las muestras (grano de haba) respecto a los ejes de prueba.

Para obtener la forma, se correlaciona el diámetro medio aritmético D_a , diámetro medio geométrico D_g y la esfericidad ϕ , se utilizó la Ecuación (2), (3) y ecuación (4) respectivamente.

$$D_a = \frac{(L_x + L_y + L_z)}{3} \quad (2)$$

$$D_g = (L_x * L_y * L_z)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$\phi = \left[\frac{(L_x * L_y * L_z)^{\frac{1}{3}}}{L_x} \right] * 100 \quad (4)$$

3.4.4 Área superficial.

De los datos recabados de las muestras en cuanto a sus dimensiones, se usaron mediante la ecuación (5), sugerida por (Jain & Bal, 1997), para obtener el área superficial S.

$$S = \frac{\pi * L_y * L_x^2}{2L_x - L_y} \quad (5)$$

3.4.5 Masa.

Para obtener la masa M [g] se utilizó una balanza electrónica con 0.001 g de precisión, con un tamaño de muestra de 1000 semillas.

3.4.6 Densidad y porosidad

La densidad se define como la relación entre masa del producto y su volumen. En granos se distinguen dos tipos de densidad; la densidad aparente ρ_a [g/cm³] (densidad del grano individual) y la densidad a granel ρ_g [g/cm³]. La densidad aparente se determinó mediante el método de desplazamiento del líquido, en un recipiente aforado con precisión de 1 ml (1ml = 1cm³), se agregaron 100 ml de agua destilada, después se introdujeron 30 semillas y antes de que la semilla absorba el líquido, se toma la lectura (tiempo menor a 10 segundos), Ecuación (6); La densidad a granel se tomó mediante el uso de un recipiente aforado de 500 ml, se llenan los 500 ml y enraza con granos de haba sin compactar, las unidades se muestran en [g/cm³], Ecuación (7).

La porosidad ε es calculada ente la densidad aparente y la densidad a granel, Ecuación (8).

Para los cálculos de densidad y porosidad se realizaron 30 repeticiones de cada lectura.

$$\rho_a = \frac{\text{masa de 30 semillas}}{\text{volumen desplazado de agua}} \quad (6)$$

$$\rho_g = \frac{\text{masa de las semillas en el volumen fijo}}{\text{volumen fijo en 500 ml}} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \left[1 - \frac{\rho_a}{\rho_g} \right] * 100 \quad (8)$$

3.4.7 Medición de las propiedades mecánicas.

En cada una de las variedades se evaluaron las propiedades mecánicas: módulo proporcional de deformabilidad, deformación en el punto de ruptura de la cascara del grano (tegumento), fuerza de ruptura, energía absorbida, y consumo específico de energía hasta el punto de ruptura de la cáscara del grano. La evaluación de las propiedades mecánicas de las semillas, excepto el consumo específico de energía fue realizado mediante pruebas de compresión axial con placas paralelas en tres planos diferentes (longitudinal, horizontal y transversal) a granos individuales tomados al azar por cada variedad, 30 repeticiones. Las pruebas se realizaron con una máquina de ensayos universal (Instron ® modelo 3382 “Instron, Corp., Norwood, MA, USA” con una célula de carga de 100 kN (kilo Newton)). a una velocidad de desplazamiento de la cruceta de 2 mm min⁻¹, recomendación de (ASAE, 2005), para semillas, 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 del grano. La información fue recabada por el Software BlueHill 2.0® (Instron®, 2006). A partir de la información registrada en cada ensayo se determinó el módulo proporcional de deformabilidad, la fuerza de ruptura, la energía absorbida y la deformación en el punto de ruptura véase Figura 3.2.

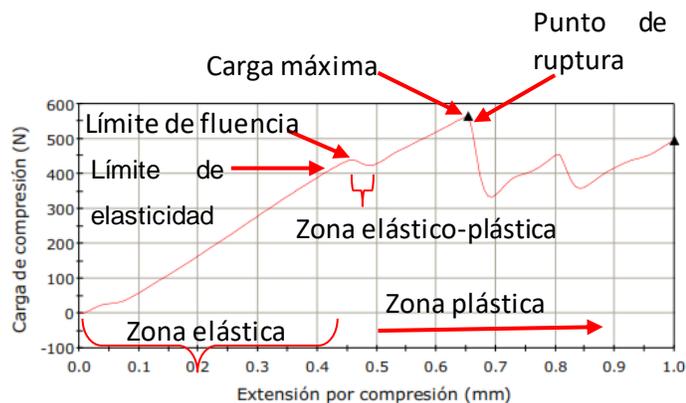


Figura 3.2. Gráfico de Fuerza-Deformación de un ensayo de compresión uniaxial de una semilla de haba en el eje Y.

En la práctica es mejor determinar la rigidez de un material teniendo en cuenta la deformación elástica (deformación recuperable) y la deformación plástica (deformación no recuperable) (Couto, Batista, Peixoto, & Devilla, 2002), se utilizó el método de compresión de materiales biológicos de forma convexa propuesto por (Mohsenin, 1986), para calcular el módulo de deformabilidad, denominado también módulo de elasticidad aparente (ASABE, 2006), basado en la teoría de esfuerzos de contacto de Hertz aplicada en mecánica de sólidos. Este método se utiliza en pruebas de compresión de materiales enteros como semillas, frutas, hortalizas, etc., donde los platos planos de compresión de la máquina de ensayos hacen contacto con un cuerpo de forma convexa. Aplicando la ecuación (9) se determina el módulo de elasticidad aparente E .

$$E = \frac{0.338K^{\frac{3}{2}}(1 - \mu^2)}{D^{3/2}} \left[\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} + \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{R_2} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (9)$$

Donde;

- E : Módulo de deformabilidad o elasticidad aparente [MPa].
- 0.338: Constante
- D : Deformación de la semilla [m]
- F : Fuerza de compresión [N]
- μ : Relación de Poisson [adimensional]
- r_1, R_1 : Radios de curvatura de la semilla convexa en contacto con el plato superior [m]
- r_2, R_2 : Radios de curvatura de la semilla convexa en contacto con el plato inferior [m]
- K : Constante, se determina a partir del $\cos \beta$ con la ecuación (10) y Cuadro 3.1.

Los radios de curvatura R y r se calcularon utilizando la circunscripción de los dos ejes de la semilla que se encuentran en contacto con los platos del equipo, como se muestra en la Figura 3.3 y Figura 3.4.

Para efectuar la circunscripción se utilizaron imágenes en los tres planos de la semilla adquiridas en la prueba de compresión axial. Las imágenes fueron procesadas en los programas de AutoCAD 2018, con el fin de determinar el radio de la circunferencia formada en los dos ejes de la superficie de contacto de la semilla. Las dimensiones en pixeles de las imágenes fueron escaladas a unidades de longitud en milímetros (mm). La Figura 3.4, se muestra el procedimiento para obtener los radios de curvatura R y r .

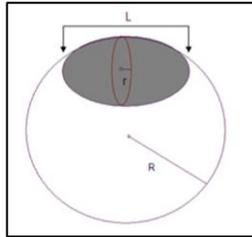


Figura 3.3. Esquema para calcular los radios de curvatura de la semilla en los diferentes planos (Rojas Barahona & Aristizábal Torres, 2012)

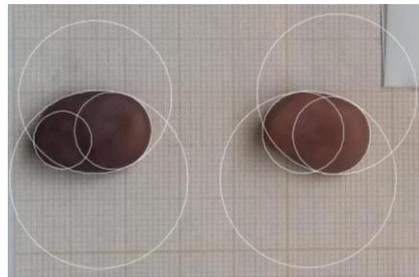


Figura 3.4. Radios de curvatura de dos habas, usando hojas milimétricas para ajustar la escala en el programa AutoCAD 2018.

Para determinar el valor de la constante K , se calculó inicialmente el ángulo de curvatura de las superficies de contacto β formado entre el plano normal del plato de compresión y la curvatura del cuerpo con la ecuación (10).

$$\cos\beta = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{R_1}}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1}} \quad (10)$$

Cuadro 3.1. Valores de la constante K en función del ángulo β

β	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$\cos\beta$	0.6428	0.5736	0.500	0.4226	0.3420	0.2588	0.1736	0.0872	0.0
K	1.198	1.235	1.267	1.293	1.314	1.331	1.342	1.349	1.35

Fuente: Mohsenin, 1986.

A partir del ángulo β de curvatura se halló el valor de la constante K del Cuadro 3.1, la cual es una forma simplificada de una extensa tabla dada por Kosman y

Cunningham (1962), citados por (Mohsenin, 1986) para resolver las ecuaciones cuando los planos de curvatura de dos cuerpos en contacto coinciden.

El módulo de deformabilidad también es función de la relación de Poisson (μ) que se asume como valor constante para cada material, va de 0 a 0.5 y está en función de la deformación del área transversal en el punto de ruptura pero al ser su valor desconocido para la semilla de *Vicia faba L*, se determinó en su lugar otra variable proporcional al módulo de deformabilidad, llamada módulo proporcional de deformabilidad E_p [MPa], para las pruebas en los 3 planos, X, Y, Z; considerando simetría entre los extremos longitudinales de la semilla, utilizando la ecuación simplificada (11) empleada por (Couto et al., 2002).

$$E_p = \frac{E}{(1 - \mu^2)} = \frac{0.338K^{\frac{3}{2}}F}{D^{3/2}} \left[2 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (11)$$

Para el caso del plano transversal, dado que los dos extremos de la semilla no son simétricos, se utilizó la ecuación (12) empleada por (Couto et al., 2002).

$$E_p = \frac{E}{(1 - \mu^2)} = \frac{0.338K^{\frac{3}{2}}F}{D^{3/2}} \left[\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} + \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{R_2} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (12)$$

Todos los ensayos de compresión para determinar E_p fueron realizados respecto a los tres ejes, según el plano o posición de esta entre los platos paralelos de la máquina de ensayos. Estas deformaciones unitarias se eligieron para evaluar el efecto de la deformación D sobre E_p

3.4.8 Medición de la fuerza de ruptura.

En los productos biológicos, como los vegetales, la ruptura o fuerza de fractura puede ser de penetración de la epidermis, agrietamiento y ruptura exterior. Es la falla de la macroestructura (Mohsenin, 1986). La fuerza máxima F [N] hasta el punto de ruptura del tegumento de la semilla D [mm] se determinó durante las pruebas de compresión anteriormente mencionadas, utilizando los datos registrados por el equipo en cada ensayo para la curva Fuerza-Deformación.

3.4.9 Medición del desplazamiento en el punto de ruptura.

Es el desplazamiento relativo desde el origen de la carga en contacto con la muestra D , (desplazamiento en cero) hasta el punto de ruptura del tegumento o sonido de quiebre. Es una magnitud vectorial y va acompañada, en general, por una variación de volumen o de forma (Sharma & Mulvaney, 2003). A partir de los datos registrados en las pruebas de compresión, se determinó la deformación [mm] alcanzada en el instante en que la semilla se fractura.

3.4.10 Medición de la energía absorbida.

La energía absorbida E_a es la resistencia a la compresión hasta la ruptura del material. También se utiliza el término de tenacidad (MJ m^{-3}). El área bajo la curva de fuerza–deformación en el punto de ruptura equivale a la energía que absorbe el cuerpo para llegar al daño macroestructural (Ruíz, 2000). La energía absorbida por la semilla se calculó en cada ensayo como el área bajo la curva fuerza-deformación hasta el punto de ruptura, registrada por el equipo durante el ensayo de compresión Figura 3.2. Esta variable se calculó en unidades de Julios [J].

3.4.11 Análisis estadístico.

Primero se analizó si los grupos de datos tenían una distribución normal, para ello se utilizaron tres pruebas de normalidad (Anderson-Darling; Jarque-Bera; Kolmogórov-Smirnov); (Alonso & Montenegro, 2015) concluyeron que de 8 pruebas de normalidad evaluadas, cuando el tamaño de muestra es grande ninguna de las pruebas tiene un mejor poder que las demás, y en tamaños de muestra pequeño, la prueba con mayor poder de cometer el error tipo I de rechazar la normalidad fue la de Kolmogórov-Smirnov test, en distintas distribuciones. Para el caso de una distribución normal, la prueba Jarque-Bera, presento mejor poder que las demás pruebas, es decir presentó la menor probabilidad de cometer el error tipo I, de rechazar que los datos tienen una

distribución normal; para evaluar la normalidad en las pruebas mencionadas, se utilizó el software Matlab versión R2017a.

Las propiedades mecánicas fueron analizadas con un diseño completamente aleatorizado. La fuerza de ruptura, deformación en la ruptura, la energía absorbida y el consumo específico de energía, se realizó bajo un arreglo factorial 8x3 (factor 1: variedad, factor 2: orientación, con tres planos de orientación del grano de haba). Los resultados fueron analizados a partir de la prueba F, utilizada para determinar el efecto significativo de cada tratamiento, para identificar diferencias significativas entre las medias, se utilizó la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0,05$). El análisis estadístico fue realizado con el paquete SAS ® versión 8.0.

3.5 Resultados y discusión

3.5.1 Normalidad de los datos

Resultados de las pruebas de normalidad, se encontró que todos los grupos de datos tienden a la normal con un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0,05$). Esto se debe principalmente a que se realizaron como mínimo 30 repeticiones para cada medición.

3.5.2 Contenido de humedad

Se tomó la humedad de las muestras sujetas a prueba de compresión axial, encontrando que oscilan alrededor del 9 % de humedad $\pm 1\%$ de (b.h.) a excepción de la variedad Icamex y Tarragona, las cuales coinciden con dimensiones mayores, ver Figura 3.5.

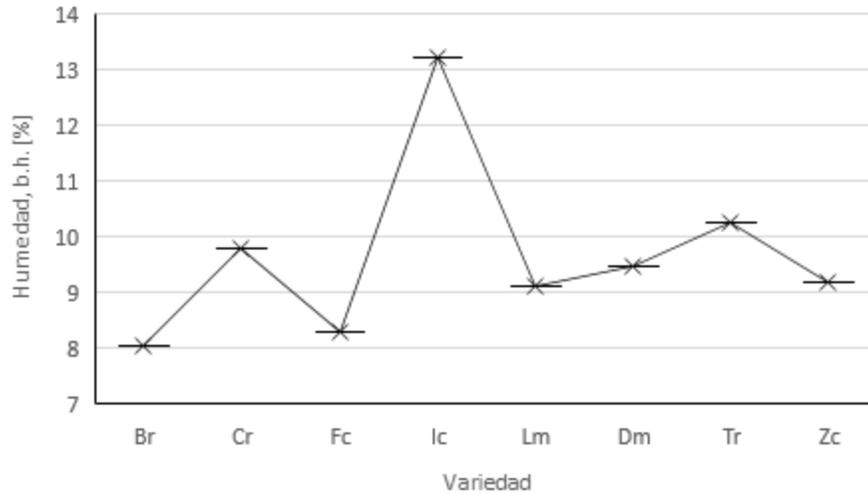


Figura 3.5. Humedad vs ocho variedades de haba.

3.5.3 Dimensiones

De la Figura 3.6, se observa que las dimensiones de las muestras Fc son los granos más pequeños y Tr son los más grandes de las 8 variedades, para las otras variedades se encuentran en rangos similares en cuanto a sus dimensiones. La dimensión en Z o el grosor, es la dimensión más homogénea en cuanto a su varianza y la dimensión en X es la menos homogénea, para dicha grafica se utilizaron una n=30 para cada eje en cada variedad.

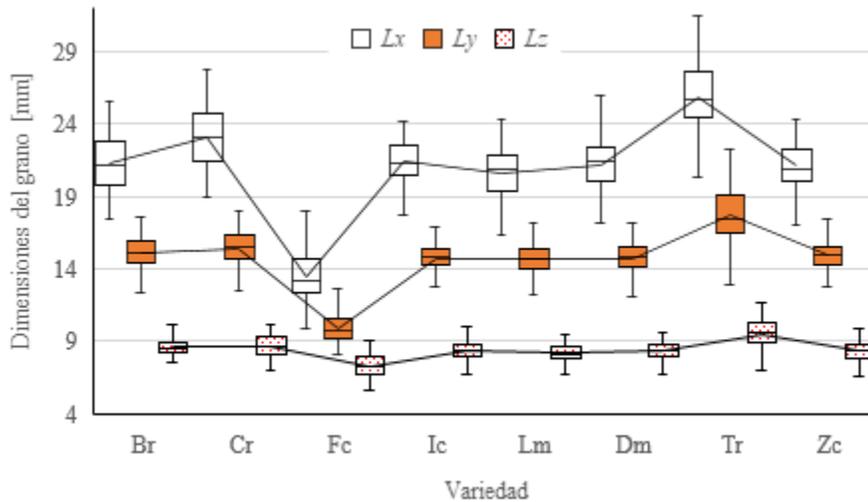


Figura 3.6. Dimensiones de los ejes X, Y y Z, vs ocho variedades de haba.

3.5.4 Área superficial.

En la Figura 3.7 se observa el cálculo del área superficial para las 8 variedades de haba. El valor promedio es de 7.65cm², y va desde 2.19 a 16.49 cm², este último valor corresponde a la variedad Tr, la cual es visiblemente más grande que las demás variedades.

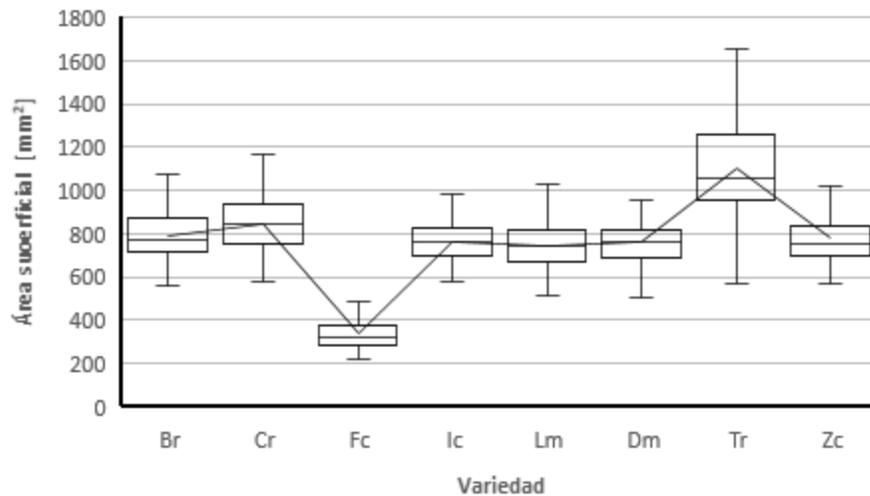


Figura 3.7. Área superficial del grano vs ocho variedades de haba.

3.5.5 Grosor del tegumento

En la Figura 3.8 se aprecia que el grosor G_x y G_y es similar y oscila entre 0.14 y 0.18 [mm], y el grosor G_z es más grueso entre 0.16 y 0.37 [mm], para este caso G_z corresponde al grosor de la periferia del grano de haba.

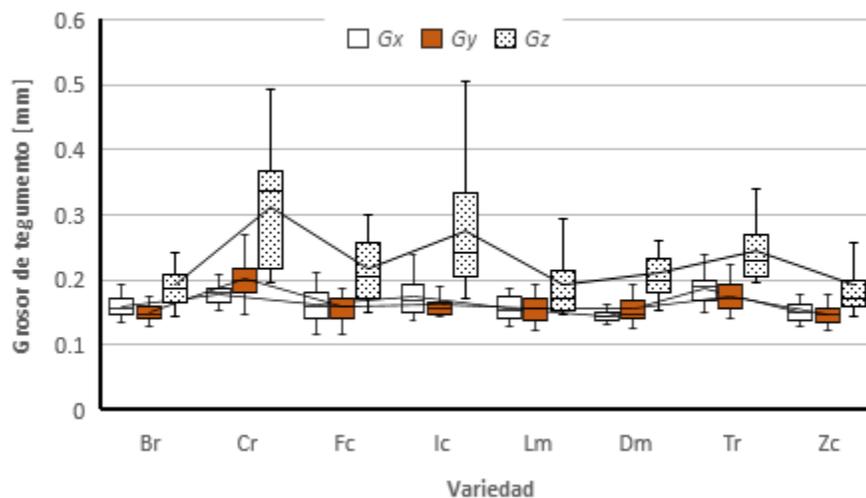


Figura 3.8. Grosor del tegumento [mm] vs ocho variedades de haba.

3.5.6 Masa

Los valores de la masa mostrados en la Figura 3.9, representan la masa en gramos por cada semilla, se aprecia que la variedad Tr presenta mayor varianza y la variedad Lm presenta la menor varianza o mayor homogeneidad en cuanto a su masa, la variedad de menor masa es Fc con una media de 0.7 g por semilla.

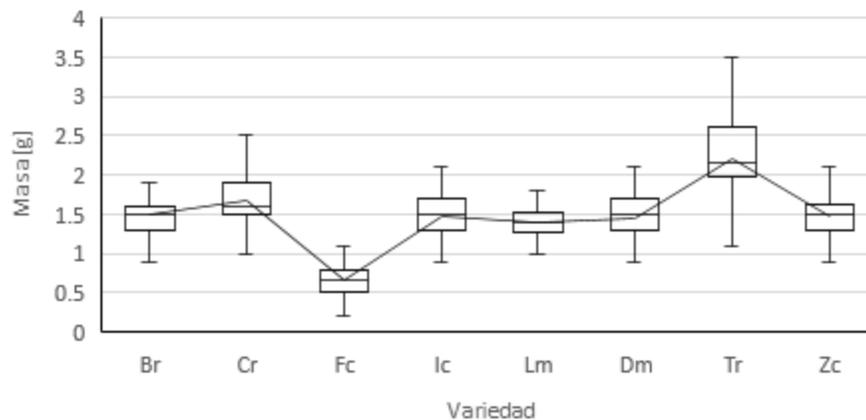


Figura 3.9. Valores de Masa vs ocho variedades de haba

3.5.7 Densidad y porosidad

De las mediciones realizadas, se muestra en la Figura 3.10, los resultados obtenidos, se aprecia para la densidad a granel, que la varianza es tan pequeña (± 2 gramos en 500 cm^3) que no se aprecia en la gráfica de caja.

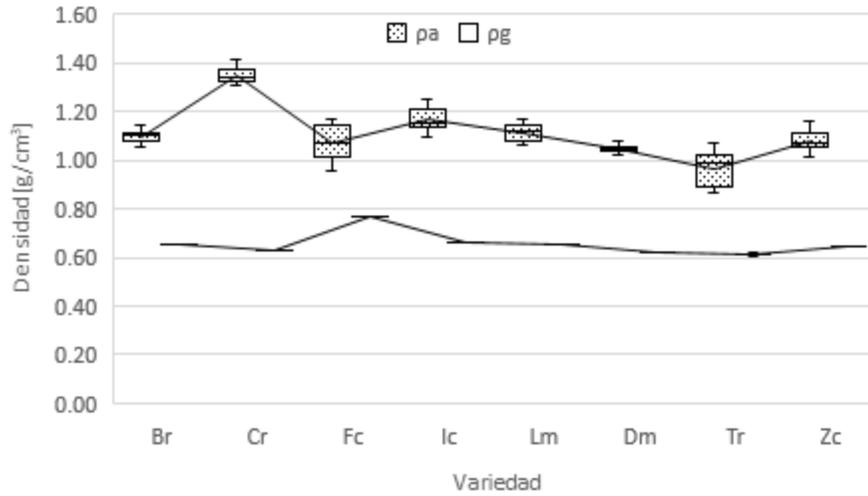


Figura 3.10. Densidad aparente ρ_a y densidad a granel ρ_g vs ocho variedades de haba.

Para la porosidad ϵ como se menciona en la metodología es calculada una vez obtenida la densidad aparente y la densidad a granel, véase Figura 3.11.

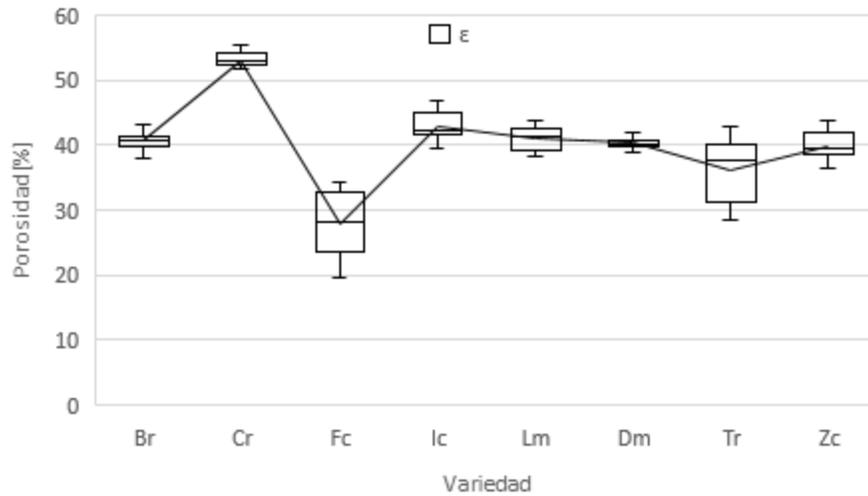


Figura 3.11. Porosidad vs ocho variedades de haba

3.5.8 Diámetro medio geométrico y diámetro media aritmético

El diámetro medio aritmético (D_a), y el diámetro medio geométrico (D_g), oscilaron alrededor de 14 mm. véase Figura 3.12.

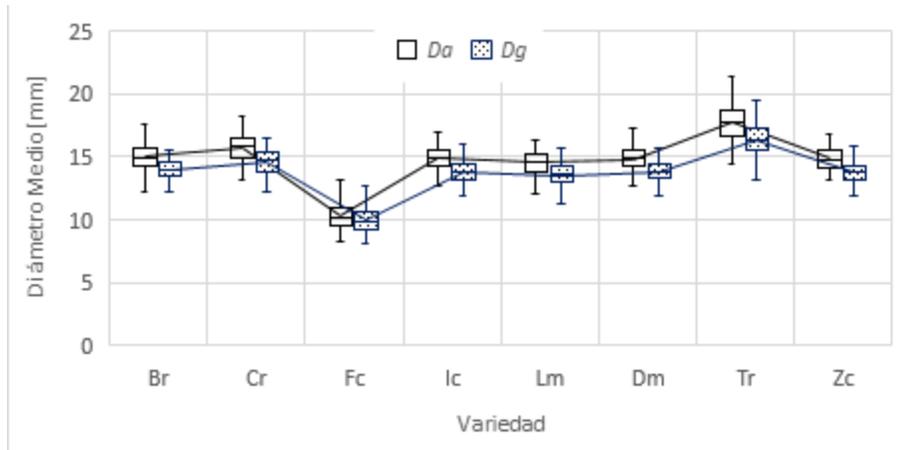


Figura 3.12. Diámetro medio aritmético y diámetro medio geométrico vs ocho variedades de haba.

3.5.9 Esfericidad

La esfericidad Φ se calculó como se muestra en la Figura 3.13, mediante la relación de las dimensiones la densidad a granel.

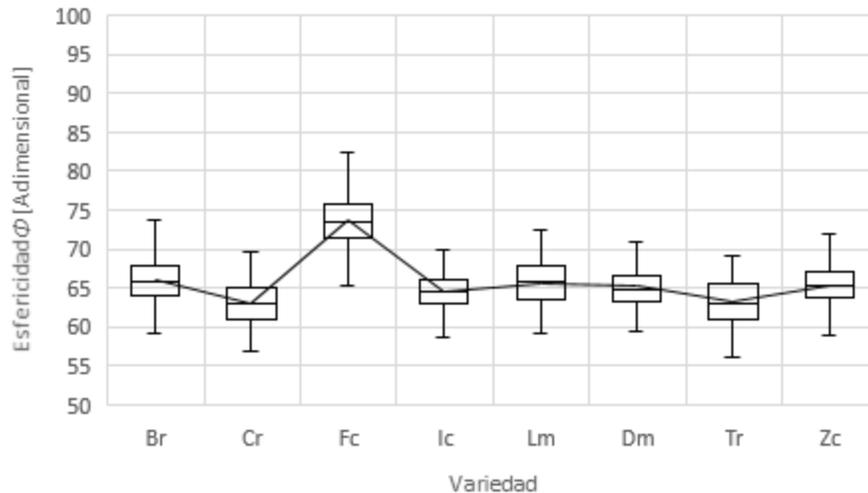


Figura 3.13. Esfericidad para 8 variedades de haba

3.5.10 Resistencia a la compresión

De las pruebas se obtuvieron como se muestra en la Figura 3.14, los comportamientos de la fuerza en el punto de ruptura, donde la media para el eje X, Y y Z, oscila alrededor de 400N, 390N y 670 N, respectivamente. La variedad Sc, requirió una mayor fuerza en el Eje Z, Tarragona en el eje Y y F-can 110 en

el eje X. el eje Z de igual modo es el que mayor fuerza requiere para lograr la ruptura del tegumento, y el eje Y es el que en general requiere menor fuerza para lograr dicha ruptura.

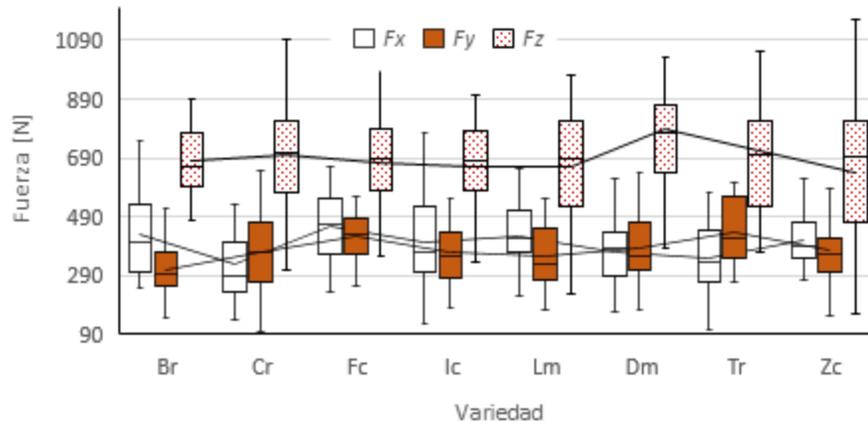


Figura 3.14. Gráfico de la Carga Máxima en el punto de ruptura del grano para 8 variedades de haba, unidades en Newtons

3.5.11 Desplazamiento

Se aprecia en la Figura 3.15, los valores del desplazamiento de las muestras hasta el punto de ruptura del grano, se tomaron para este gráfico una n=30 para cada eje, los valores para el eje X y eje Y, largo y ancho respectivamente, son más homogéneos que para el Eje Z. La variedad Fc presenta valores homogéneos de media y varianza en sus 3 ejes, y la variedad Ic presenta valores más alejados con una mayor varianza.

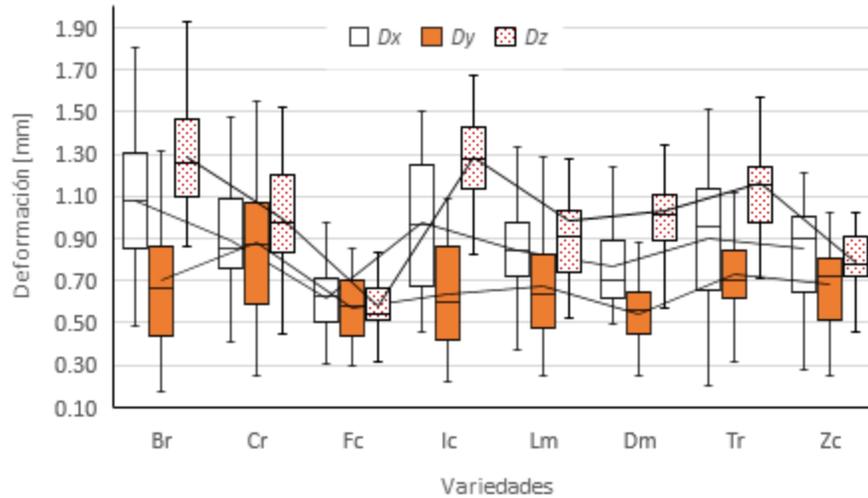


Figura 3.15. Gráfica del desplazamiento en el punto de deformación del grano de haba de 8 variedades.

3.5.12 Energía absorbida

En la Figura 3.16, se muestra los datos de la energía absorbida E_a en Joules [J], para 8 variedades de haba, para los valores del eje X y eje Y, se aprecia cierta relación cercana, estando por encima el valor para el eje Z, seguido de la energía del eje X, y con menor energía el eje Y, este último es el eje que menos energía requiere para romper el tegumento del grano.

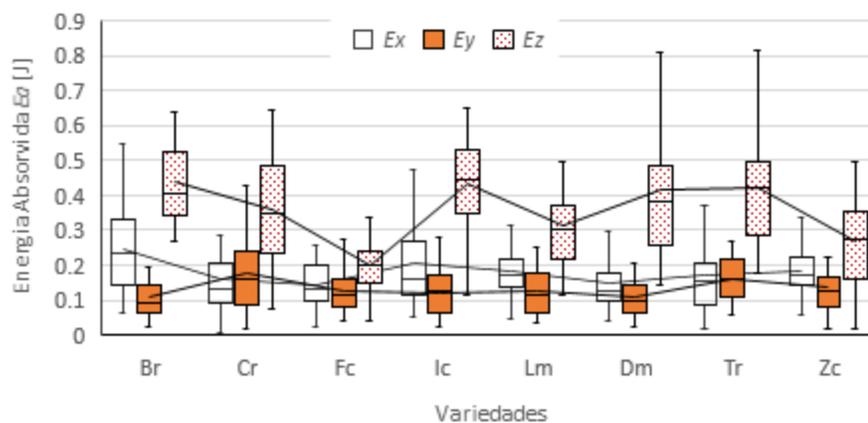


Figura 3.16. Valores de la Energía Absorbida durante la prueba de compresión axial para cada eje de coordenadas del grano de haba para ocho variedades, hasta el punto de ruptura del tegumento.

3.5.13 Módulo proporcional de deformabilidad

En la Figura 3.17, se aprecian los valores en Mega pascales del módulo proporcional de deformabilidad que es una aproximación al módulo de deformación para el gráfico de esfuerzo deformación unitaria, de las pruebas de compresión para el grano de haba, se aprecia como la variedad Fc, que posee una morfología y esfericidad mejor definida presentó un módulo mayor en comparación con las demás variedades, aun cuando es una semilla mucho más pequeña. El eje Y es en su mayoría más bajo que el eje X y Z para esta magnitud, presentando en la variedad Tr y Cr, una menor variación que las demás.

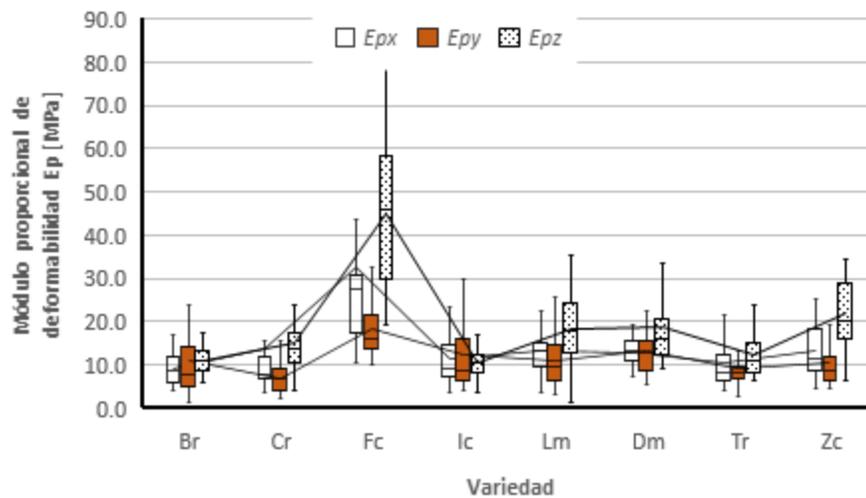


Figura 3.17. Gráfica del módulo proporcional de deformabilidad para ocho variedades de haba.

Los valores del módulo de deformabilidad del caucho oscilan entre 7 a 20 MPa y para madera de abeto Douglas entre 50 a 80 MPa, (Gere & Goodno, 1988) reportaron dichos datos en su libro de Mecánica de Materiales, es poca la información encontrada de dicho parámetro en artículos de compresión axial de granos.

(Altunas y Yildiz 2005) estudio el efecto de la humedad (9.89 a 25.08 % base seca), en las propiedades físico mecánicas del grano de haba, trabajando habas de media para longitud entre 18,40 y 19,77 mm, ancho de 12,54 a 13,66 mm y grosor de 7,00 a 8,03 mm, diámetro medio geométrico de 11,68 a 13,01 mm, masa unitaria de 1,147 a 1.301 g, esfericidad del 63.47% a 65.78%, ángulo de reposo 13.94 ° a 18.58, densidad aparente 419.59 a 381.60 kg / m³, volumen del grano de 0.998 a 1.099 cm³. densidad real de 1151.33 a 1206.21 kg/m³ Porosidad de 63.09 a 67.21% y área superficial de 4.29 a 5.31 cm²; lo cual es congruente con los datos recabados en esta investigación para las 8 variedades estudiadas al 9 % de humedad b.h., encontramos dimensiones medias que van para los ejes X, Y y Z de 13.8 a 25.2 mm, 10.09 a 17.24 mm y 7.41 a 9.23 mm, respectivamente, con lo que se observa un amplio rango debido a que las variedades de haba presentan distintas características lo que hace complejo el desarrollo de equipo mecánico que se adapte a las distintas dimensiones de las variables de los granos, para el diámetro medio geométrico y aritmético se encontró en los rangos que van de 8.26 a 21.32 mm, 8.06 a 19.42 mm, porosidad que va de 19.55 a 55.51 y promedio de 40.24 %, una esfericidad promedio de 65.88. masa del rango de 0.2 a 3.6 g con una media de 1.41 g. Volumen de 0.7 para Fc a 2.25 cm³ para Tr.

(Łysiak & Laskowski, 2004) realizó experimentos con habas encontrando una fuerza de ruptura del grano al 8% de humedad de base seca en 581.6 N con un desplazamiento de 0.44 mm y energía de 1 236.2 N mm⁻¹, con un decrecimiento en los rangos del 8 al 14% de humedad. Y aumento del módulo elástico a partir de sobrepasar dicho porcentaje. Los datos recabados de esta investigación se tiene una energía absorbida media de 0.18 y 0.13 J para los ejes X y Y, y 0.36 J para el eje Z, lo cual es similar a lo que presenta Łysiak en su estudio, y es el valor que presenta mayor homogeneidad en cuanto a las distintas variedades, por lo que, aunque la fuerza de ruptura y el desplazamiento variaron, la energía tiene una tendencia alrededor de dicho valor, por lo que se considera relevante dicho resultado, aunque las semillas más pequeñas y más grandes (f Kan 110 y Tarragona o Toluca) se desvían más de dicho rango.

Para el grosor del tegumento o cáscara del grano de haba, no se encontraron estudios para su correlación, pero dichos valores que oscilan entre 0.15 y 0.23 mm en sus ejes X, Y. Puede ser un valor importante para el diseño de cuchillas de descascarado en este y otros granos con características similares.

Es evidente que para el diseño de equipo de descascarado el eje que menor fuerza-desplazamiento y por ende energía que requiere para retirar el tegumento, es el eje Y, seguido del eje X, por lo que dichos ejes, son óptimos para ejercer la fuerza de acción de descascarado.

En las dimensiones, el eje Z es el que presenta menor variabilidad por lo que es el eje en el que mejor se pueden acomodar los granos respecto a navajas de corte u otros mecanismos.

Para los valores de la masa tiene una media de aproximadamente de 1.41 g por cada semilla, aunque los factores climatológicos y características que aluden a los contenidos químicos de cada variedad presentarán modificaciones en comparación con las variedades colectadas en dicho ciclo y año, así como los nutrientes y manejo agrícola que se realizan en la región donde se colectaron las muestras.

En el caso de la humedad (Al-Mahasneh & Rababah, 2007; Altuntaş & Yıldız, 2007; Mancera Rico et al., 2016; Rojas Barahona, 2010; Rojas Barahona & Aristizábal Torres, 2012; Saiedirad et al., 2008; Singh, Mishra, & Saha, 2010; Sologubik et al., 2013), todos dejan claro que existen variaciones en la energía necesaria para romper el grano cuando esta es distinta, por lo que los equipos diseñados para estos granos, deben tener ajustes que se adapten a las distintas concentraciones de humedad, ya que de otro modo deberá ser necesario acondicionar todo el lote de semillas previo a su introducción a un equipo, lo que se debe valorar en el diseño de beneficios destinados a este cultivo.

La humedad de las muestras corresponde a la humedad de almacenamiento cuando los productores la consideran seca, aun cuando no cuentan con tecnología para medir dicho parámetro, encontrándose que, en 7 de las 8 variedades, oscilo alrededor del 9%.

3.5.14 Análisis estadístico

Se realizó una prueba de análisis de comparación de Tukey, Cuadro 3.2 y Cuadro 3.3. donde se aprecia que los valores medios de dos variedades Fc y Tr se alejan estadísticamente de las otras 6 variedades.

Cuadro 3.2. Análisis de comparación de Tukey, propiedades físicas de ocho variedades de haba del altiplano mexicano.

Trat.	Variable												
	L _x [mm]	L _y [mm]	L _z [mm]	Da [mm]	Dg [mm]	Φ [%]	S [cm ²]	M [g]	G [mm]	V [cm ³]	ρ _a [g/cm ³]	ρ _g [g/cm ³]	ε [%]
Br	21.26c	15.16cb	8.58b	15.00c	14.02c	66.11b	7.918bc	1.49c	0.17d	1.400b	1.10d	0.65d	40.66c
Cr	23.12b	15.44b	8.62b	15.73b	14.53b	63.00d	8.472b	1.66b	0.23a	1.250e	1.34a	0.63f	53.11a
Fc	13.48d	9.93d	7.30d	10.24d	9.91e	73.81a	3.371d	0.65d	0.18cd	0.700f	1.07e	0.77a	27.79e
Ic	21.48c	14.75c	8.36bc	14.86c	13.83cd	64.52cd	7.634c	1.48c	0.20b	1.250e	1.17b	0.66b	43.00b
Lm	20.66c	14.69c	8.18c	14.51c	13.53d	65.676bc	7.440c	1.41c	0.17d	1.300d	1.11c	0.66c	41.00c
Dm	21.13c	14.75c	8.36bc	14.74c	13.74cd	65.410bc	7.581c	1.46c	0.17d	1.400b	1.05f	0.62g	40.37c
Tr	25.83a	17.67a	9.49a	17.66a	16.27a	63.168d	11.028a	2.22a	0.20bc	2.250a	0.97g	0.61h	36.02d
Zc	21.15c	15.01cb	8.33bc	14.83c	13.81cd	65.412bc	7.777c	1.48c	0.16d	1.350c	1.08e	0.65e	39.95c
	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***

Nota: ***, **, *, Significativa o Estadísticamente significativo Alto, Mediano, Bajo, con α=0.001, α=0.01, α=0.05 respectivamente; n=30; medidas con la misma letra no son significativamente diferentes.

Cuadro 3.3. Análisis de comparación de Tukey, propiedades mecánicas de ocho variedades de haba del altiplano mexicano.

Trat.	Variable												
	H [%]	F _x [N]	F _y [N]	F _z [N]	D _x [mm]	D _y [mm]	D _z [mm]	E _{ax} [J]	E _{ay} [J]	E _{az} [J]	E _{px} [MPa]	E _{py} [MPa]	E _{pz} [MPa]
Br	8.04h	432.6ba	310.32b	677.76a	1.08a	0.70ba	1.28a	0.25a	0.12b	0.44a	9.18b	11.13bc	10.96d
Cr	9.8c	327.8c	370.55ba	697.33a	0.88ba	0.88a	0.99bc	0.16b	0.18a	0.36ab	13.77b	6.68c	17.02bcd
Fc	8.3g	453.4a	425.47a	671.78a	0.62c	0.57b	0.58d	0.14b	0.12ab	0.19c	32.5a	18.3a	45.0a
Ic	13.2a	403.2bac	368.77ba	661.26a	0.98ba	0.63b	1.29a	0.20ab	0.12ab	0.43a	11.3b	12.3b	10.5d
Lm	9.1f	425.5bac	356.66ba	661.91a	0.85b	0.67b	0.99bc	0.18ab	0.12ab	0.31abc	13.4b	10.8bc	18.3bc
Dm	9.5d	371.6bac	379.06ba	787.60a	0.76bc	0.55b	1.03b	0.15b	0.11b	0.41a	13.1b	13.5ab	18.6bc
Tr	10.2b	351.5bc	434.66a	711.31a	0.90ba	0.73ba	1.16ba	0.17ab	0.16ab	0.42a	10.5b	9.0bc	12.2cd
Zc	9.2e	409.4bac	378.14ba	641.52a	0.85b	0.68b	0.78dc	0.18ab	0.13ab	0.26bc	13.2b	10.6bc	22.0b
	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***

Nota: ***, **, *, Significativa o Estadísticamente significativo Alto, Mediano, Bajo, con α=0.001, α=0.01, α=0.05 respectivamente; n=30; medidas con la misma letra no son significativamente diferentes.

3.6 Conclusiones

Se logró abundar en características físicas y mecánicas del grano de haba en sus ocho variedades recolectadas, mediante una metodología recabada de distintos artículos de las propiedades de productos agrícolas, las características listadas en el presente sirven de referencia para diseñadores de equipo de cosecha y post cosecha en la toma de decisiones en cuanto a los márgenes de calibración y potencia que equipos para este grano requieren.

Los ejes Y y X son los que menor fuerza y energía requieren para su deformación, no obstante, se encontró que sus valores en algunas variedades como son Fc y Tr se alejan estadísticamente de las demás variedades, por lo que es importante no englobar al grano de haba en una caracterización general.

Resultados como el del presente trabajo, pueden ayudar a establecer características respaldadas para la caracterización de distintas variedades y remarcar su diferenciación en la producción de nuevas variedades en el mercado de semillas criollas, y mejoradas, así como verificar diferentes tratamientos agrícolas y sus efectos en las características intrínsecas de cada cultivo y variedad.

3.7 Referencias Bibliográficas

- Al-Mahasneh, M. A., & Rababah, T. M. (2007). Effect of moisture content on some physical properties of green wheat. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1467-1473. doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.04.045
- Alonso, J. C., & Montenegro, S. (2015). Estudio de Monte Carlo para comparar 8 pruebas de normalidad sobre residuos de mínimos cuadrados ordinarios en presencia de procesos autorregresivos de primer orden. *Estudios Gerenciales*, 31(136), 253-265. doi:<https://doi.org/10.1016/j.estger.2014.12.003>
- Altuntaş, E., & Yıldız, M. (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.

- ASABE. (2006). America Society of Agricultural and Biological Engineers, Moisture Measurement Forages. Asabe Standard S358.2 FEB03, 53th, 608 p.
- ASAE. (2005). Compression test of food materials of convex shape. ASAE S368.4 DEC00:, 52th Edition, 601-608 pp.
- Basu, R. (1995). Seed Viability. In. Seed Quality: Basic Mechanisms and Agricultural Implications. Amarjit, S. Basra. In: Food Products Press. An Imprint of the Haworth PressInc. New York, London, Norwood (Australia).
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. (1992). Drying and storage of grains and oilseeds: Springer Science & Business Media.
- Couto, S., Batista, C. d. S., Peixoto, A. B., & Devilla, I. A. (2002). Comportamento mecânico de frutos de café: módulo de deformidade. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 6(2), 285-294.
- Crépon, K., Marget, P., Peyronnet, C., Carrouee, B., Arese, P., & Duc, G. (2010). Nutritional value of faba bean (*Vicia faba* L.) seeds for feed and food. Field Crops Research, 115(3), 329-339.
- Cucci, G., Lacolla, G., Summo, C., & Pasqualone, A. (2019). Effect of organic and mineral fertilization on faba bean (*Vicia faba* L.). Scientia Horticulturae, 243, 338-343. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.051>
- Duc, G., Bao, S., Baum, M., Redden, B., Sadiki, M., Suso, M. J., . . . Zong, X. (2010). Diversity maintenance and use of *Vicia faba* L. genetic resources. Field Crops Research, 115(3), 270-278.
- FAO, R. (2015). FAOSTAT database. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Foutz, T., Thompson, S., & Evans, M. (1993). Comparison of loading response of packed grain and individual kernels. Transactions of the ASAE, 36(2), 569-576.
- Gere, J. M., & Goodno, B. J. (1988). Mecánica de materiales. Thomson.
- Gupta, R., & Das, S. (2000). Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive loading. Journal of Food Engineering, 46(1), 1-8.
- Instron®. (2006). Instron BlueHill referencia de cálculos, Manual de referencia de software. Instron Corporation.
- ISTA. (2005). International rules for seed testing. Bassersdorf, CH-Switzerland.

- Jain, R., & Bal, S. (1997). Properties of pearl millet. *Journal of agricultural engineering research*, 66(2), 85-91.
- Kachru, R., Gupta, R., & Alam, A. (1994). *Physico-chemical constituents and engineering properties of food crops*: Scientific Publishers.
- Kumar, M. M., Prasad, K., Chandra, T. S., & Debnath, S. (2016). Evaluation of physical properties and hydration kinetics of red lentil (*Lens culinaris*) at different processed levels and soaking temperatures. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*.
- Łysiak, G., & Laskowski, J. (2004). Investigation of mechanical properties of faba bean for grinding behavior prediction. *Acta Agrophysica*, 4(3), 753-762.
- Mancera Rico, A., García de los Santos, G., Zavaleta Mancera, H., Carballo Carballo, A., Carrillo Salazar, J., González Estrada, E., & Villaseñor Perea, C. (2016). Resistencia a ruptura y calidad fisiológica en semillas de maíz bajo compresión axial. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(1), 45-57.
- Mohsenin, N. N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach science publishers, Unites States of America, Second Edition, 1-8.
- Multon, F. (1981). L'Etat actuel des travaux de la commission, *Aliments a humidite, intermedicines du CNERNA Ind. Aliment.* April, 98, 291-302.
- Rojas Barahona, Á. F. (2010). *Caracterización físico-mecánica de la semilla de vitabosa (Mucuna deeringiana)*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín,
- Rojas Barahona, Á. F., & Aristizábal Torres, I. D. (2012). Efecto del contenido de humedad sobre algunas propiedades mecánicas de la semilla de vitabosa (*Mucuna deeringiana*). *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 65(1).
- Ruíz, M. (2000). *Propiedades físicas de productos agrícolas*. Documento Centro ETSI Agrónomos Universidad Politécnica de Madrid.[Links], 2-22.
- Saiedirad, M., Tabatabaeefar, A., Borghei, A., Mirsalehi, M., Badii, F., & Varnamkhasti, M. G. (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(4), 565-572.

- Sharma, S. K., & Mulvaney, S. J. (2003). *Ingeniería de alimentos: operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*.
- SIAP, S. (2016). *Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario estadístico de la información agrícola*.
- Singh, K., Mishra, H., & Saha, S. (2010). Moisture-dependent properties of barnyard millet grain and kernel. *Journal of Food Engineering*, 96(4), 598-606.
- Sologubik, C., Campañone, L. A., Pagano, A. M., & Gely, M. (2013). Effect of moisture content on some physical properties of barley. *Industrial Crops and Products*, 43, 762-767.
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2005). *Física para la ciencia y la tecnología: Electricidad y magnetismo, luz, física moderna (Vol. 2): Reverté*.
- Vilche, C., Gely, M., & Santalla, E. (2003). Physical properties of quinoa seeds. *Biosystems Engineering*, 86(1), 59-65.
- Zohary, D., Hopf, M., & Weiss, E. (2012). *Domestication of Plants in the Old World: The origin and spread of domesticated plants in Southwest Asia, Europe, and the Mediterranean Basin: Oxford University Press on Demand*.

4 APÉNDICES

Apéndice 4.1. Desarrollo de equipo de clasificación mediante la detección de impurezas y residuos de cáscara en el grano de haba.



Figura 4.1. Imagen del equipo de clasificación automática mediante visión artificial para granos de haba

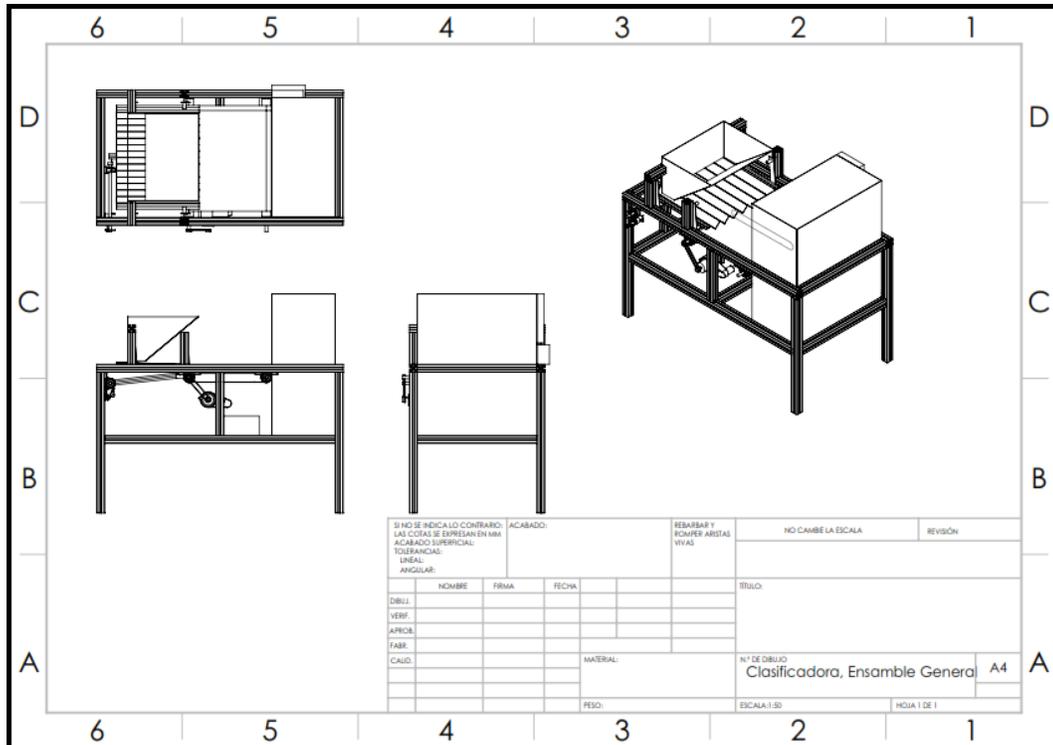


Figura 4.2. Vistas frontal, lateral y superior, así como Isométrico del equipo de clasificación

Como se aprecia en la Figura 4.2, del plano “Clasificadora, Ensamble General”, el equipo consta de los siguientes elementos:

1. 1 Tolva de recepción de semilla o grano.
2. 1 Zaranda con 7 rieles de alineado del grano
3. 1 Banda transportadora
4. 1 Cuarto oscuro de selección
 - Rampa de frenado
 - Espejo
 - Iluminación artificial
5. 1 Procesador (Procesador de escritorio o Laptop) con acelerador de gráficos.
 - Cámara digital < dentro del cuarto oscuro de selección.
6. Sistema electrónico de control
 - Fuente de poder 110V Corriente Alterna (AC) a 12 V Corriente Directa (DC) a 20 A.
 - Transformador de 12V DC a 5 V DC
 - Arduino Mega
 - 2 Modulos L298N
 - 14 Relevadores

- 1 Motor de 12V, eje de ¼ pulgada
 - 1 Motor de 12V, eje de 5/8 pulgada
 - 7 actuadores tipo bobina electroinducida < activan a la detección de impurezas
7. 1 Tolva de recepción del grano 100% sin cáscara
 8. 1 Tolva de recepción del grano con algun porcentaje de cáscara

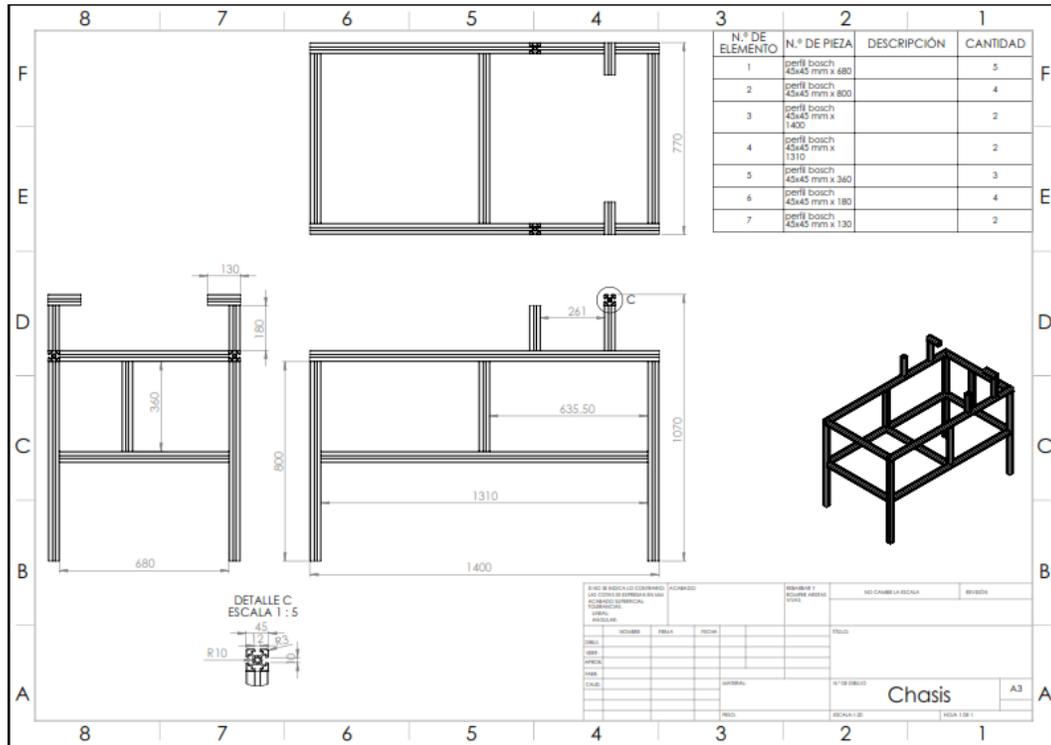


Figura 4.3. Isométrico y vistas de la Estructura de soporte, material aluminio (perfil cuadrado tipo Bosch de 45mm) con uniones en escuadra a 90°, 2 tornillos y tuercas de seguridad por unión.

Como se aprecia en la Figura 4.3, de la estructura de soporte, se utilizó perfil tipo Bosch, aunque puede ser de otro material (acero, madera, polímeros, materiales compuestos, etc), la ventaja del material son las correderas a lo largo de los 4 costados del perfil que permiten recorrer las piezas del ensamble para facilidad de ajustes, principalmente la estructura de Zaranda, véase Figura 4, que debe estar rozando ligeramente la banda transportadora, véase Figura 5, para evitar que la semilla o grano salte durante el movimiento que va de la zaranda a la banda transportadora.

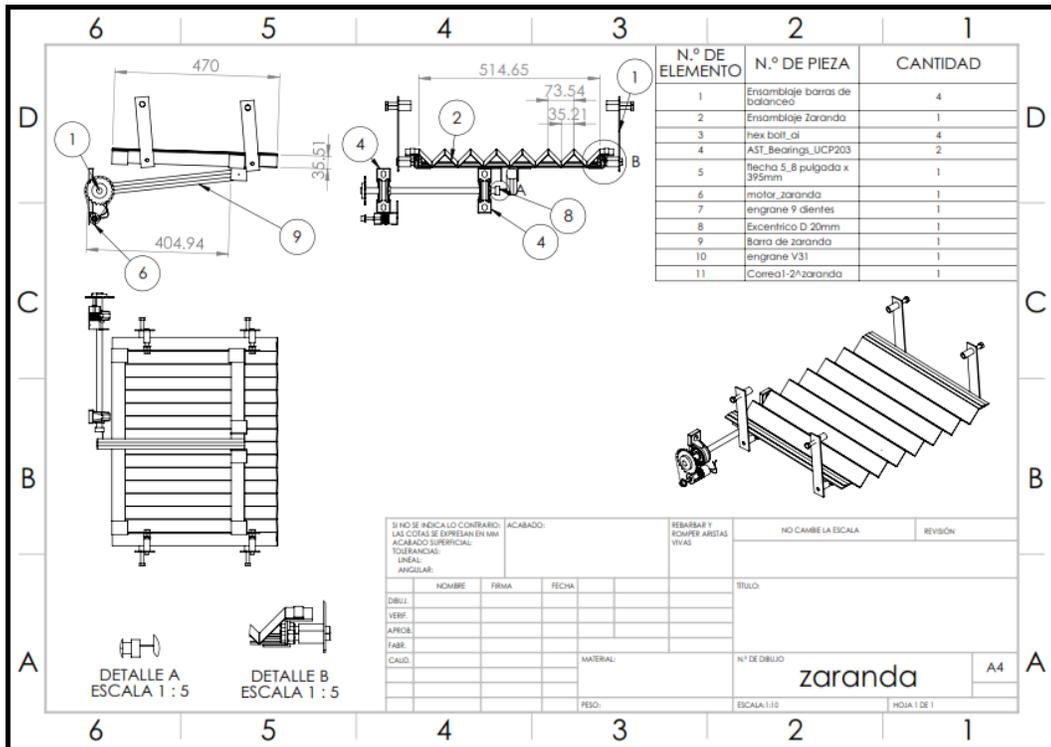


Figura 4.4. Isométrico y vistas de la zaranda del equipo de clasificación.

En la figura 4.4, se aprecia un motor el cual es controlado por el sistema electrónico de control. Donde se puede variar las relaciones a las que gira el motor (6), mediante dos engranes, de 9 y 31 dientes, transmisión por cadena, se elevan las revoluciones a las que gira una flecha que conecta un eje excéntrico “Detalle A” con la barra (9) que permite transmitir un movimiento circular en movimiento oscilatorio de vaivén, tipo horizontal, al estar suspendida la zaranda mediante los cuatro soportes (1), los 4 soportes (1) tienen un ajuste de la variación del ángulo de la zaranda respecto a la horizontal, este último ajustable en un rango de 5 a 15°, dependiendo del tipo de grano y de la velocidad de flujo deseado.

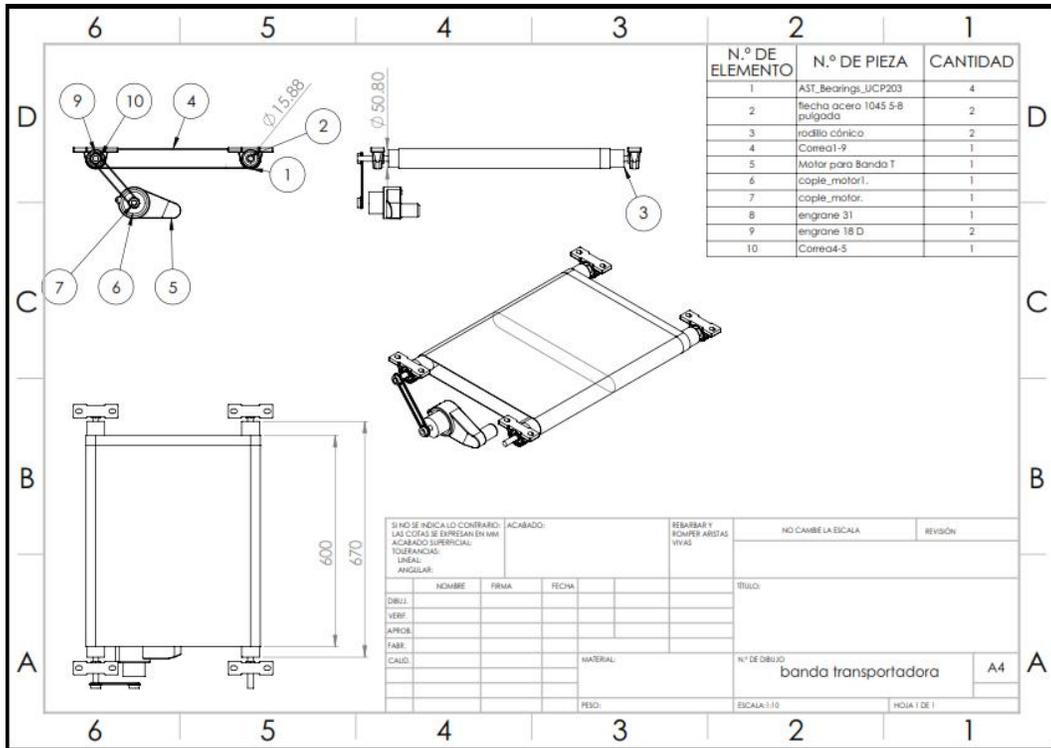


Figura 4.5. Isométrico y vistas de la banda transportadora.

Como se aprecia en la figura 4.5, La banda transportadora requiere de dos cilindros con sus extremos maquinados cónicamente de 0.5° a 1° , con el fin de evitar que la banda se incline a alguno de los costados. Los cuales se soportan mediante una flecha de acero 5/8 de pulgada, con dos bujes por cilindro, estos se fijan a la estructura de soporte mediante 2 chumaceras de 5/8 por cada cilindro, estas chumaceras deberán tensar en el perfil tipo Bosch para evitar que la banda o correa (10) oscile a alguno de los costados de los dos cilindros que la soportan.

La banda transportadora posee un motor que gira de 80 a 110 s^{-1} , y mediante dos engranes del mismo número de dientes, con transmisión por cadena, se logra el avance de la banda la cual tiene la función de transportar el grano de la zaranda a la rampa del cuarto oscuro de selección, así como separar los granos de cada una de las siete hileras de clasificación.

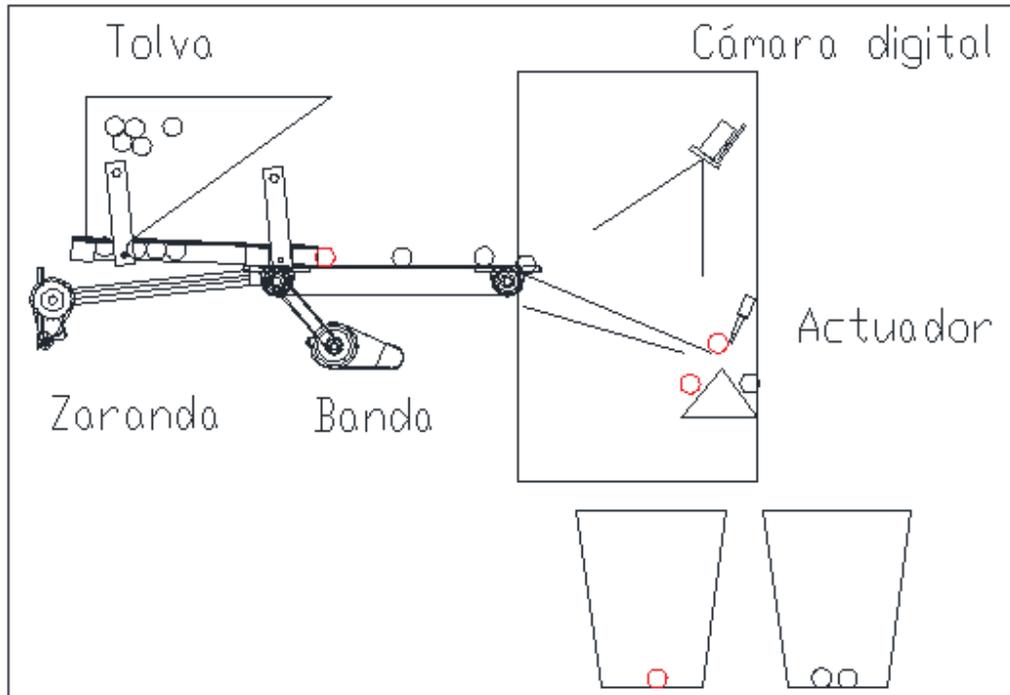


Figura 4.6. Sentido de avance de la semilla o grano de izquierda a derecha.

Como se aprecia en la Figura 4.6, el grano parte de la tolva, se desplaza por gravedad hasta la parte superior de la zaranda, donde, el motor de zaranda genera movimiento oscilatorio y permite desplazar el grano hasta coincidir con la banda, mecanismo que permite que se separen los granos unos de otros, el grano entra al cuarto oscuro, donde se mueve por gravedad en el plano inclinado y mediante una cámara digital y un espejo se aprecia la presencia o ausencia de cáscara, lo que manda una señal al sistema de control electrónico que permite activar o no la pantalla de actuadores (solenoides) y así generar la separación.

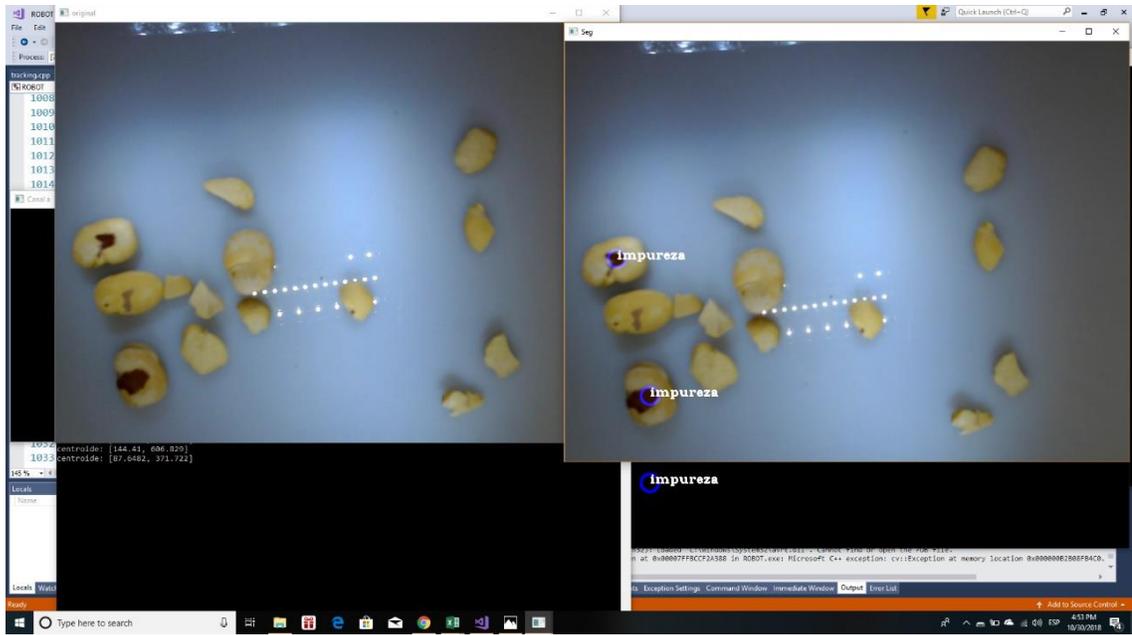


Figura 4.7. Detección de impurezas adheridas al grano mediante el software de visión por computadora.



Figura 4.8. Actuadores ubicados en la parte final de la rampa de frenado.

En los soportes de aluminio se ubican placas de acrílico o plástico para interrumpir el avance del grano o semilla y con ello el impacto desvía el grano a otro contenedor.

La distancia que recorre el actuador es de 1.5 cm por lo que es vital calibrar las pantallas de interrupción en función del grano a separar.

La separación se da en un sentido de (On/Off) o permitir el libre paso o interrumpirlo en base a los rangos calibrados en el software, estos rangos dependerán de los rangos considerados como impurezas, las cuales, al detectarlas, las interrumpe, ocasionando que sean redirigidas por gravedad a otro contenedor, Como se aprecia en la Figura 4.6.