



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA  
EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de  
Recursos Naturales (Ingeniería de procesos)

Tesis de Maestría:

**“Caracterización de las hojas del *Agave  
angustifolia* Haw a la compresión con velocidad de  
ensayo variable.”**

Presenta:

Rey Fernando García Méndez.

Director de tesis:

Dr. Magdaleno Caballero Caballero

Santa Cruz Xoxocotlán, Oax., Junio de 2010



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

*ACTA DE REVISION DE TESIS*

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 03 del mes de mayo del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada **“Caracterización de las hojas del *Agave angustifolia* Haw a la compresión, con velocidad de ensayo variable”**

**García**

Apellido paterno

**Méndez**

materno

**Rey Fernando**

nombre(s)

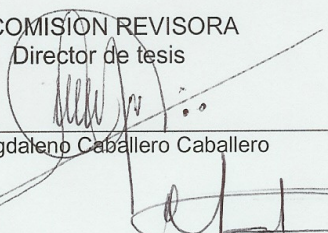
Con registro: 


A	0	8	0	3	6	2
---	---	---	---	---	---	---

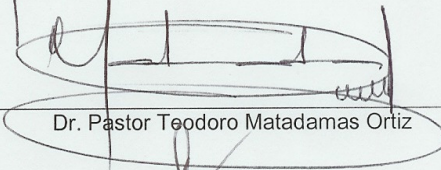
aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

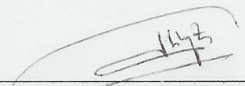
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA  
 Director de tesis

  
 Dr. Magdalena Caballero Caballero

  
 Dr. Juan Alejandro Vazquez Feijoo

  
 Dr. Pastor Teodoro Matadamas Ortiz

  
 Dr. Guillermo Manuel Urriolagoitia Calderón

  
 Dr. Luis Hector Hernández Gómez

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

  
 Dr. Juan Rodríguez Ramírez



CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
 DE INVESTIGACION PARA EL  
 DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
 C.I.I.D.I.R.  
 UNIDAD OAXACA  
 I.P.N.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESION DE DERECHOS*

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día **03** del mes **mayo** del año **2010**, el (la) que suscribe **García Méndez Rey Fernando** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **A080362** , adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Magdaleno Caballero Caballero y cede los derechos del trabajo titulado: **“Caracterización de las hojas del *Agave angustifolia* Haw a la compresión, con velocidad de ensayo variable”** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: [posgradoax@ipn.mx](mailto:posgradoax@ipn.mx) ó [reyklel@hotmail.com](mailto:reyklel@hotmail.com) Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
**García Méndez Rey Fernando**



CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACION PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C.I.I.D.I.R.  
UNIDAD OAXACA  
I.P.N.

## RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas a compresión en hojas del *Agave angustifolia* Haw. La metodología inició con la selección de un diseño de experimentos completamente aleatorio y arreglo factorial  $3^2 \times 2$ , posteriormente se cosecharon hojas de tres diferentes regiones del estado. Se determinaron las características geométricas de las hojas seleccionadas, consecutivamente se extrajeron probetas cúbicas en sentido paralelo y perpendicular a la fibra. Enseguida y a la par, se realizaron los ensayos de contenido de humedad en base a la norma oficial mexicana NOM-116-SSA1-1994 y los ensayos a compresión usando tres diferentes velocidades de deformación (2.54, 14, y 25.4mm/min) en base a la norma ASTM D695. Con los datos obtenidos durante los ensayos a compresión se realizó el análisis estadístico de varianza ANOVA a un nivel de significancia del 5%. Los resultados muestran que las hojas de la región de Tlacolula tienen una humedad de 79%, las hojas de la región de Yautepec tienen 82% de humedad y las hojas de la región de Ejutla 83.25%. Esta diferencia de humedades entre las hojas de una y otra región afecta estadísticamente y en forma significativa ( $P < 0.05$ ) la resistencia a la compresión de las hojas, la deformación y el módulo de elasticidad, pero no así la energía de compresión. El factor posición, es el parámetro más determinante estadísticamente, afecta de forma significativa ( $P < .0001$ ) todas las variables que se evaluaron. El último factor estudiado fue la velocidad de ensayo. El análisis estadístico evidencia que la velocidad de deformación influye significativamente ( $P < 0.05$ ) en las propiedades mecánicas a compresión, a mayor velocidad de deformación, se alcanzan los valores más altos de resistencia, módulo de elasticidad y energía de compresión. Se puede concluir que las hojas son un material anisotrópico y tienen un comportamiento viscoelástico evidenciado con el efecto de la velocidad de ensayo sobre sus propiedades mecánicas a compresión.

**Palabras clave:** Hojas, *Agave angustifolia* Haw, rapidez de variación de la carga, propiedades mecánicas, compresión.

## ABSTRACT

This work presents the obtained results of the mechanical properties to compression in leaves of the *Agave angustifolia* Haw. The methodology initiated with the selection of a completely random design of experiments and factorial adjustment 32x2, later harvested leaves of three different regions from the state. The geometric characteristics of the selected leaves were determined, consecutively cubical test tubes in parallel and perpendicular sense to the fiber was extracted. Immediately and on a par, the tests of moisture content on the basis of official norm Mexican NOM-116-SSA1-1994 and the tests to compression were realized using three different speeds from deformation (2.54, 14, and 25.4mm/min) on the basis of norm ASTM D695. With the data collected during the tests to compression the statistic analysis of variance ANOVA at a level of significance of 5% was realized. The results show that the leaves of the region of Tlacolula have 79% humidity; the leaves of the region of Yautepec have 82% of humidity and the leaves of the region of Ejutla 83.25%. This humidity difference between the leaves of both region statistically affects and in significant form the compressive strenght of the leaves ( $P<0.05$ ), the deformation and the modulus of elasticity, but not therefore the energy of compression. The factor position, is the most determining parameter statistically, affects of significant form all the variables that were evaluated ( $P<0.001$ ). The last studied factor was the speed of test. The statistic analysis evidence that the speed of deformation influences significantly in the mechanical properties to compression ( $P<0.05$ ), at greater speed of deformation, reaches the highest values of resistance, modulus of elasticity and energy of compression. It is possible to be concluded that the leaves are an anisotropic material and have a demonstrated viscoelastic behavior with the effect of the speed of test on their mechanical properties to compression

**Keywords:** Leaves, *Agave angustifolia* Haw, rapidity of variation of the load, mechanical properties, compression.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Instituto Politécnico Nacional, por haberme brindado la oportunidad de estudiar la Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales en el CIIDIR IPN Unidad Oaxaca.

Al Dr. Magdaleno Caballero Caballero y al M. en C. Luis Silva Santos, por sus valiosas aportaciones a este trabajo de Tesis y a mi formación como profesionista.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada durante el periodo de estudio de mi maestría.

Al Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI), por brindarme la oportunidad de ser becario, participando en dos diferentes proyectos de investigación. “Caracterización de las propiedades físico-mecánicas y reología del Agave mezcalero angustifolia Haw con fines de uso industrial”, durante el 2008 dirigida por el M. en C. Luis Silva Santos e “Investigación y desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de fuentes de energía no convencionales en procesos artesanales de baja escala”, durante el 2009, bajo la dirección del Dr. Magdaleno Caballero Caballero.

Al Centro de Servicios de Alta Tecnología (CESAT), de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP), por las facilidades brindadas en el uso de sus laboratorios e instalaciones para llevar a cabo los ensayos, particularmente al Ing. Juan Alberto Pacheco Machorro.

A los integrantes del comité revisor: Dr. Magdaleno Caballero Caballero, Dr. Luis Héctor Hernández Gómez, Dr. Guillermo Manuel Urriolagoitia Calderón, Dr. Juan Alejandro Vazquez Feijoo y Dr. Pastor Teodoro Matadas Ortiz, por sus valiosos comentarios y tiempo dedicado en la mejora de esta tesis de maestría.

A mis compañeros de maestría: Armando José José, Isaí López Hernández, José Luis Montes Bernabé, Carlos Inocencio Cortes Martínez, Luis Alberto Rios Santos, Andrés Gerzaín Martínez Ibáñez, Francisco Javier Contreras Díaz, Jesús Rojas de la Cruz, a mi compañero de doctorado: Raudel Pérez del Río, a todos ellos por su valiosa colaboración en campo y laboratorio para poder llevar a cabo las actividades de este trabajo de tesis.

## **DEDICATORIA**

A Dios, por brindarme la oportunidad de estar en esta vida

A mis padres Magdalena Victoria y

Dionicio García y

A mi hermano Omar David,

por su amor incondicional, ternura y sabios consejos.

A mi hijo Santiago Gael,

por su amor sincero y compañía incondicional

A mi tío, el Ing. Isidro Manuel Méndez Talledos, por

su enseñanza sobre las cosas

más simples de la vida, gracias “Betarriux”

A mis amigos, pocos, por sus consejos siempre oportunos

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
INTRODUCCIÓN .....	xiv
PROBLEMÁTICA .....	xvi
JUSTIFICACIÓN .....	xvii
OBJETIVO GENERAL.....	xix
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	xix
HIPÓTESIS .....	xx
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO .....	1
1.1. Importancia del estudio de las propiedades mecánicas de los materiales agrícolas. ....	2
1.1.1. Propiedades físicas de los materiales agrícolas. ....	2
1.1.2. Propiedades mecánicas .....	5
1.2. Mecánica de materiales .....	6
1.2.1. Esfuerzo .....	7
1.2.2. Deformación unitaria .....	7
1.2.3. Relación entre esfuerzo-deformación unitaria.....	8
1.2.4. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria.....	8
1.2.5. Energía de compresión. ....	10
1.3. Factores que influyen sobre las propiedades mecánicas a compresión de los materiales agrícolas.....	11
1.3.1. Contenido de humedad y dirección de aplicación de la carga .....	11
1.3.1.1. Efecto de la orientación de la fibra y humedad sobre las propiedades mecánicas a compresión.....	16
1.3.1.2. Ensayos a compresión en el <i>Agave angustifolia</i> Haw. ....	18
1.3.2. Velocidad de aplicación de carga en el ensayo.....	19
1.4. Sumario .....	25
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA .....	26



2.1. Diseño del experimento .....	29
2.2. Cosecha de las hojas de <i>Agave angustifolia</i> Haw. ....	31
2.3. Características geométricas de las hojas de <i>Agave angustifolia</i> Haw.....	32
2.4. Extracción de probetas.....	33
2.5. Determinación del contenido de humedad de las hojas del Agave. ....	36
2.6. Condiciones de los ensayos a compresión en las hojas del agave.....	37
2.7. Sumario .....	40
3. RESULTADOS.....	41
3.1. Características geométricas de las hojas de <i>Agave angustifolia</i> Haw. ....	42
3.2. Contenido de humedad.....	42
3.3. Ensayos a compresión.....	44
3.3.1. Esfuerzo Máximo ( $\sigma$ ) .....	44
3.3.2. Deformación unitaria ( $\epsilon$ ).....	51
3.3.3. Módulo de elasticidad ( $E$ ) .....	57
3.3.4. Energía de Compresión ( $T_c$ ) .....	63
3.4. Correlación entre el esfuerzo ( $\sigma$ ), deformación unitaria ( $\epsilon$ ), módulo de elasticidad ( $E$ ) y Energía de compresión ( $T_c$ ).....	69
3.5. Sumario .....	69
DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	70
CONCLUSIONES.....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	74
ANEXOS .....	77
Anexo 1. Ecuaciones empleadas para el análisis estadístico.....	78
Anexo 2. Tablas de los datos codificados de los ensayos a compresión.....	82
Anexo 3 Diagramas esfuerzo-deformación de los ensayos a compresión.....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área superficial contra contenido de humedad en granos de frijol (Eşref, 2007).....	4
Figura 2. Masa de los granos contra contenido de humedad en granos de frijol (Eşref, 2007) ...	4
Figura 3. Esfericidad de los granos contra contenido de humedad, granos de frijol (Eşref, 2007). .....	5
Figura 4. Resistencia al descascarado de los granos de frijol (Eşref, 2007). .....	5
Figura 5. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria, (Núñez, Méndez y Solorza, 2001).....	9
Figura 6. Método para definir el módulo en diagramas no lineales de esfuerzo-deformación, (Núñez et al., 2001). .....	10
Figura 7. Energía de compresión, (Nzuko, 1980). .....	10
Figura 8. Relación entre el contenido de humedad y la edad de la planta (Jekendra,1999). ....	12
Figura 9. Relación entre la humedad y la resistencia al corte (Jekendra, 1999). .....	12
Figura 10. Relación de la humedad, fuerza y deformación, (Al Chakra, 1996). .....	13
Figura 11. Diagrama fuerza-deformación de la nuez, a) en sentido axial y b) en sentido longitudinal, (Mamman, 2005). .....	14
Figura 12. El contenido de humedad afecta las propiedades del módulo de elasticidad de las nueces, (Mamman, 2005). .....	15
Figura 13. El contenido de humedad afecta las propiedades del límite elástico de las nueces, (Mamman, 2005). .....	15
Figura 14. Medias de Esfuerzo, en dirección paralela y perpendicular a las fibras de la yuca y dos contenidos de humedad (Ciro, Largos y Casafús, 2007). .....	16
Figura 15. Medias de deformación unitaria, en dirección paralela y perpendicular a las fibras de la yuca y dos contenidos de humedad (Ciro, Largos y Casafús, 2007). .....	17
Figura 16. Medias del Módulo de elasticidad, en dirección paralela y perpendicular a las fibras de la yuca y dos contenidos de humedad (Ciro, Largos y Casafús, 2007). .....	18
Figura 17. Evolución hacia un comportamiento elástico por aplicación de velocidades de compresión crecientes, (Núñez et al., 2001). .....	20
Figura 18. Curva de fractura del tomate de árbol en dirección longitudinal, a diferentes velocidades de deformación, a) 1mm/s, b) 3mm/s, c) 6mm/s, (Ciro, Vahos y Márquez, 2005). ..	21
Figura 19. Comportamiento del esfuerzo a compresión de las distintas variedades de papas a diferentes velocidades de deformación, (Kistrup, et al., 2000). .....	22

Figura 20. Comportamiento de la deformación de las de las distintas variedades de papas a diferentes velocidades de deformación, (Kistrup, et al., 2000).....	22
Figura 21. Comportamiento del módulo de elasticidad de las distintas variedades de papas a diferentes velocidades de deformación, (Kistrup, et al., 2000).....	23
Figura 22. Diagrama metodológico de los experimentos .....	28
Figura 23. Superficie de las siete regiones principales donde se siembra <i>Agave angustifolia</i> Haw en Oaxaca.....	32
Figura 24. Dimensiones geométricas de las hojas.....	33
Figura 25 . Tamaño de las probetas .....	34
Figura 26. Extracción de probetas cúbicas de las hojas del agave.....	34
Figura 27. Máquina sierra cinta .....	35
Figura 28. Almacenamiento de las probetas en bolsas de plástico.....	36
Figura 29. Balanza analítica. ....	37
Figura 30. Mediciones de las probetas. ....	37
Figura 31. Ventana de programación del equipo. ....	39
Figura 32. Máquina para ensayos estáticos Shimadzu modelo Autograph AGS-J.....	39
Figura 33. Gráfica de contenido de humedad de las regiones 1, 2 Y 3.....	43
Figura 34. Prueba de homogeneidad para los datos de esfuerzo.....	45
Figura 35. Prueba de normalidad para los datos de esfuerzo.....	45
Figura 36. Prueba de independencia para los datos de esfuerzo. ....	46
Figura 37. Gráfica de cajas para el Esfuerzo ( $\sigma$ ). ....	48
Figura 38. Prueba de medias para los factores: a) Región y b) Posición.....	49
Figura 39. LSD y prueba de medias para el factor Velocidad. ....	50
Figura 40. Prueba de homogeneidad para los datos de deformación unitaria. ....	51
Figura 41. Prueba de normalidad para los datos de deformación unitaria. ....	52
Figura 42. Prueba de independencia para los datos de deformación unitaria.....	52
Figura 43. Gráfica de cajas para el análisis descriptivo de la deformación unitaria ( $\epsilon$ ).....	55
Figura 44. Prueba de medias para el factor: a) Región y b) Posición. ....	56
Figura 45. Prueba de medias para el factor Velocidad. ....	56

Figura 46. Prueba de homogeneidad para los datos de módulo de elasticidad. ....	57
Figura 47. Prueba de normalidad para los datos de módulo de elasticidad. ....	58
Figura 48. Prueba de independencia para los datos de módulo de elasticidad.....	58
Figura 49. Gráfica de cajas, del módulo de elasticidad (E). ....	61
Figura 50. Prueba de medias para los factores: a) Región y b) Posición. ....	62
Figura 51. LSD y prueba de medias para el factor Velocidad. ....	62
Figura 52. Prueba de homogeneidad para los datos de la energía de compresión.....	63
Figura 53. Prueba de normalidad para los datos de módulo de elasticidad. ....	64
Figura 54. Prueba de homogeneidad para los datos de módulo de elasticidad. ....	64
Figura 55. Gráfica de cajas para el análisis descriptivo de la energía de compresión (E).....	67
Figura 56. LSD y prueba de medias para el factor Región. ....	67
Figura 57. LSD y prueba de medias para el factor Velocidad. ....	68
Figura 58. Diagrama esfuerzo-deformación.....	71
Figura 59. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R1P1V1 .....	86
Figura 60. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R2P1V1 .....	86
Figura 61. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R1P2V1 .....	87
Figura 62. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R2P2V1 .....	87
Figura 63. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R1P1V2 .....	88
Figura 64. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R2P1V2 .....	88
Figura 65. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R1P2V2 .....	89
Figura 66. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R2P2V2 .....	89
Figura 67. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R1P1V3 .....	90
Figura 68. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R2P1V3 .....	90
Figura 69. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R1P2V3 .....	91
Figura 70. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R2P2V3 .....	91

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efecto de la velocidad sobre las propiedades mecánicas a compresión del garbanzo, (Ravi, et al., 2007).....	24
Tabla 2. Efecto de la velocidad sobre las propiedades mecánicas a compresión el maíz (Ravi, et al., 2007). .....	24
Tabla 3 Efecto de la velocidad sobre las propiedades mecánicas a compresión del arroz hinchado (Ravi, et al., 2007).....	24
Tabla 4. Resumen de los factores y niveles .....	30
Tabla 5. Resumen del diseño experimental.....	30
Tabla 6. Análisis de variancia para los ensayos de compresión en las hojas del <i>Agave angustifolia</i> Haw .....	31
Tabla 7. Características geométricas de las hojas de <i>Agave angustifolia</i> Haw de cada una de las regiones.....	42
Tabla 8. Contenido de humedad en las hojas de agave de cada una de las regiones, expresada en %.....	43
Tabla 9. Análisis de varianza (ANOVA) para el esfuerzo máximo de compresión ( $\sigma$ ).....	46
Tabla 10. Resistencia a la compresión de las hojas ( $\sigma$ ).....	47
Tabla 11. Análisis de varianza (ANOVA) para la deformación unitaria ( $\epsilon$ ) .....	53
Tabla 12. Deformación unitaria de las hojas ( $\epsilon$ ).....	54
Tabla 13. Análisis de varianza (ANOVA) para el Módulo de elasticidad (E).....	59
Tabla 14. Módulo de elasticidad de las hojas (E).....	60
Tabla 15. Análisis de varianza (ANOVA) para la energía de compresión ( $T_c$ ).....	65
Tabla 16. Energía de compresión de las hojas ( $T_c$ ).....	66
Tabla 17. Correlaciones de la variables respuesta .....	69
Tabla 18. Resumen del análisis de varianza ANOVA. ....	70
Tabla 19. Comportamiento de las propiedades mecánicas a compresión de las hoja .....	72
Tabla 20. Datos codificados del Esfuerzo máximo de compresión ( $\sigma$ ).....	82
Tabla 21. Datos codificados para la deformación ( $\epsilon$ ) .....	83

Tabla 22. Datos codificados par el módulo de elasticidad (E).....	84
Tabla 23. Datos codificados para la energía de compresión (Tc). ....	85

## INTRODUCCIÓN

Los agaves son plantas de la familia de las Amarilidáceas, de hojas largas y fibrosas de forma lanceolada, de color verde azulada. Entre esta especie se encuentra el *Agave angustifolia* Haw es la especie que tiene mayor atención por parte de los productores de mezcal, cuya parte aprovechable son el tallo y base de sus hoja, (Durán, 2007), debido a que son las partes donde se concentran la mayor cantidad de azúcares (Robles, 2006).

El estado de Oaxaca presenta 16,185 hectáreas de *Agave angustifolia* Haw sembrada, (Silva, Hernández, Caballero y López, 2009). Cada hectárea en promedio cuenta con 2,500 agaves sembrados, del total de las hectáreas cada año en promedio se cosechan 6,878,625 agaves considerados maduros, (SAGARPA, 2006). Así mismo, las regiones de Tlacolula, Yautepec y Ejutla representan en conjunto el 68.8 % de plantaciones de agave sembradas de todo el estado, el 62.24 % de la cosecha anual y el 63.29 % de la producción en toneladas que son utilizadas en la elaboración del mezcal. La población de Tlacolula se encuentra localizada a 1600 msnm, cuenta con un clima templado, con verano cálido y lluvias en verano y otoño. La población de Yautepec localizada a 860 msnm cuenta con un clima semiseco muy cálido, finalmente, la población de Ejutla se encuentra localizada a 1440 msnm, cuenta con un clima seco semicálido. En estas poblaciones utilizan anualmente 134, 880 Toneladas (t) de agave al año en la producción de mezcal (López, 2008).

En este sentido, los agaves de 8 años de edad, considerado por los productores como maduros, el 45% en relación al peso se emplea en la producción de mezcal y el restante 55% corresponde a las hojas, las cuales son abandonadas en el campo a cielo abierto, contaminando el medio ambiente debido a la forma inapropiada a que son expuestas para su degradación. De esta forma se puede estimar que de las tres regiones se desperdician aproximadamente 15, 896.66 toneladas de hojas. Sin embargo, Silva, Hernández, Caballero y López (2009) y López (2008), mencionan que el porcentaje de fibra que se puede obtener del agave de la variedad *angustifolia* Haw empleando un proceso tradicional representa el 4.92% del peso total de las hojas, por lo que de las tres regiones se tiene un potencial en fibras de 782.11 toneladas que no está siendo aprovechado.

A nivel mundial se está produciendo una acelerada transición hacia una economía sostenible, como consecuencia de los cambios climáticos y del medio ocasionados por el empleo de productos que no son biodegradables, como las fibras sintéticas (Maya y Sabu, 2007). Esta transición se realiza principalmente por el reemplazo en la utilización de petroquímicos a recursos renovables, en este sentido se prevé que las fibras lignocelulósicas derivadas de los tejidos estructurales de las plantas tengan una función importante respecto a las fibras

sintéticas (FAO,2004). Cabe mencionar que el rendimiento que se obtiene actualmente de fibras de *Agave angustifolia* Haw podría mejorarse incorporando tecnología adecuada al proceso de extracción, sin embargo, para ello es necesario determinar las propiedades físicas y mecánicas de las hojas de agave (López, 2008).

En este sentido para determinar las propiedades mecánicas de los materiales agrícolas también llamados parámetros de ingeniería, se han empleado diferentes tipos de ensayos, que establecen las interacciones entre el esfuerzo y la deformación unitaria. Uno de estos ensayos es el de someter a compresión el material y registrar el esfuerzo y la deformación unitaria que se producen. En este tipo de ensayos las principales variables obtenidas son: 1) la fuerza máxima de compresión, 2) el esfuerzo máximo, 3) la deformación unitaria, 4) el aparente módulo de elasticidad y 5) la energía de compresión.

En este trabajo se plantea abordar la problemática de la carencia de conocimientos de las propiedades mecánicas de las hojas del *Agave angustifolia* Haw a través de ensayos a compresión. Por lo que se estudió el efecto que tienen las regiones de donde provienen las hojas, la dirección de la carga y la velocidad de deformación, sobre sus propiedades mecánicas a compresión, esto se realizó con la finalidad de generar la información necesaria para definir su comportamiento.

Esta tesis está estructurada de la siguiente manera: en el capítulo uno se inicia el marco teórico o estado del arte que le da sustento al trabajo de investigación, en el cual se describen las propiedades físicas y mecánicas de los productos agrícolas, necesarios para poder entender e interpretar los resultados de los ensayos de compresión. Así mismo, se dan a conocer las aportaciones y los métodos que han utilizado diferentes investigadores para determinar las propiedades mecánicas a compresión en diferentes tipos de vegetales.

En el capítulo dos se detalla la metodología del trabajo, en donde se hace mención a las actividades realizadas para la ejecución de los ensayos que permitieron valorar las características mecánicas a compresión de las hojas del agave. En el capítulo tres. Se encuentra descrito el diseño de experimentos, así como los materiales y métodos que se emplearon para llevar a cabo este trabajo de investigación. En el capítulo cuatro. Se muestran los resultados obtenidos de las características físicas, el contenido de humedad de las hojas y los ensayos a compresión, así como el análisis estadístico realizado, finalmente se presenta la discusión de los resultados y las conclusiones obtenidas.



## PROBLEMÁTICA

Actualmente en el Estado de Oaxaca, el *Agave angustifolia* Haw es usado como materia prima para la elaboración de mezcal. De un agave de 8 años de edad, considerado como maduro, el 45% en relación al peso se emplea en la producción de esta bebida y el restante 55% corresponde a las hojas, las cuales son abandonadas en el campo a cielo abierto, contaminando el medio ambiente debido a la forma inapropiada a que son expuestas para su degradación. En la actualidad, de estas hojas se extraen fibras por un proceso tradicional denominado enriado. De esta forma se obtiene un rendimiento en fibras del 2.61% con respecto al peso total del agave, en un tiempo de 17 a 20 días dependiendo de las condiciones atmosféricas de la región (López, 2008).

Estudios relacionados con la extracción de fibras de agaves similares al *angustifolia* Haw, demostraron que es posible obtener mayor cantidad de producto y mayores beneficios para los productores usando un proceso tecnificado (Mayorga, Rossel, Ortiz, Quero y Amante, 2004). Pero como mencionan Mohsenin (1986); Sitkei (1986); Buitrago, et al. (2004), Eşref y Halil (2007) y Seyed, Emadzadeh, y Mohammad (2007), ya sea para el análisis del comportamiento del producto manipulado, el diseño de una máquina específica o el desarrollo de procesos mecanizados, es necesario estimar parámetros de ingeniería. Sin embargo, actualmente existe un escaso conocimiento sobre las características mecánicas de las hojas del *Agave angustifolia* Haw, que permitan desarrollar tecnología adecuada para la obtención de fibras, por lo que se hace necesario estudiarlas con el objeto de que los resultados que se obtengan sean empleados en trabajos futuros como el diseño de equipos o tecnología para su transformación, en el caso particular la obtención de fibras, lo cual llevaría a darle un valor agregado a las hojas.

En este trabajo de investigación se plantea abordar la problemática de la carencia de estudios sobre las características mecánicas de las hojas, a partir de la revisión de estudios hechos sobre diferentes materiales agrícolas, por lo que esta tesis aportará a la generación del conocimiento, el comportamiento mecánico a ensayos de compresión de las hojas del agave de ocho años, de tres diferentes regiones donde se cosechan este tipo de agaves en el estado de Oaxaca, en dos direcciones, en sentido paralelo y perpendicular a la fibra y utilizando tres velocidades de ensayo. Los ensayos se realizarán hasta causar la ruptura del material y las variables a evaluar serán, el esfuerzo máximo o resistencia a la compresión ( $\sigma$ ), la deformación unitaria ( $\epsilon$ ), el módulo de elasticidad ( $E$ ) y la energía de compresión ( $T_c$ ). Finalmente los datos anteriores servirán para el posterior desarrollo de un protocolo en la generación de tecnología para el desfibrado de las hojas de *Agave angustifolia* Haw.

## JUSTIFICACIÓN

Los recursos naturales desempeñan un papel importante en las actividades económicas de cualquier país y contribuyen sustancialmente al Producto Interno Bruto (PIB). En el caso de los países en desarrollo y subdesarrollados, la utilización de los recursos naturales ayuda al crecimiento social y económico. Actualmente se observa una creciente tendencia mundial hacia el máximo aprovechamiento de los recursos naturales, a su vez la agricultura moderna tiene como objetivo aprovechar de manera integral los cultivos en beneficio de los productores de las comunidades, por lo cual es importante la diversificación y aprovechamiento integral del *Agave angustifolia* Haw cuyo cultivo es substancial en el Estado de Oaxaca ya que cuenta con el 50% de la producción nacional.

Esta importancia no se ha reflejado en investigaciones encaminadas a su aprovechamiento integral, pues es muy poco el trabajo que se ha hecho para diversificar y aprovechar de manera integral la planta, sin embargo, en el CIIDIR IPN Unidad Oaxaca desde hace algunos años se comenzó una línea de investigación en el que se busca el aprovechamiento integral del agave. En este sentido Silva (2002), diseñó una máquina cortadora de agave que se empleó en el proceso de la elaboración de mezcal, con dicha máquina se optimizó en tiempo, rendimiento y esfuerzo de los productores en dicho proceso, por su parte Morales(2008) realizó ingeniería básica en una planta de la industria de mezcal, con la finalidad de optimizar los tiempos y movimientos de los productores en la elaboración de dicha bebida.

Así mismo, dentro de esta línea de investigación se han iniciado con trabajos de ciencias básicas, como ejemplos están José (2008) que estudió y determinó la energía de corte de impacto sobre el *Agave angustifolia* Haw, con la finalidad de obtener algunos parámetros de diseño de una máquina que servirá para la generación de una tecnología en beneficio de los productores de la región. Por su parte López (2008) realizó pruebas de resistencia a la tensión en fibras de las hojas del *Agave angustifolia* Haw, esto con la finalidad de determinar su comportamiento mecánico y con ello establecer sus posibles aplicaciones industriales, al igual que López (2008), Cortes(2009) estudió las propiedades mecánicas a tensión de las fibras pero provenientes del bagazo del *Agave angustifolia* Haw, residuo de la producción artesanal de mezcal, encontró que dichas fibras cortas podrían tener una aplicación industrial. Los valores encontrados son similares a los de otras fibras que ya son empleadas en diferentes aplicaciones. Finalmente, Montes (2009) estudió el efecto de la adición de fibra de bagazo de *Agave angustifolia* Haw en la resistencia a la flexión y compresión del adobe compactado, encontró que al adicionar fibra de bagazo mejora significativamente la resistencia del adobe, por lo que esta podría ser una alternativa para usar este material considerado un desperdicio.

Este trabajo busca generar un conocimiento científico a través de la experimentación que determine las propiedades mecánicas a compresión de las hojas del *Agave angustifolia* Haw. Los resultados que se obtengan podrán ser empleados en trabajos futuros el diseño de equipos o tecnología para su transformación, en el caso particular en la obtención de fibras, a su vez en el aspecto económico se busca darle un valor agregado a las hojas del *Agave angustifolia* Haw que son consideradas como un desecho y tienen poco aprovechamiento.

## OBJETIVO GENERAL

Evaluar las propiedades mecánicas a compresión de las hojas del *Agave angustifolia* Haw maduro, en función de la región de donde fue cosechada, de la dirección de carga y de la rapidez de cambio de la deformación, con la finalidad de caracterizar su comportamiento mecánico.

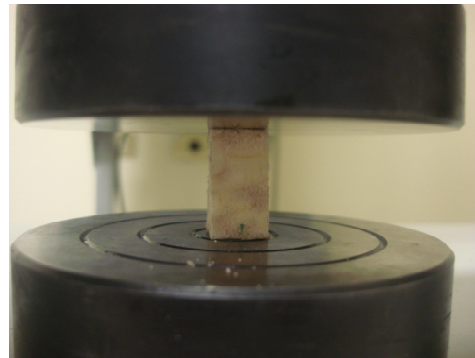
## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar el contenido de humedad de las hojas cosechadas en tres diferentes regiones del estado de Oaxaca, en base a la norma NOM-116-SSA1.
2. Realizar ensayos a compresión en hojas de *Agave angustifolia* Haw que se cosechan en tres regiones ubicadas a tres diferentes alturas del estado de Oaxaca (R), en sentido paralelo y perpendicular a la fibra (P) y utilizando tres velocidades de deformación (V), bajo las norma ASTM D695.
3. Analizar el efecto de la región (R) donde se cosecharon las plantas, sobre la resistencia a la compresión, la deformación unitaria, el módulo de elasticidad y la energía de compresión de las hojas de agave.
4. Analizar el efecto de la dirección de las fibras (P) (paralela y perpendicular), la resistencia a la compresión, la deformación unitaria, el módulo de elasticidad y la energía de compresión de las hojas de agave.
5. Analizar el efecto de la velocidad de deformación (V) sobre la resistencia a la compresión, la deformación unitaria, el módulo de elasticidad y la energía de compresión de las hojas de agave.
6. Analizar el comportamiento mecánico a la compresión de las hojas en función de la región de donde se cosechó la planta (R), de la dirección de las fibras (P) y la velocidad de deformación (V).
7. Determinar el tipo de comportamiento característico a compresión del diagrama esfuerzo-deformación unitaria, obtenido durante el ensayo.

## HIPÓTESIS

H1: La humedad de las hojas de *Agave angustifolia* Haw depende de la región donde se cosechan, esta diferencia de humedades afecta sus propiedades mecánicas a la compresión.

H2: La resistencia a la compresión, la deformación unitaria, el módulo de elasticidad y la energía de compresión de las hojas de *Agave angustifolia* Haw, están en función de la región donde se cosechó la planta(R), de la dirección de las fibras (P) y de la velocidad de deformación (V)



## CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

La caracterización mecánica de materiales es una tarea que tiene una amplia aplicación en las áreas de investigación y desarrollo. Esta información permite en optimizar las aplicaciones de los materiales, haciendo un uso más racional. Esta actividad comprende desde determinar las propiedades mecánicas de materiales, hasta evaluar cuestiones muy específicas tales como fractura, fatiga, frotamiento, fluencia, viscoelasticidad, entre otros temas, solo por mencionar algunos aspectos. Prácticamente, en todos los laboratorios de pruebas de materiales se realiza esta tarea. Para este efecto, se requiere realizar pruebas de materiales bajo diversas consideraciones. Como ejemplo de lo anterior, se puede mencionar a los trabajos de investigación reportados por Villa et al. (2007).

En este capítulo se describen las características de los materiales agrícolas, que son necesarias para poder interpretar los resultados de los ensayos a compresión. También, se presentan investigaciones encaminadas a determinar las propiedades mecánicas a compresión y los factores que más influyen sobre estas. El procedimiento experimental empleado en cada uno de estos trabajos, sirven como referencia para establecer la metodología empleada en esta investigación.

### **1.1. Importancia del estudio de las propiedades mecánicas de los materiales agrícolas.**

El estudio de las propiedades físicas y mecánicas de los vegetales hoy en día tiene una gran importancia debido a que con éstas se logra:

- Diseñar y construir maquinaria y equipo para la manipulación, transporte y almacenaje de los productos.
- Mejorar la calidad de los productos para que estas tengan mayor aceptación en los mercados.
- Diseñar y adecuar los procesos de industrialización de los productos.

#### **1.1.1. Propiedades físicas de los materiales agrícolas.**

Cuando las propiedades físicas de los granos, semillas, frutas y hortalizas, huevos, forrajes, y fibras son estudiadas, ya sea a granel o en unidades individuales, es necesario estimar el peso, esfericidad, redondez, tamaño, volumen, forma, área, densidad, porosidad, coeficiente de fricción estática, en contra de diferentes materiales, ángulo de reposo. Estos son considerados como parámetros de ingeniería y son utilizados en el diseño de una máquina específica o análisis del comportamiento del producto manipulado (Mohsenin, 1986 y Buitrago, et al., 2004).

Sitkei (1986) menciona que la forma de las semillas, las frutas y las plantas son generalmente irregulares, y sería necesario obtener una gran cantidad de datos de sus medidas para describirlas exactamente. Sin embargo, de forma práctica para caracterizar las diversas formas se puede hacer por su longitud, la anchura y el espesor, en ciertos casos asimila una dimensión lineal. Estas dimensiones geométricas son aquellas que dan la forma y tamaño a un objeto físico y con su conocimiento, el objeto puede ser descrito satisfactoriamente.

En este sentido, Buitrago et al. (2004) determinaron las características físicas de tres diferentes tipos de papas: capiro (*solanum tuberosum* × *solanum andígena*), parda pastusa (*Solanum tuberosum* × *Solanum andígena*) y criolla o yema de huevo (*Solanum phureja*), usando la metodología desarrollada en el Departamento de Ingeniería Agrícola de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, considerando a Mohsenin (1986), concluyó que las características físicas de las tres variedades no variaban.

Kashaninejad, Mortazavi, Safekordi y Tabil (2006) determinaron la geometría de los pistachos, a las que les midieron la longitud, ancho y espesor. El procedimiento lo efectuaron con un calibrador marca Mitutoyo y una exactitud de 0.001mm, de lo cual encontraron que las

características geométricas del pistacho varían de acuerdo a su contenido de humedad, debido a que todas las dimensiones geométricas del pistacho disminuyen con el decremento del contenido de humedad, debido a su alta correlación. Del mismo modo, Seyed, et al. (2007) encontraron que las características físicas del pistacho están en función de su contenido de humedad y variedad, ya que al aumentar el contenido de humedad el volumen de cada nuez de pistacho y su semilla aumentan, así mismo la porosidad disminuye linealmente con el contenido de humedad creciente. Por su parte, Eşref et al. (2007) determinaron las dimensiones geométricas de dos diferentes tipos de frijoles. Esto le sirvió para estimar el comportamiento de dichos granos a la acción de un secado, concluyó que el tamaño de los granos está relacionados con su contenido de humedad, debido a que a medida que aumenta de tamaño, el contenido de humedad también, esto es, que de los granos blancos con un tamaño entre 9.71 a 10.48 mm, el contenido de humedad aumentó entre 9.77% y 19.62%, respectivamente. Tabatabaeefar y Rajabipour (2005) modelaron la manzana a través de sus características geométricas en las que consideró la masa, el volumen y el área posteriormente determinaron el tamaño de la máquina, que la procesaría.

Eşref, et al. (2007) demostraron que para los granos de frijol el contenido de humedad influye directamente en sus propiedades físicas, ya que realizó ensayos a diferentes porcentajes de humedad (9.77, 12.74, 14.68, 16.55 y 19.62%) y encontró que algunas características como el área superficial, la masa y esfericidad aumentan conforme se incrementa el contenido de humedad. La Figura 3 muestra como al acrecentarse la humedad en los granos su área superficial crece en idéntica proporción.



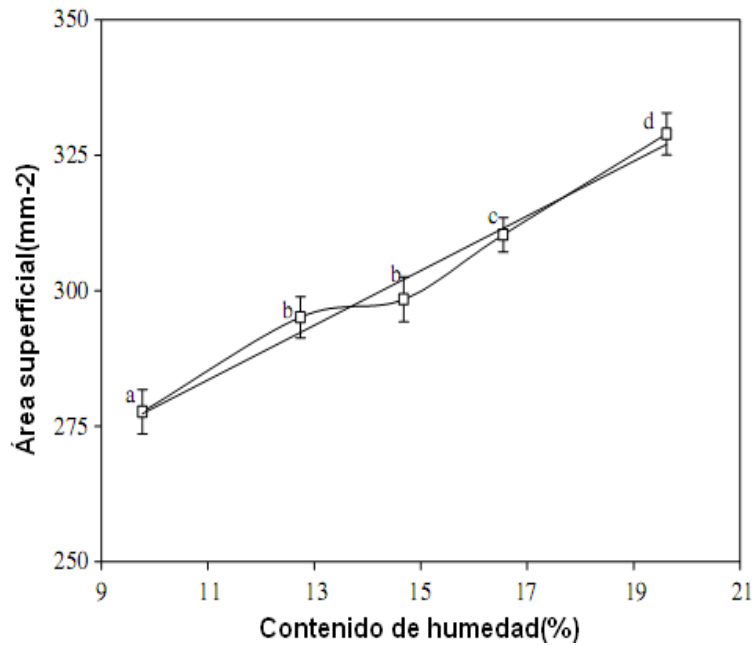


Figura 1. Área superficial contra contenido de humedad en granos de frijol (Eşref, 2007)

Así mismo, la Figura 2 muestra como al aumentar el contenido de humedad en los granos de frijol, su masa aumenta de 520 gr para un contenido de humedad de 9.77%, hasta 555 gr para un contenido de humedad de 19.62%,

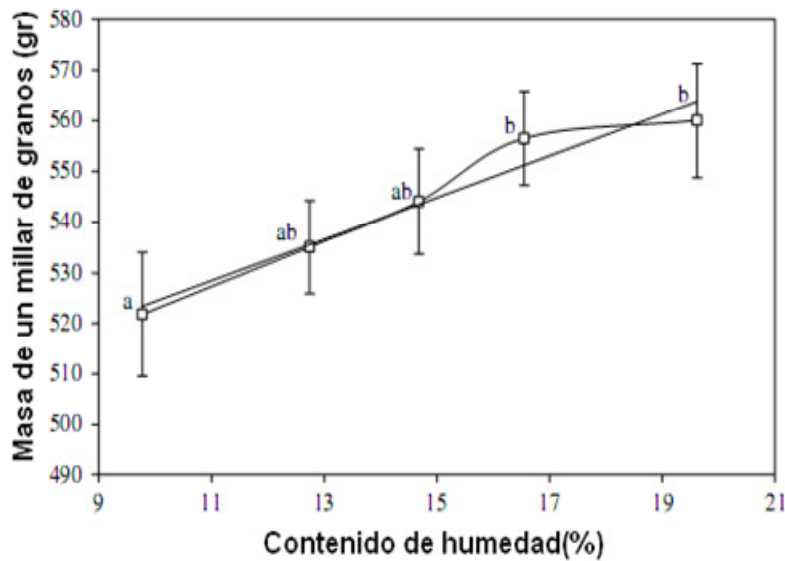


Figura 2. Masa de los granos contra contenido de humedad en granos de frijol (Eşref, 2007)

Finalmente, la Figura 3 muestra que cuando el contenido de humedad aumenta, los granos tienden a ser mas esféricos. Cuando el contenido de humedad de 9.77% los granos son 0.73% esféricos, aumentando considerablemente su esfericidad al aumentar su contenido de

humedad. Para la humedad más alta estudiada (19.62%), los granos de frijol alcanzan una esfericidad de 0.76%.

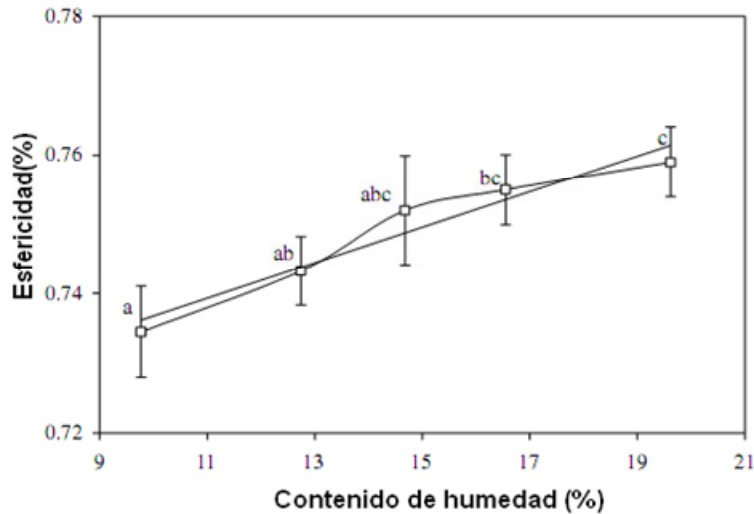


Figura 3. Esfericidad de los granos contra contenido de humedad, granos de frijol (Eşref, 2007).

Al contrario, la resistencia al descascarado de dichos granos disminuye conforme aumenta el contenido de humedad, debido a que para el menor contenido de humedad (9.77%), se necesita una fuerza de 98.22 N y a 19.62% de humedad se necesita una carga de 53.67 N, como se muestra en la Figura 4.

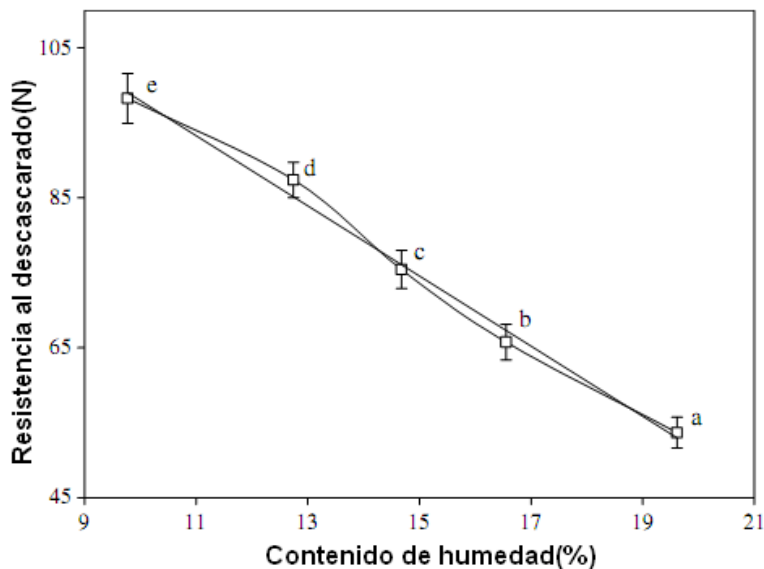


Figura 4. Resistencia al descascarado de los granos de frijol (Eşref, 2007).

### 1.1.2. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas se definen como aquellas que se relacionan con el comportamiento de los materiales cuando se les aplican fuerzas. El comportamiento mecánico de un material, por ejemplo un fruto o tallo, puede determinarse de dos maneras:

sensorialmente, es decir, tocando, aplastando, etc., que es el sistema utilizado tradicionalmente, pero que tiene la evidente desventaja de la subjetividad del individuo que la realiza; la otra forma es físicamente, es decir, en su reacción a la aplicación de fuerzas. Este sistema es objetivo e independiente del individuo, a este tipo de estudios físicos del comportamiento mecánico es el que se denomina reología. Por lo tanto, la reología se considera como una rama de la Física, y se define como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia, (Mohsenin, 1986).

En los vegetales las propiedades mecánicas varían con la edad, las deformaciones fisiológicas, el contenido de humedad (Reddy y Yang, 2007), la dirección donde se aplica la carga (Ciro, et al., 2007) y la velocidad con la que se impone la carga de deformación (AlChakra, et al., 1996). A partir de de las características anteriores, las propiedades mecánicas de los vegetales dependen de una gran variedad de factores, por lo tanto los vegetales no pueden ser caracterizados por constantes físicas como los aceros.

No obstante, Sitkei (1986) y Mohsenin (1986) han establecido criterios para la obtención de las propiedades mecánicas de los materiales agrícolas, tales como considerar las características físicas como el contenido de humedad, la edad del producto y densidad, entre las más importantes, debido a que estas características influyen en las propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas pueden definirse como aquellas que tienen que ver con el comportamiento de los materiales en virtud de la fuerza que se le aplica. Tales propiedades, como el comportamiento esfuerzo y deformación unitaria, sometido a cargas estáticas o dinámicas, así como, las características de flujo propias del material, ya sea en el agua o aire, pueden clasificarse como propiedades mecánicas. Por lo tanto, cuando la acción de la fuerza resulta en la deformación y flujo del material, las propiedades mecánicas pueden ser referidas como propiedades reológicas (Tabilo y Barbosa, 2005).

## **1.2. Mecánica de materiales**

La mecánica de materiales, comprende el estudio de métodos analíticos para determinar la resistencia, la estabilidad de los diversos elementos soportadores de cargas y el efecto de las fuerzas aplicadas sobre los cuerpos (Popov y Balan, 2000). El comportamiento de un elemento en el que actúan fuerzas, no sólo depende de las leyes fundamentales de la mecánica newtoniana que gobiernan el equilibrio de las fuerzas, sino también de las características físicas de los materiales de que esté hecho tal elemento. La información necesaria relativa a estas características proviene del laboratorio, donde los materiales se someten a la acción de fuerzas conocidas con relativa exactitud. Se observa el

comportamiento de probetas o especímenes de ensayo, y se da atención especial a fenómenos como el esfuerzo aplicado, la aparición de rupturas y deformaciones resultantes (Groover, 1997).

### 1.2.1. Esfuerzo

Las fuerzas aplicadas externamente a una superficie de un corte arbitrario deben ser equilibradas por las fuerzas internas desarrolladas en el corte, es decir, las fuerzas externas están equilibradas por las fuerzas internas. El método de secciones es el primer paso en la resolución de todos los problemas en que se investigan fuerzas internas.

El principio de d'Alembert indica que todos los cuerpos pueden considerarse instantáneamente en un estado de equilibrio estático. En general, las fuerzas internas que actúan sobre áreas infinitesimales de un corte, son de magnitudes y direcciones variables (Popov et al., 2000).

Cuando se aplica una fuerza a un cuerpo, éste sufrirá un *esfuerzo de tensión o compresión*; esto puede ser definido como una medida del resultado de la aplicación de la fuerza sobre el cuerpo. El esfuerzo depende de la dimensión del cuerpo y de la intensidad de la fuerza aplicada. Puede ser definido como la intensidad de fuerza en la unidad de superficie de aplicación. Se obtiene al dividir la fuerza perpendicular al plano de aplicación, entre el área que soporta dicha carga como muestra la ecuación 1.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde  $\sigma$  es el esfuerzo,  $F$  la fuerza y  $A$  el área de aplicación. Al descomponer la fuerza espacial en sus tres componentes se obtienen dos fuerzas tangenciales y una normal respecto a la cara de la sección. Las fuerzas normales producen esfuerzos de tensión,  $\sigma_T$ , cuando las fuerzas tensan o jalen las caras de una sección, y esfuerzos de compresión,  $\sigma_C$ , cuando las fuerzas presionan a las secciones.

### 1.2.2. Deformación unitaria

En una prueba de compresión, en la cual una fuerza axial creciente  $P$  se aplica a una probeta, el área transversal original  $A_0$  de la porción central de la probeta, se calcula exactamente y dos marcas de calibración se inscriben a una distancia  $L_0$  entre sí. La distancia  $L_0$  se llama longitud calibrada de una probeta. Durante el experimento, el cambio en la longitud calibrada se registra como función de la fuerza aplicada. Con la misma carga y una longitud calibrada mayor se observa una mayor deformación que cuando la longitud calibrada es pequeña. Por

tanto, es muy importante referirse a la deformación observada por unidad de longitud calibrada es decir, a la intensidad de la deformación. Si  $L_0$  es la longitud calibrada inicial y  $L$  es la longitud observada bajo una carga dada, la compresión calibrada es  $\Delta L = L - L_0$ . La deformación  $\varepsilon$  por unidad de la longitud calibrada inicial está dada por la ecuación 2:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{Ecuación 2}$$

Esta expresión define la deformación unitaria en tensión o compresión, como esta deformación unitaria está asociada con el esfuerzo normal, se llama comúnmente deformación unitaria normal. A veces la deformación unitaria se da como un porcentaje de la longitud original.

### 1.2.3. Relación entre esfuerzo-deformación unitaria

Según Fitzgerald (1990), en el siglo diecisiete (1658), Robert Hooke publicó un artículo en que estableció que el esfuerzo era directamente proporcional a la deformación unitaria. Esto se conoce como la ley de Hooke. Esta proporción puede convertirse en una ecuación introduciendo una constante de proporcionalidad, fue calculada a principios del siglo diecinueve (1802) por Thomas Young. Actualmente se conoce como módulo de elasticidad o módulo de Young ( $E$ ). Al incluir este parámetro a la Ley de Hooke, se convierte en la ecuación 3:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$\sigma$ = esfuerzo

$E$ = módulo de elasticidad o módulo de Young

$\varepsilon$  = deformación unitaria

### 1.2.4. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria.

En el estudio experimental de las propiedades mecánicas de los materiales se acostumbra construir gráficas de la relación entre esfuerzo y deformación unitaria en una prueba particular. En estos diagramas suele utilizarse el eje de las ordenadas como escala para los esfuerzos y el de abscisas para marcar las deformaciones unitarias. Los diagramas esfuerzo-deformación unitaria que se determinan en forma experimental difieren mucho según los distintos materiales. También sucede lo anterior para el mismo material, dependiendo de la temperatura, la rapidez o velocidad de la prueba y la longitud de las probetas. La Figura 5, presenta el diagrama esfuerzo-deformación unitaria de un producto agrícola.

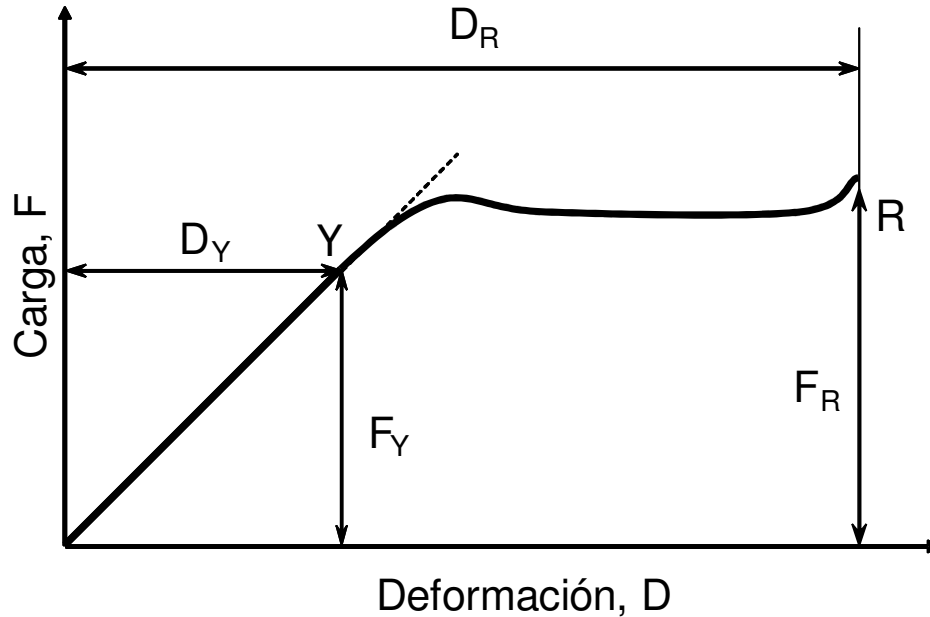


Figura 5. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria, (Núñez, Méndez y Solorza, 2001)

El denominado punto Y, dentro del diagrama esfuerzo-deformación unitaria, es el punto de biofluencia en el cual ocurre un incremento en la deformación con un decrecimiento o ningún cambio en la fuerza. Mohsenin (1986) menciona que en muchos materiales vegetales, la presencia de este punto indica que hay una ruptura celular en la estructura interna del material. El término biofluencia es propuesto para materiales biológicos con el fin de diferenciar este fenómeno del punto de fluencia en materiales estructurales. Según la Figura 5, la biofluencia puede ocurrir en cualquier punto más allá de Y, donde la curva se aparta de su tendencia lineal. Puede decirse que el punto de biofluencia corresponde a fallas en la microestructura, mientras que el punto de ruptura R, corresponde a fallas en la macroestructura de la muestra y ocurre después de que se ha sobrepasado el punto de biofluencia. Cuando un material biológico es dúctil, se refiere a la capacidad de soportar largas deformaciones antes de romperse; pero si es un material biológico frágil, su deformación es pequeña antes de llegar al punto de ruptura.

La relación esfuerzo con deformación unitaria en la región elástica de la curva podría ser referido como “módulo de elasticidad” o “módulo de Young”. En el caso de un comportamiento esfuerzo-deformación no lineal, la rigidez o “módulo aparente” puede ser definido en términos del módulo de tangente inicial, módulo de secante o módulo de tangente, como se observa en la Figura 6. El módulo tangente inicial, es obtenido de la pendiente de la curva respecto al origen. El módulo de secante es la pendiente de la línea que conecta el origen con un punto A sobre la curva. El módulo de tangente es la pendiente de la línea tangente a un punto B seleccionado sobre la curva.

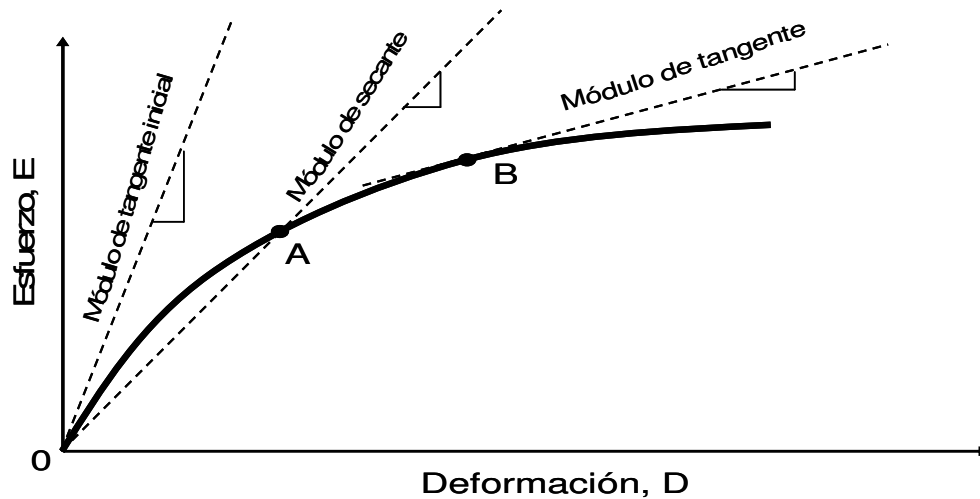


Figura 6. Método para definir el módulo en diagramas no lineales de esfuerzo-deformación, (Núñez et al., 2001).

### 1.2.5. Energía de compresión.

Finalmente, en lo que respecta a la energía de compresión, este parámetro se obtiene de manera indirecta, es decir a través de una serie de pasos y fórmulas que lo relacionan con el esfuerzo y la deformación unitaria y esta es considerada como la energía necesaria para romper la estructura del material, puede ser determinada del área (P) que se encuentra por debajo de la curva fuerza-deformación entre el punto inicial (a) y punto de ruptura(b), (Nzuko, 1980; Abbot et al., 1996; Masoudi et al., 2007 y Sirisomboon et al., 2007).

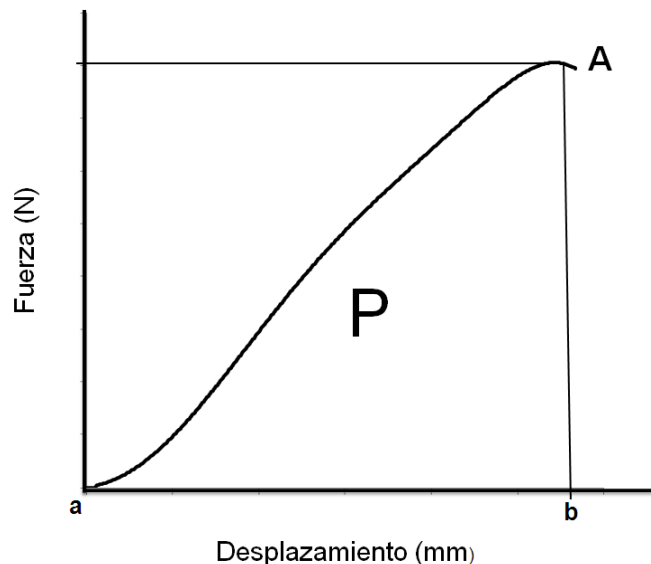


Figura 7. Energía de compresión, (Nzuko, 1980).

Este parámetro se puede calcular de forma indirecta, es decir se obtiene la función  $F(x)$ , que describe el comportamiento de la curva, en el área delimitada  $[b,a]$ . Posteriormente, aplicando

la técnica de Nzuko (1980), en el cual se utiliza integrales definidas para determinar la energía de compresión:

$$P = \int_a^b f(x)dx$$

Ecuación 4

Sin embargo, existen otros métodos, como obtener el área de bajo de la curva con programas como photoshop y de esta forma estimarla (Sirisomboon et al., 2007 y Masoudi et al., 2007).

### **1.3. Factores que influyen sobre las propiedades mecánicas a compresión de los materiales agrícolas.**

#### **1.3.1. Contenido de humedad y dirección de aplicación de la carga**

Investigaciones encaminadas a la caracterización mecánica de los productos agrícolas, han demostrado que la humedad y la dirección sobre la cual se aplica la carga de compresión, son los principales factores que influye en la respuesta mecánica. Esto se debe principalmente a la anisotropía del material, por este motivo este tipo de materiales no pueden ser caracterizados como homogéneos, como es el caso de los aceros (Mohsenin, 1986).

En este sentido, Jekendra (1999) encontró que después de la madurez fisiológica de los forrajes de maíz y sorgo, la humedad disminuye a medida que aumenta la edad. A su vez, la resistencia aumenta al disminuir la humedad. Esto se refleja en que para una planta de 110 días, el contenido de humedad es de 70% para el caso del maíz y de 80% para el sorgo, después de 130 días la humedad de ambos disminuye a 20 y 50% para el maíz y sorgo respectivamente como se muestra en la Figura 8.



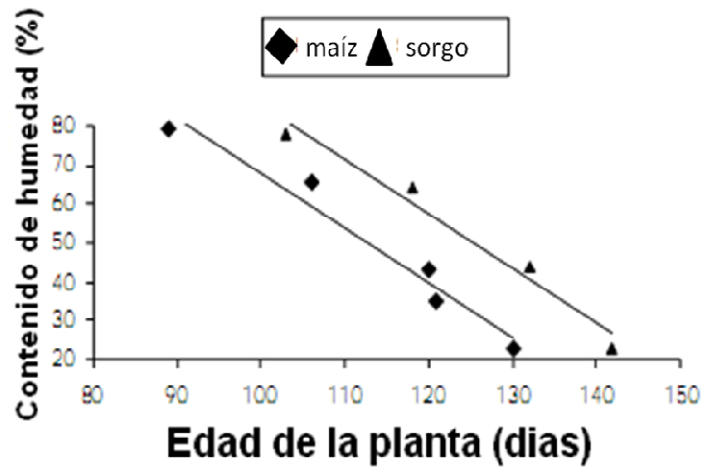


Figura 8. Relación entre el contenido de humedad y la edad de la planta (Jekendra,1999).

Caso contrario ocurre con su resistencia, a medida que la humedad aumenta, su capacidad para resistir a ser cortado disminuye. Para un contenido de humedad 20%, el maíz tiene una resistencia de 3.5 MPa y el sorgo de 6 MPa, sin embargo, su resistencia decae para una humedad de 80% a 1.5 MPa para el maíz y 5 MPa para el sorgo, como se muestra en la Figura 9.

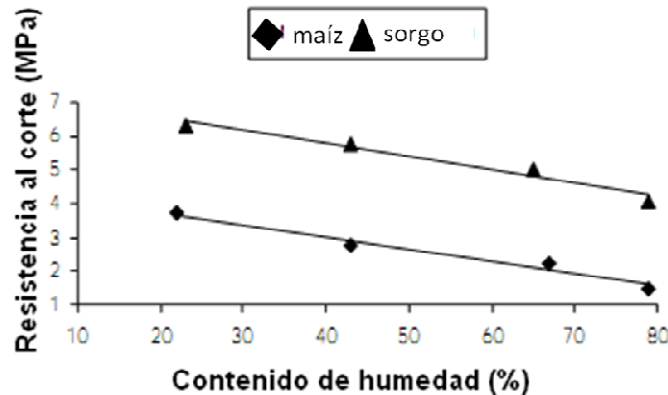


Figura 9. Relación entre la humedad y la resistencia al corte (Jekendra, 1999).

De igual manera, Buitrago et al. (2004) en su estudio de la determinación de las propiedades físico-mecánico de las papas, encontró que la principal influencia sobre la variabilidad en las propiedades mecánicas son los cambios en el contenido de humedad de los tubérculos. La carga de biofluencia del tubérculo varía de 19.7 N a 37.4 N en un tiempo de observación de 0 a 90 días respectivamente.

Por su parte, Al Chakra (1996) concluye que las propiedades mecánicas de los materiales agrícolas varían en función del contenido de humedad del producto. A mayor contenido de humedad, la resistencia a la compresión disminuye y en forma viceversa, como muestra la Figura 10.

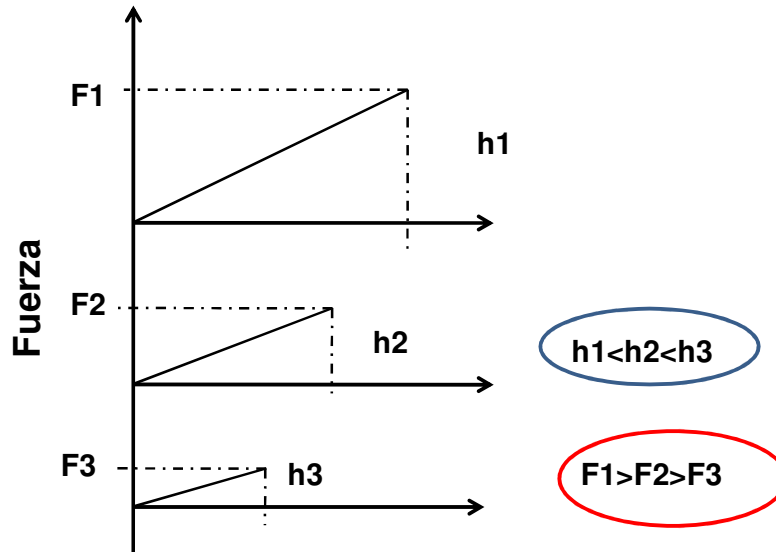


Figura 10. Relación de la humedad, fuerza y deformación, (Al Chakra, 1996).

En lo que respecta a la dirección sobre la cual se aplica la carga a compresión y su respuesta mecánica, se han realizado ensayos sobre melones en específico de la variedad *Cucumis melo* L. Bajo compresión axial, emplearon dos direcciones de ensayos de compresión (vertical y horizontal), dos estados de madurez de los melones (forzados y no forzados), y tres parámetros de compresión (límite elástico, punto de biocedencia y punto de ruptura), en los que cuantificaron la carga de compresión, el porcentaje de deformación y el módulo de Young. En este tipo de ensayos emplearon una máquina universal de ensayos mecánicos INSTRON modelo 4469, una velocidad de 50 mm/min y una celda de carga de 500N. Los resultados que encontraron fueron que la compresión aplicada hasta el punto de biocedencia indica el inicio de la ruptura celular. Los frutos forzados son los que requieren mayor carga de compresión entre 0.41kN y 1.95 kN en posición vertical para alcanzar el límite elástico, el punto de biocedencia y la ruptura en comparación, en comparación de los frutos no forzados. Los frutos que fueron sometidos a compresión en posición vertical mostraron un valor más alto en su deformación que los comprimidos en posición horizontal, en lo que respeta al módulo de Young relacionado con la rigidez del tejido del fruto (Chen et al., 1987), encontraron que los valores para estado de madurez forzados son más altos que en el estado de madurez no forzada. Finalmente, concluyeron que el melón muestra sensibilidad fisiológica a daños mecánicos. La aplicación de carga en frutos de melón, desde una posición vertical, se traduce en una reducción de la carga de compresión necesaria para alcanzar el límite

elástico, biocedencia y ruptura de material, así como un incremento en la deformación. Este comportamiento se acentúa conforme el estado de madurez del fruto es más avanzado (Villaseñor et al., 2006).

Existen algunos otros estudios en los que evalúan la dirección de carga y la influencia de la humedad, como es el caso del trabajo de Mamman, Umar y Aviara (2005), en su investigación sobre el efecto la orientación de carga y el contenido de humedad en las propiedades mecánicas de las nueces de la variedad *Balanites Aegyptiaca*, en el cual se evaluó el módulo de elasticidad, el límite elástico, límite al punto de falla, al punto de ruptura y deformación máxima. Los ensayos los ejecutaron a una velocidad de deformación constante de 25mm/min. La curva esfuerzo-deformación unitaria, y los resultados fueron generados automáticamente por el equipo TESTOMETRIC Universal Testing Machine (UTM), el cual es controlado por una microcomputadora. La máquina fue programada para determinar los parámetros mecánicos antes mencionados como se muestra en la Figura 11.

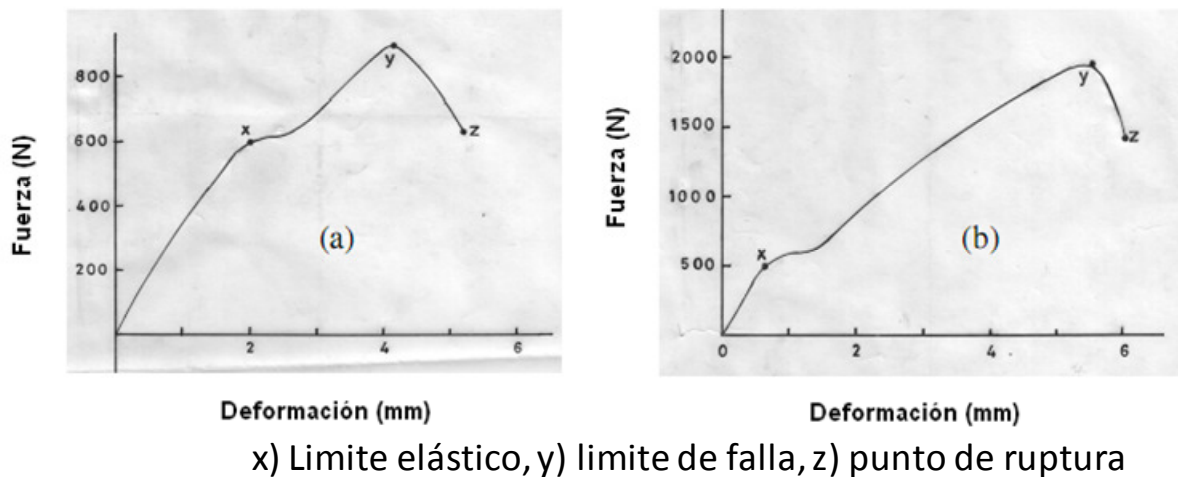


Figura 11. Diagrama fuerza-deformación de la nuez, a) en sentido axial y b) en sentido longitudinal, (Mamman, 2005).

Los resultados de Mamman, et al., (2005) muestran que la relación entre el contenido de humedad y el módulo de elasticidad durante la carga en dirección longitudinal para los dos tipos de nueces (esférica y ovoide) es inversamente proporcional, como se muestra en la Figura 12, ya que con el incremento de la humedad, el módulo de elasticidad para ambos tipos de nueces decrece de una manera gradual.

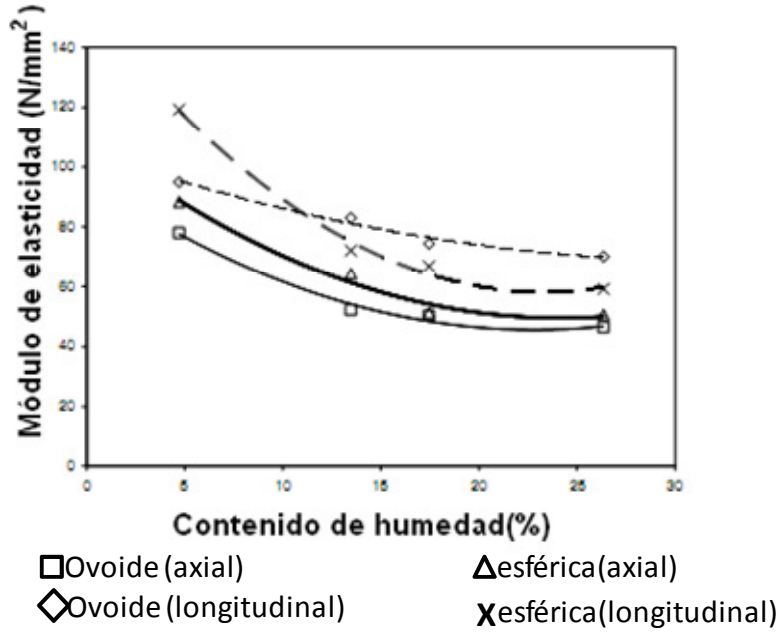


Figura 12. El contenido de humedad afecta las propiedades del módulo de elasticidad de las nueces, (Mamman, 2005).

Esta misma tendencia se observa en la resistencia límite ya que con el incremento en el contenido de humedad, este parámetro se ve afectado con una disminución como se observa en la Figura 13.

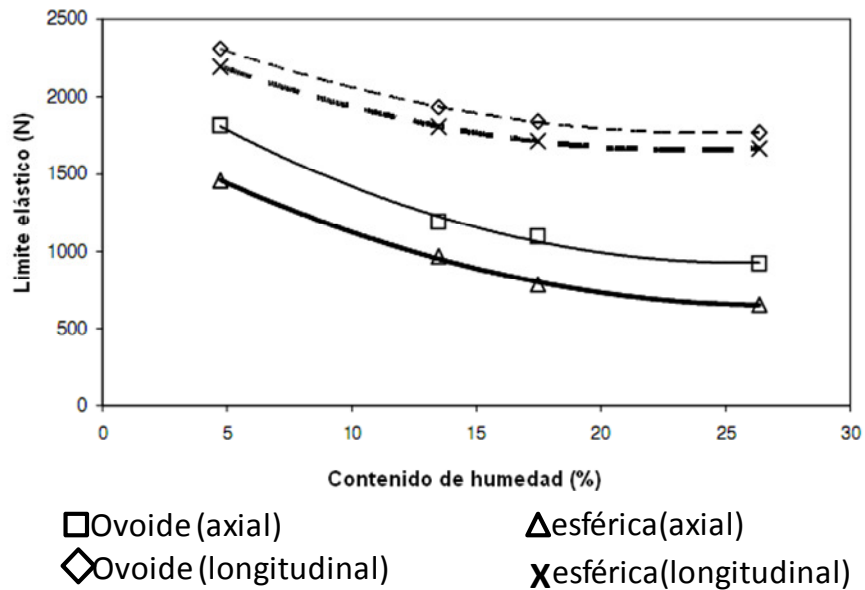


Figura 13. El contenido de humedad afecta las propiedades del límite elástico de las nueces, (Mamman, 2005).

Finalmente, de este estudio se concluye que la relación inversa exhibida entre contenido de humedad y las propiedades mecánicas investigadas, se podrían atribuir el hecho que la

casaca de la nuez de frutos secos *balanites aegyptiaca* es esponjosa y su contenido de humedad alto. La resistencia de la casaca disminuye y con ello más fáciles para que falle. Consecuentemente, los valores de las propiedades mecánicas reportadas fueron altos en niveles bajos de humedad y en forma viceversa.

### 1.3.1.1. Efecto de la orientación de la fibra y humedad sobre las propiedades mecánicas a compresión

En materiales fibrosos, la dirección sobre la cual se impone la carga evidencia aun más la anisotropía del material. En este sentido Ciro, Largos y Casafús (2007) realizaron ensayos de compresión uniaxial en la yuca en dos estados, fresco (60.76% de humedad) y deshidratado (25.7% de humedad) y dos diferentes direcciones longitudinal y transversal a la fibra, esto se realizó con la finalidad de analizar el posible efecto del contenido de humedad y dirección sobre la cual se impone el esfuerzo en la respuesta reológica del tubérculo de Yuca, de lo cual encontró que a mayor contenido de humedad, menor esfuerzo y en forma viceversa a menor contenido de humedad, mayor esfuerzo de deformación. La Figura 14, muestra que a un nivel de significancia del 5%, el efecto de la dirección de carga y contenido de humedad del producto en la resistencia mecánica del material a compresión unidireccional. En sentido longitudinal (dirección de carga paralela a las fibras) es más resistente que en sentido transversal (dirección de carga perpendicular a las fibras).

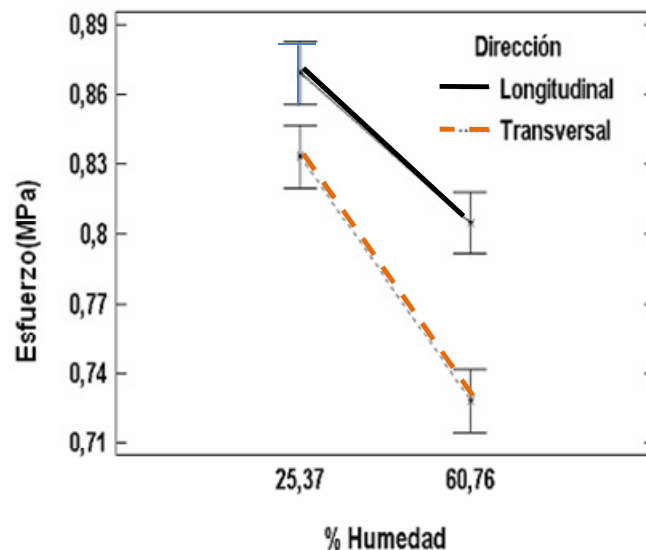


Figura 14. Medias de Esfuerzo, en dirección paralela y perpendicular a las fibras de la yuca y dos contenidos de humedad (Ciro, Largos y Casafús, 2007).

En lo que respecta a la deformación unitaria, en la Figura 15 se observa que para una dirección de carga dada, el producto alcanza a deformarse en mayor proporción a medida que disminuye el contenido de humedad del producto.

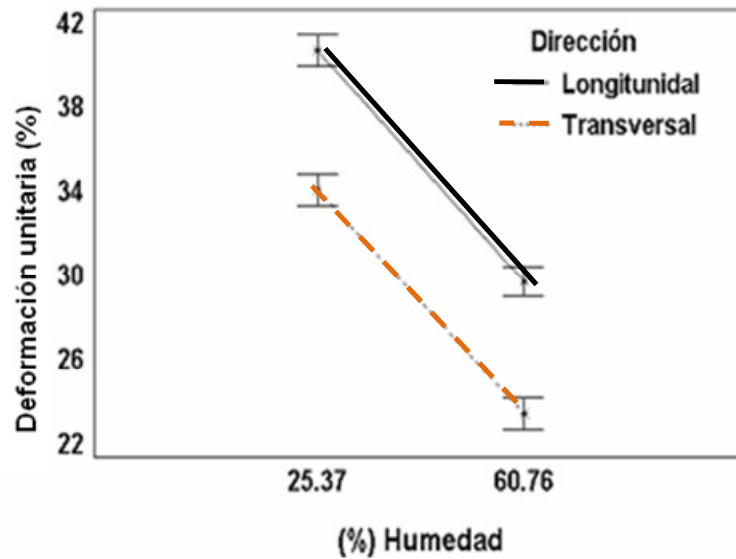


Figura 15. Medias de deformación unitaria, en dirección paralela y perpendicular a las fibras de la yuca y dos contenidos de humedad (Ciro, Largos y Casafús, 2007).

El módulo de elasticidad encontrado en los ensayos es mostrado en la Figura 16, lo cual indican que la rigidez del producto es más alta en dirección longitudinal que transversal. Además, un análisis entre las Figura 14, Figura 15 y Figura 16, indica que a medida que la rigidez disminuye la capacidad para deformarse aumenta.

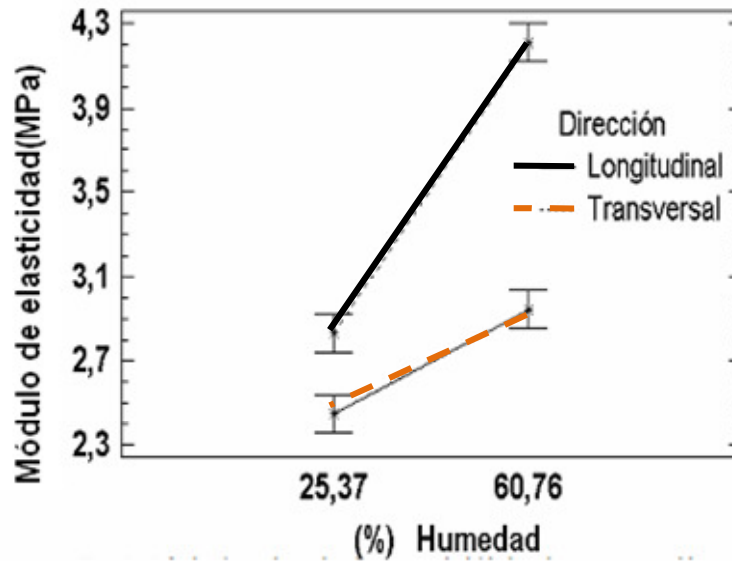


Figura 16. Medias del Módulo de elasticidad, en dirección paralela y perpendicular a las fibras de la yuca y dos contenidos de humedad (Ciro, Largos y Casafús, 2007).

### 1.3.1.2. Ensayos a compresión en el *Agave angustifolia* Haw.

En lo que respecta a la caracterización en el *Agave angustifolia* Haw, un material que en su interior cuenta con fibras, se han realizado investigaciones sobre sus cualidades mecánicas, con la finalidad de emplear los resultados en el diseño de máquinas específicas en el proceso de elaboración de mezcal (José, 2008). En este sentido, Pozos (2001) determinó las propiedades físico-mecánicas de las pencas y corazón del *Agave angustifolia* Haw en verde. Evaluó la resistencia a la compresión y resistencia al corte en dos sentidos, paralelo y perpendicular a las fibras. Los ensayos los realizó con una máquina universal INSTRON modelo 4468 y celda de carga de 50 kN, en la Universidad Autónoma de Chapingo. El tamaño de las probetas cilíndricas para los ensayos de compresión fueron de 30 mm de diámetro, longitud de 30 mm. Para las probetas cúbicas, el tamaño fue de 30x30x30 mm. La velocidad empleada en ambos casos fue de 50mm/min y un desplazamiento máximo del disco superior de 20 mm. Encontró que las probetas cilíndricas con dirección paralela a las fibras resisten a una carga máxima de 1.104 kN y las cúbicas de 1.318 kN, un esfuerzo máximo de 1.562 MPa y 1.665 MPa para las cilíndricas y cúbicas respectivamente. En el caso de las probetas con dirección perpendicular a las fibras, solo realizó ensayos en probetas con forma cúbica. La carga máxima fue de 1.186 kN y el esfuerzo máximo fue de 1.238 MPa. Con respecto la energía de corte necesaria para romper el agave, encontró que con orientación paralela y perpendicular a las fibras con respecto a la herramienta se necesita 4.75 J y 10.920 J, respectivamente, Como dato, menciona que las pencas contenían una humedad de 62%. Los resultados encontrados por Pozos (2001) fueron empleados en el diseño de una máquina

partidora de piñas de *Agave angustifolia* Haw para la producción de mezcal en el estado de Oaxaca, (Hidalgo, 2001) y resultaron útiles para cálculo de la potencia, en el diseño y construcción de una máquina seccionadora de agave verde, Caballero, et al., (2008-a).

Por otra parte, García (2004) determinó las cualidades mecánicas del *Agave angustifolia* Haw sometido a cocción, para esto realizó diferentes tipos de ensayos, como compresión, corte e impacto, en sentido paralelo y perpendicular a las fibras, con dos tipos de geometría cúbica y cilíndrica. Para el caso de los ensayos a compresión, en sentido paralelo a las fibras, solo realizó ensayos con probetas con geometría cilíndrica de 30x30mm. En relación a las fibras perpendiculares, los ensayos los efectuó con probetas cúbicas de las de 30x30x30 mm. Todas las pruebas se hicieron con una máquina universal INSTRON modelo 4468, con unja celda de carga de 50kN. La velocidad de carga empleada fue de 25mm/min, y el desplazamiento máximo del disco superior fue de 20mm. Encontró una carga media (P) de 0.168kN y 0.196kN, un esfuerzo medio ( $\sigma$ ) de 0.248 N/mm<sup>2</sup> y 0.218 N/mm<sup>2</sup> y una deformación ( $\epsilon$ ) de 1.121mm y 7.676mm, en sentido paralelo y perpendicular a las fibras respectivamente Sin embargo, los resultados podrían llegar a ser invalidados debido a que las pencas comenzaron a fermentarse y por lo tanto recomienda que se mida el PH del producto y analice la química de las mieles. No obstante fueron útiles en el diseño y construcción de un prototipo de molino de rodillos para extraer jugos del *Agave angustifolia* Haw en estado cocido (Caballero, et al., 2008-b).

### **1.3.2. Velocidad de aplicación de carga en el ensayo**

Según Núñez, et al. (2001), la magnitud de la compresión desarrollada no es solo función de la deformación, sino también de la velocidad impuesta. La aplicación de distintas velocidades afecta significativamente la respuesta mecánica del material. La naturaleza de esta variación con la velocidad de deformación es característica de cada material. En general, a mayor velocidad de deformación, la tensión y/o compresión originada es mayor como se muestra en la Figura 17.



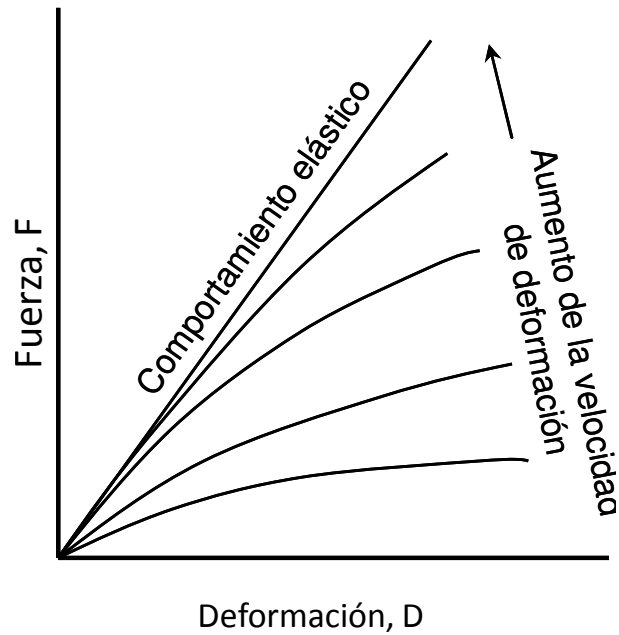


Figura 17. Evolución hacia un comportamiento elástico por aplicación de velocidades de compresión crecientes, (Núñez et al., 2001).

En este sentido, Ciro, Vahos y Márquez (2005) realizaron ensayos de compresión unidireccional a tomates con la ayuda de un texturómetro TA.TXT2i, en dos sentidos transversal y longitudinal y tres velocidades de deformación 1,3 y 6mm/s. La carga de fractura la determinó a partir de gráfica de Fuerza-Tiempo utilizando el programa de computo *Texture Experd Excee*. Los valores encontrados en el análisis estadístico no mostraron diferencias significativas en la fuerza de fractura según el sentido de carga y velocidad de carga. En la Figura 18 se muestra el comportamiento de los tomates sometidos a ensayos de compresión en las tres velocidades, el promedio de la resistencia a la compresión fue de 16.77 kgf.

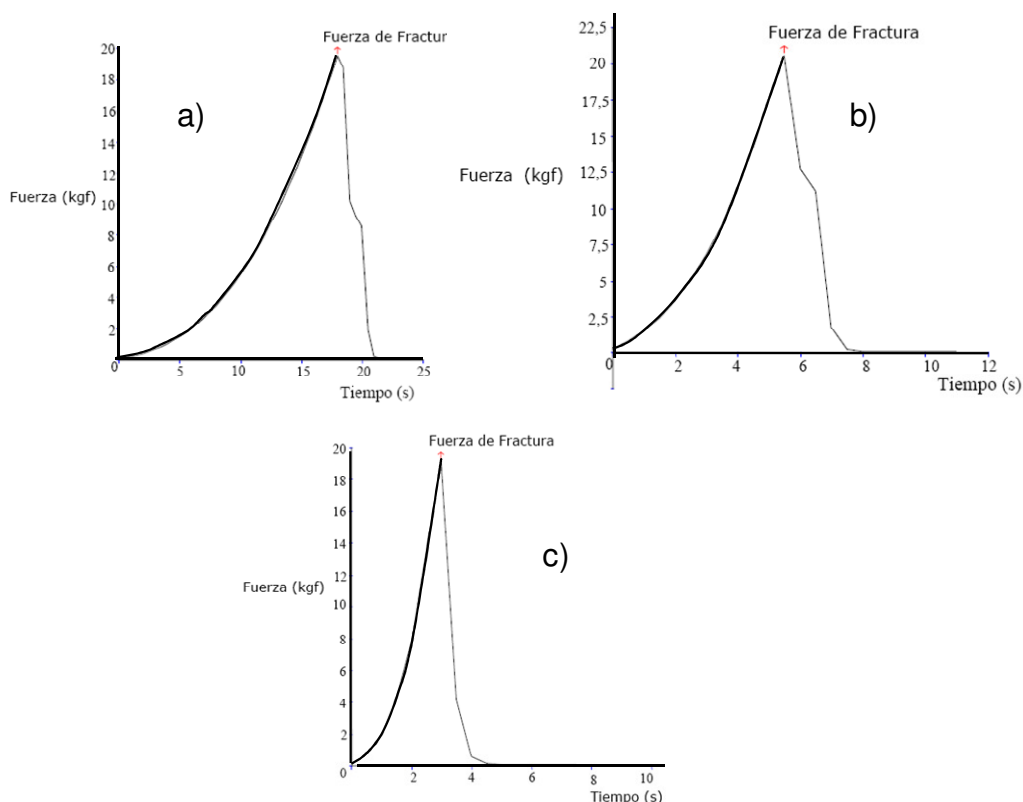


Figura 18. Curva de fractura del tomate de árbol en dirección longitudinal, a diferentes velocidades de deformación, a) 1mm/s, b) 3mm/s, c) 6mm/s, (Ciro, Vahos y Márquez, 2005).

Otros estudios han demostrado que la velocidad de deformación si influye sobre las propiedades mecánicas de los productos agrícolas, por ejemplo, Kistrup y Nielsen (2000) estudiaron los parámetros reológicos y sensoriales de ocho diferentes variedades de papas. Observaron que la velocidad de deformación influye en las propiedades mecánicas a compresión. En este trabajo se estudió el efecto de diferentes velocidades de deformación (20, 100 250, 500, 750 y 1000mm/min), sobre los siguientes parámetros: el esfuerzo, la deformación, y el módulo de elasticidad, los ensayos fueron realizados en una máquina Universal Instron modelo 5565 equipada con una celda de carga de 100N, así mismo se obtuvieron probetas de forma cilíndrica de las ocho variedades de papas estudiadas las cuales contaban con un diámetro de 12mm y una altura de 10mm.

Los resultados de este trabajo muestran que el esfuerzo, y la deformación varían con el incremento de la velocidad de deformación y el módulo de elasticidad disminuye con el aumento de la velocidad de ensayo. En el caso de la Figura 19 se muestra que la velocidad influye en el esfuerzo a compresión de cada una de las diferentes variedades de las papas, en esta figura se observa que la variedad de papa más resistente es la Sava orgánico que tenía un mes de cosecha, seguido por la Sava orgánico de 1 mes, ya que en forma general a mayor velocidad de deformación todas las variedades de papa las papas tienden a soportar mayor carga.

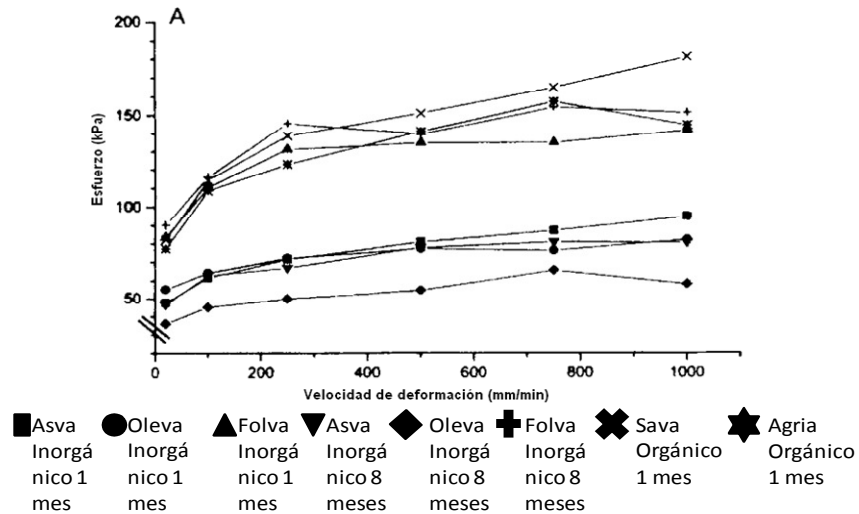


Figura 19. Comportamiento del esfuerzo a compresión de las distintas variedades de papas a diferentes velocidades de deformación, (Kistrup, et al., 2000).

Así mismo, para el caso de la deformación, al igual que en el caso anterior, a mayor velocidad de deformación las ocho diferentes variedades de papas tienden a deformarse en mayor medida, alcanzando los valores más altos por cada variedad cuando son ensayadas con una velocidad de deformación de 1000mm/min, aunque en este caso la variedad de papa que tuvo mayor deformación fue la Folva inorgánica de 8 meses como se muestra en la Figura 20.

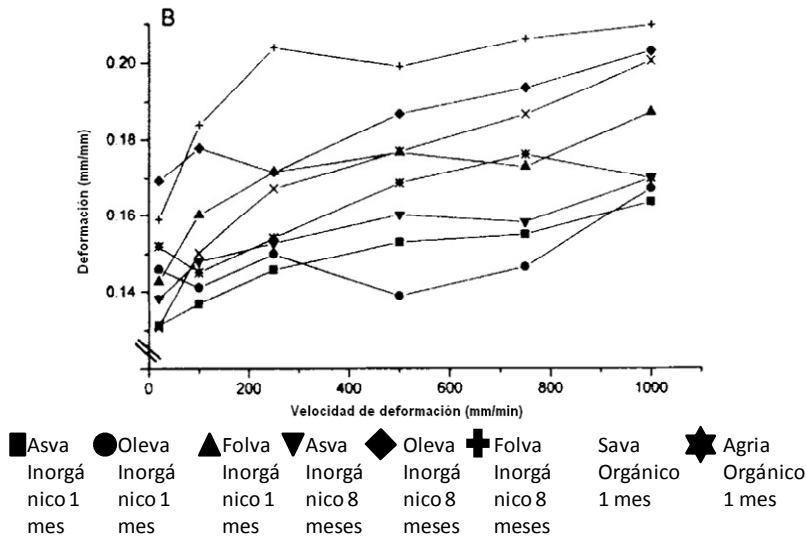


Figura 20. Comportamiento de la deformación de las de las distintas variedades de papas a diferentes velocidades de deformación, (Kistrup, et al., 2000).

Sin embargo para el caso del módulo de elasticidad, las papas se comportan de forma inversa a los dos casos anteriores, ya que como se observa en la Figura 21 todas las variedades de papas a mayor velocidad de deformación se alcanzan valores más bajos de rigidez.

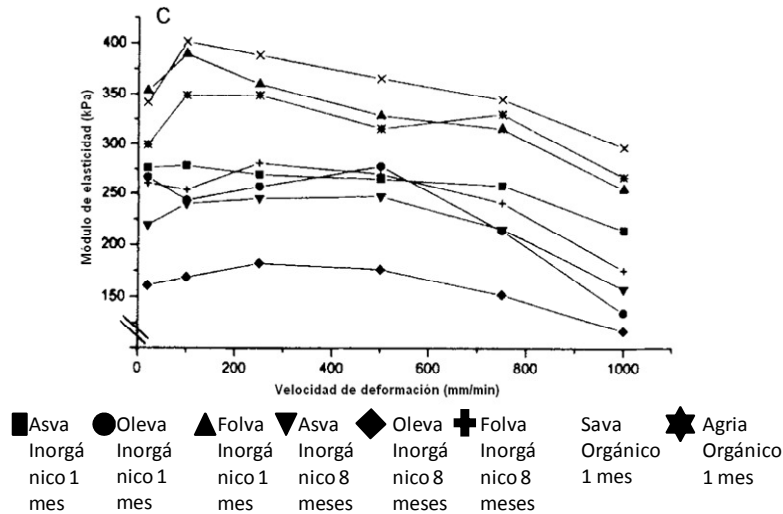


Figura 21. Comportamiento del módulo de elasticidad de las distintas variedades de papas a diferentes velocidades de deformación, (Kistrup, et al., 2000).

Otro ejemplo de que la velocidad de deformación si afecta las propiedades a compresión uniaxial de los materiales agrícolas es el que presenta Ravi, Roopa y Bhattacharya (2007) en su estudio sobre la evaluación de la textura del garbanzo, maíz y arroz hinchado. Aplicaron cuatro diferentes velocidades de deformación (0.01, 0.1, 1.0, y 10mm/seg), de las cuales obtuvo la carga y deformación máxima al punto de fractura. La rigidez equivalente al módulo de elasticidad, obtenida de la parte inicial donde el material se considera lineal dentro de la curva fuerza-deformación (Ravi, et al., 2007). Así mismo, se obtuvo de forma directa la curva típica fuerza-deformación para cada una de los materiales agrícolas estudiados, los ensayos fueron realizados en una máquina de textura modelo TAHDi, Stable Micro Systems, Godalming, equipada con una celda de carga de 50N. Cada una de las veinticinco muestras de de las tres especies estudiadas (garbanzo, maíz y arroz) fueron colocadas entre los dos platos de compresión y posteriormente ensayadas.

Los resultados indican que para el garbanzo, con forme se aumenta la velocidad de deformación, los parámetros de deformación y fuerza máxima aumentan. Sin embargo, para el caso de la firmeza, con forme se aumenta la velocidad el garbanzo tiende a ser menos firme, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Efecto de la velocidad sobre las propiedades mecánicas a compresión del garbanzo, (Ravi, et al., 2007).

Velocidad de deformación (mm/seg)	Deformación (%)	Fuerza máxima(N)	Firmeza (N/mm)
0.01	7.3±2.2	11.0±2.5	27.9±4.9
0.1	16.4±5.7	12.8±3.6	17.5±5.1
1	17.1±6.3	12.9±3.9	15.9±2.5
10	14.0±4.9	8.9±3.2	12.9±2.2

La Tabla 2 muestra que para el caso del maíz ocurre lo mismo que con el garbanzo, ya que con el incremento de la velocidad de deformación resulta en un aumento en la deformación y la fuerza máxima. No obstante, para la firmeza no existe una diferencia significativa ( $P \leq 0.05$ ), que demuestre que la velocidad afecte este parámetro de textura.

Tabla 2. Efecto de la velocidad sobre las propiedades mecánicas a compresión el maíz (Ravi, et al., 2007).

Velocidad de deformación (mm/seg)	Deformación (%)	Fuerza máxima(N)	Firmeza (N/mm)
0.01	1.7±0.8	13.1±3.7	4.6±1.7
0.1	1.8±0.6	13.1±2.6	6.0±2.7
1	4.9±2.4	14.8±2.28	5.7±1.2
10	7.4±2.9	14.1±3.0	4.2±1.4

Finalmente para el caso del arroz hinchado ocurre lo contrario a los casos anteriores ya que con el incremento de la velocidad de deformación, los parámetros de la deformación, fuerza máxima y firmeza disminuyen. Los resultados son mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3 Efecto de la velocidad sobre las propiedades mecánicas a compresión del arroz hinchado (Ravi, et al., 2007).

Velocidad de deformación (mm/seg)	Deformación (%)	Fuerza máxima(N)	Firmeza (N/mm)
0.01	7.8±3.6	65.9±10.1	20.9±3.9
0.1	3.6±1.8	47.0±13.9	15.9±3.8
1	2.1±0.9	26.8±7.9	7.8±2.0
10	6.3±2.2	36.5±10.8	10.0±3.0

#### 1.4. Sumario

Este capítulo se enfocó en desarrollar la teoría referente al comportamiento mecánico de los materiales agrícolas, que le dan sustento al trabajo de investigación y cuyos principios serán empleados en la interpretación de los resultados. Asimismo, se presentaron los diferentes métodos y condiciones de prueba que han utilizado otras investigaciones para determinar el comportamiento mecánico a compresión en diferentes tipos de vegetales, los cuales servirán como referencia para establecer la metodología en el siguiente capítulo.

En términos generales, se puede decir que en materiales viscoelásticos, que es el caso de la hojas del *Agave angustifolia* Haw, sus propiedades mecánicas dependen de la velocidad de carga. Esta situación puede ser muy común cuando se emplea como materia prima en algún proceso productivo. Se puede decir que a medida que la tasa de variación de la rapidez de cambio de la deformación unitaria se acrecienta, el material se fragiliza. Esto ha sido también en otros materiales, como lo han reportado Hernández et al., (1993) y Beltrán et al. (2004). Esta situación es importante, dependiendo del grado de fragilidad o ductibilidad se tendrá que seleccionar el método de evaluación de la integridad estructural Hernández et. al. (2009)



## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

En función de lo reportado en el capítulo anterior, se puede decir que para determinar las propiedades mecánicas de los materiales agrícolas se han empleado diferentes tipos de ensayos que establecen las interacciones entre el esfuerzo y la deformación, uno de estos ensayos es el de someter a compresión el material y registrar el esfuerzo y la deformación que se producen, (Moshenin, 1986). En este sentido, Anderson (1991), Smith (1996), Dowling (1998) y Ciro (2005), mencionan que la fractura o también llamada falla de un material bajo ensayos de compresión, puede considerarse como una propiedad mecánica. Cuando suficiente esfuerzo y trabajo son aplicados a nivel atómico para romper los enlaces que mantienen los átomos juntos se produce la fractura en el material. En este tipo de ensayos las principales variables obtenidas son el esfuerzo máximo o resistencia a la compresión, la deformación unitaria, el aparente módulo de elasticidad y la energía de compresión (Moshenin, 1986). Las tres primeras de las variables se pueden obtener de forma directa del diagrama esfuerzo-deformación.

El aparente módulo de elasticidad se obtiene de forma indirecta, es decir a través de una serie de pasos y fórmulas que lo relacionan con el esfuerzo y la deformación. Dentro de la

rama de los materiales agrícolas, esta variable ha sido estudiada debido a que es una medida de la firmeza de los productos agrícolas, con este parámetro se puede conocer la carga máxima que el material puede soportar bajo la acción de cargas estáticas, (Chen et al., 1987). En lo que respecta a la energía de compresión también se obtiene de manera indirecta, y esta es considerada como la energía necesaria para romper la estructura del material y puede ser determinada del área por debajo de la curva fuerza-deformación entre el punto inicial y punto de ruptura (Nzuko, 1980; Abbot et al., 1996; Sirisomboon, Kitchaiya, Pholpho y Mahuttanyavanitch, 2007; Masoudi et al., 2007).

Sin embargo, existen diferentes factores que afectan las propiedades mecánicas de los materiales agrícolas, entre los más importantes destacan, el contenido de humedad del producto Al Chakra (1996), Buitrago et al. (2004), su madurez (Jekendra, 1999), la velocidad con la que se realiza el ensayo Nuñez (2001), Kistrup, et al. (2000) y si es un material fibroso se evidencia notablemente el efecto que tiene la posición de la fibra sobre la carga aplicada (Ciro (2007), García (2004) y Pozos (2001)). Por lo que las propiedades mecánicas de los materiales agrícolas no pueden ser consideradas constantes, como es el caso de los aceros.

En este trabajo se buscó determinar el comportamiento mecánico a compresión, en base a la norma ASTM D695 (ASTM, 2008), de hojas del agave de ocho años, cosechadas en el mes de septiembre de 2009, los ensayos se realizaron bajo las condiciones de la norma ASAE S368.1 (ASAE, 2001). Las hojas provenían de tres diferentes regiones donde se recolectan este tipo de agaves en el estado de Oaxaca, se extrajeron probetas en dos direcciones, en sentido paralelo y perpendicular a la fibra y se utilizaron tres velocidades de deformación. Finalmente los datos obtenidos servirán para el posterior desarrollo de un protocolo en la generación de tecnología para el desfibrado de las hojas de *Agave angustifolia* Haw.

En este apartado del trabajo se encuentran los procedimientos empleados para la ejecución de los ensayos que permiten valorar las características mecánicas a compresión de las hojas del agave. La Figura 22 muestra la secuencia con la que se dividió el trabajo.



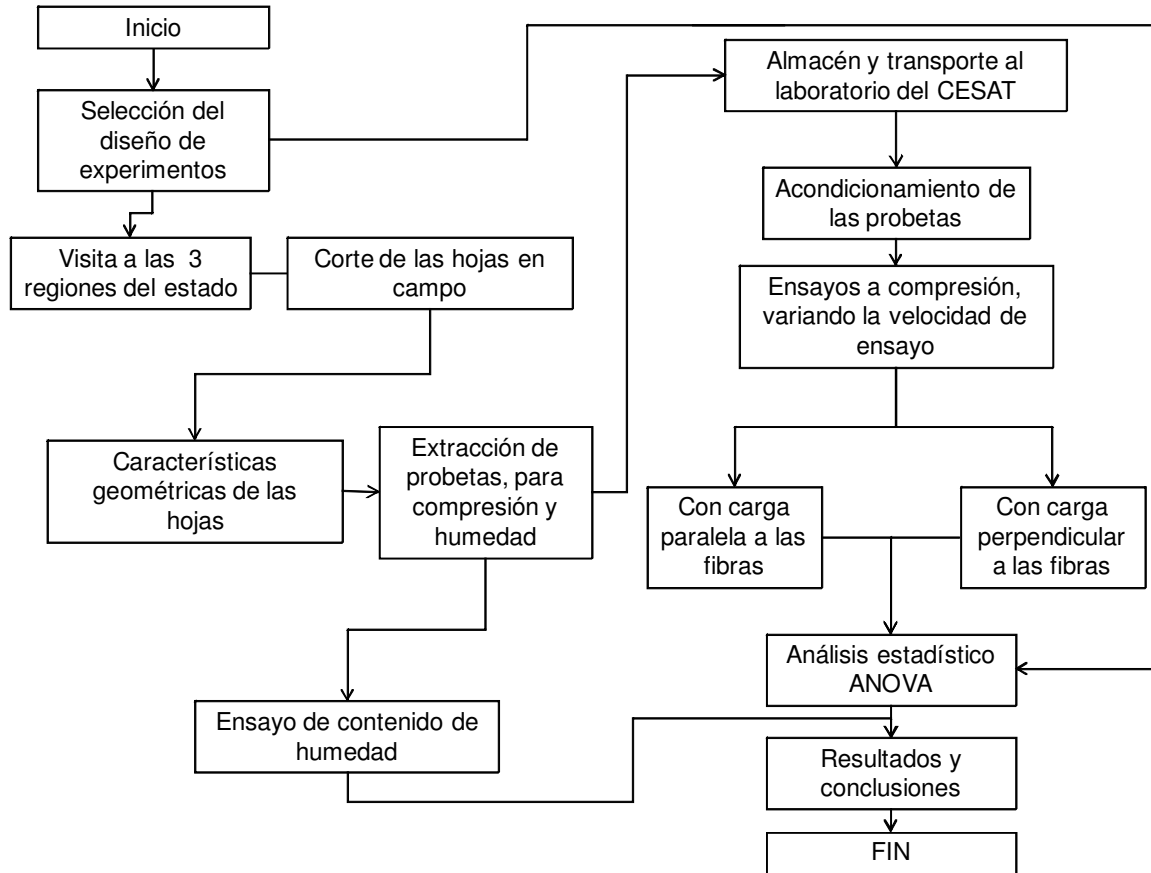


Figura 22. Diagrama metodológico de los experimentos  
Fuente: Elaboración propia.

En la metodología mostrada en la Figura 22 se desarrollaron las siguientes actividades y se detallan en sus apartados correspondientes:

Se seleccionó el diseño de experimentos (apartado 2.1), posteriormente se cosecharon las hojas de *Agave angustifolia* Haw de las regiones de Tlacolula, Yautepec y Ejutla, y se transportaron al laboratorio de metrología del CIIDIR IPN Unidad Oaxaca (apartado 2.2), en donde se determinaron las características geométricas de las hojas seleccionadas (apartado 2.3).

En una siguiente etapa, se extrajeron probetas cúbicas de las hojas del agave en dos direcciones, en sentido paralelo y perpendicular a la fibra para los ensayos a compresión según la norma ASTM D695 y también se extrajeron muestras para los ensayos de contenido de humedad según la norma NOM-116-SSA1-1994 (apartado 2.4).

Después de obtenidas las probetas de las hojas de agave estas se almacenaron y transportaron a los laboratorios del CESAT de la UPAEP en donde fueron acondicionadas para realizar los ensayos a compresión (apartado 2.6).

Sucesivamente y a la par de los ensayos de compresión, se realizaron las pruebas de contenido de humedad en el laboratorio de suelos del CIIDIR IPN Unidad Oaxaca (apartado 2.5)

Finalmente los datos obtenidos de los ensayos a compresión se realizó el análisis estadístico de varianza ANOVA con el paquete estadístico SAS versión 9.0 para Windows, para obtener los resultados del trabajo, según se planeo en el diseño experimental (sección 2.1).

## 2.1. Diseño del experimento

En este trabajo se analizó el efecto de la región de donde provienen las hojas (R), la dirección de la fibra (P) y la velocidad de ensayo (V), sobre el comportamiento mecánico a compresión de las hojas de agave. En este sentido, se utilizó el modelo matemático del diseño de experimentos completo aleatorio (DCA) con tres factores y arreglo factorial  $3^2 \times 2$  mostrado en la ecuación 1 (Montgomeri, 2006) y el desarrollo de las ecuaciones estadísticas empleadas se encuentran en el anexo 2 de esta tesis.

$$Y_{180} = \mu + R_3 + P_2 + V_3 + (RP)_6 + (RV)_9 + (PV)_6 + (RPV)_{18} + \varepsilon_{180} \text{ Ecuación 5}$$

El primer factor fue considerado como los metros sobre el nivel del mar de donde provienen las hojas (R) con dos niveles: el primer nivel es de la región de Tlacolula con 1600 msnm (R1), el segundo nivel es de la región de Yautepec con 850msnm (R2) y el tercer nivel es la región de Ejutla con 1440 msnm (R3). Como segundo factor fue considerado la dirección sobre la cual se realizaron los ensayos de compresión en las hojas con dos niveles, en sentido paralelo (P1) y perpendicular a la fibra (P2). Por último se consideró como factor la velocidad de deformación a la que se efectuaron los ensayos (V), con tres niveles: velocidad 2.54mm/min (V1), velocidad 14mm/min (V2) y 25.4mm/min (V3). Los ensayos de compresión se llevaron hasta causar la fractura del material o al 30% (7.62mm) de la altura total de la probeta esto por seguridad del propio equipo.

La Tabla 4 muestra un resumen del diseño experimental, en donde se observan los factores, los niveles y la nomenclatura que se utilizó. Para identificar los tratamientos a ensayar se utilizó la siguiente nomenclatura: (R=Región, P=Posición, V=Velocidad), por ejemplo la probeta numero (R2P1V3), significa que es de la Región 2, en sentido paralelo y una velocidad de ensayo de 25.4mm/min. Los tratamiento fueron los siguientes: R1P1V1, R2P1V1, R3P1V1, R1P2V1, R2P2V1, R3P2V1, R1P1V2, R2P1V2, R3P1V2, R1P2V2, R2P2V2, R3P2V2, R1P1V3, R2P1V3, R3P1V3, R1P2V3, R2P2V3, R3P2V3.

Tabla 4. Resumen de los factores y niveles

Factor	Niveles	Nomenclatura
Región (R)	a=3	R1,R2, R3
Dirección de la fibra (P)	b=2	P1,P2
Velocidad de ensayo (V)	c=3	V1,V2,V3

Se obtuvieron un total de 18 tratamientos y se efectuaron 10 repeticiones como indica la Norma ASTM D695, por lo que se obtuvieron un total de 180 unidades experimentales, el resumen del diseño experimental se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Resumen del diseño experimental.

Región (R)	Posición (P)					
	P1			P2		
	Velocidad (V)			Velocidad (V)		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
R1	10	10	10	10	10	10
R2	10	10	10	10	10	10
R3	10	10	10	10	10	10
<b>Número total de tratamientos obtenidos para los ensayos a compresión</b>			18			
<b>Número de repeticiones por cada tratamiento obtenido para los ensayos a compresión</b>			10			
<b>Número total de ensayos a compresión</b>			180			

En el caso de este trabajo de investigación las variables a evaluar fueron; el esfuerzo máximo ( $\sigma$ ) reportado en megapascales (MPa), la deformación unitaria ( $\epsilon$ ) expresada en porcentaje (%), el módulo de elasticidad ( $E$ ) reportado en megapascales (MPa) y la energía de compresión ( $T_c$ ) expresada en joules (J). En el anexo 3, se presentan las tablas de los datos codificados de cada una de las variables que resultaron del experimento, posteriormente se empleó un análisis de varianza de modelo trifactorial de efectos fijos para cada una de las variables, para dicho análisis se emplearon las ecuaciones mostradas en el anexo 1.

La Tabla 6 muestra un resumen del análisis de variancia para el modelo trifactorial de efectos fijos. Las pruebas F son para probar los efectos principales y las interacciones se deducen a partir de los valores esperados de las medias de cuadrados.

Tabla 6. Análisis de variancia para los ensayos de compresión en las hojas del *Agave angustifolia* Haw

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	Fo
Región(R)	SS <sub>N</sub>	a-1	MS <sub>R</sub>	$F_o = \frac{MS_R}{MS_E}$
Posición(P)	SS <sub>R</sub>	b-1	MS <sub>P</sub>	$F_o = \frac{MS_P}{MS_E}$
Velocidad(V)	SS <sub>V</sub>	c-1	MS <sub>V</sub>	$F_o = \frac{MS_V}{MS_E}$
RP	SS <sub>RP</sub>	(a-1)(b-1)	MS <sub>RP</sub>	$F_o = \frac{MS_{RP}}{MS_E}$
RV	SS <sub>RV</sub>	(a-1)(c-1)	MS <sub>RV</sub>	$F_o = \frac{MS_{RV}}{MS_E}$
PV	SS <sub>PV</sub>	(b-1)(c-1)	MS <sub>PV</sub>	$F_o = \frac{MS_{PV}}{MS_E}$
RPV	SS <sub>RPV</sub>	(a-1)(b-1)(c-1)	MS <sub>RPV</sub>	$F_o = \frac{MS_{RPV}}{MS_E}$
Error	SS <sub>E</sub>	abc(n-1)	MS <sub>E</sub>	
Total	SS <sub>T</sub>	abcn-1		

## 2.2. Cosecha de las hojas de *Agave angustifolia* Haw.

Como se mencionó en la introducción y la problemática, en México existen 30 diferentes tipos de especies de la familia de agave, 23 de ellos son empleados en la elaboración de mezcal, (Palma, 1991 y Espinosa, 2002). A nivel nacional el Agave de la variedad *angustifolia* Haw es el de mayor importancia para la fabricación de esta bebida y el estado de Oaxaca es donde se presenta la mayor cantidad de agave sembrada con 16,185 hectáreas, (Silva, et al., 2009), divididas en siete regiones y cada hectárea cuenta en promedio con 2,500 agaves sembrados. (SAGARPA, 2006), como se muestra en la Figura 23. Sin embargo, en este trabajo de investigación solamente se analizaron hojas de tres diferentes regiones y de campos de cosecha donde se tenía un previo conocimiento del productor, la principal razón por la cual se eligieron dichos campos y regiones fue por la disponibilidad de la materia prima, el costo económico y tiempo que representaba recolectar hojas de todas las regiones del estado, a la par de la poca disponibilidad de tiempo para el uso del equipo en los ensayos a

compresión. Es por ello, que se escogieron solamente tres regiones ubicadas a tres diferentes alturas sobre el nivel del mar.

La cosecha en las tres regiones se realizó en el mes de septiembre de 2009, considerado por los productores como la segunda época de cosecha anual. La primera región en donde se realizó la recolecta fue en Tlacolula, localizada a 16°55'55.20" N, 96°31'48.71" O a 1600 msnm y a 38 km de la ciudad de Oaxaca, cuenta con un clima templado, con verano cálido, lluvias en verano y otoño. La segunda región fue considerada la región de Yautepec, localizada a 16°29'45.74" N, 96°06'06.55 O, a 860 msnm y a 135 km de la ciudad de Oaxaca, cuenta con un clima semiseco muy cálido y cálido. La última región fue considerada la región de Ejutla, localizada a 16°33'55.11 N, 96°43'50.21" O, a 1400 msnm y a 45 km de la ciudad de Oaxaca, cuenta con un clima seco semicálido. De cada una de las regiones se seleccionaron de forma aleatoria 60 hojas de agave de ocho años para un total de 180 hojas aptas para extracción de probetas, esto quiere decir, sin daño mecánico, parcialmente secas o con daños de origen biológico.

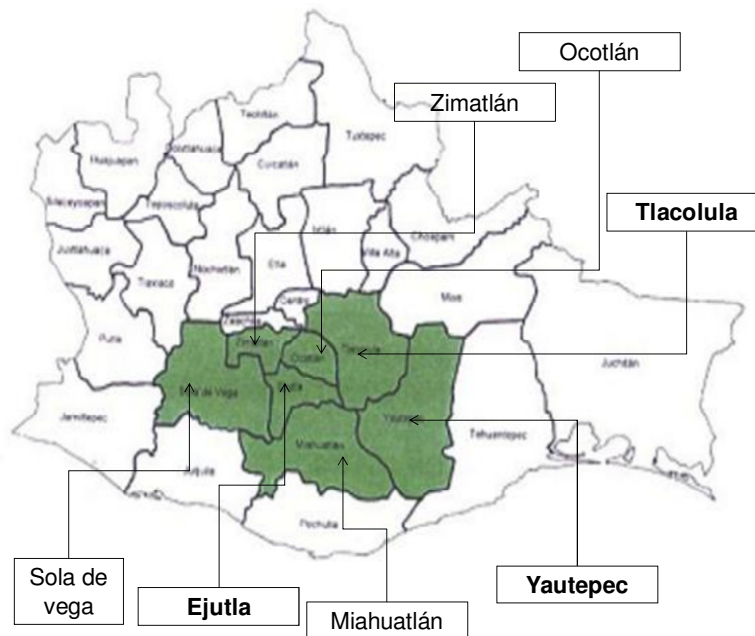


Figura 23. Superficie de las siete regiones principales donde se siembra *Agave angustifolia* Haw en Oaxaca.

### 2.3. Características geométricas de las hojas de *Agave angustifolia* Haw.

Para realizar las mediciones de las hojas se utilizaron los instrumentos con los que se cuentan en el laboratorio de metrología del CIIDIR IPN Unidad Oaxaca. Para esta actividad se emplearon los siguientes instrumentos de medición. Balanza granataria de dos brazos con capacidad máxima: 20 Kg., precisión: 1 g, Calibrador pie de rey digital con rango: 0 – 300 mm. y precisión: 0.01 mm., y Flexómetro metálico con un Rango de 0 – 8 m.y precisión de 1 mm.

En el laboratorio se verificó la calidad de las hojas con respecto a que se encuentren en óptimas condiciones, esto significa sin daño biológico causado por plaga, daño mecánico o parcialmente secas y se seleccionaran aleatoriamente para la extracción de probetas, las condiciones del laboratorio durante el desarrollo de esta actividad fue de  $21 \pm 5$  °C y  $70 \pm 5$  humedad relativa.

Posteriormente se ordenaron las hojas dependiendo de la región de donde provenían. Finalmente se realizaron las mediciones geométricas más importantes como son su longitud (L), espesor de la hoja (e) y el ancho máximo de la hoja ( $A_m$ ) y su peso (w), posteriormente las hojas se consideraron como cuerpos geométricos regulares por lo que se calculó su volumen y densidad, como se muestra en la Figura 24.

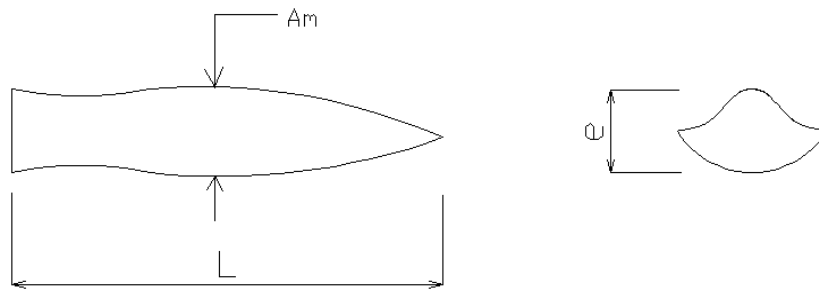


Figura 24. Dimensiones geométricas de las hojas.

#### 2.4. Extracción de probetas

Para los ensayos a compresión, se obtuvieron 120 probetas en base a la Norma ASTM D695 cuyas dimensiones son 12.7X12.7X25.4 mm en dos diferentes direcciones de la fibra sentido perpendicular y paralelo, como se muestra en la Figura 25, cabe destacar que esta norma es empleada en materiales poliméricos, el empleo de esta norma se debe a que se empleó un equipo universal para la caracterización de materiales poliméricos descrito en la

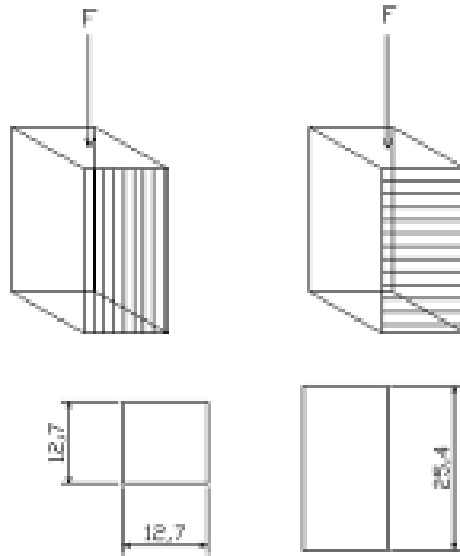


Figura 25 . Tamaño de las probetas

De forma manual se obtuvieron 90 probetas con fibras orientadas en dirección paralela y 90 probetas con fibras orientadas perpendicular a la sección transversal, de las tres regiones del estado, como se muestra en la Figura 26, para un total de 180 probetas para realizar los ensayos a compresión. De la misma forma, se obtuvieron 30 muestras de 10 gramos cada una (10 de la región 1, 10 de la región 2 y 10 de la región 3), las cuales fueron empleadas para los ensayos de contenido de humedad.

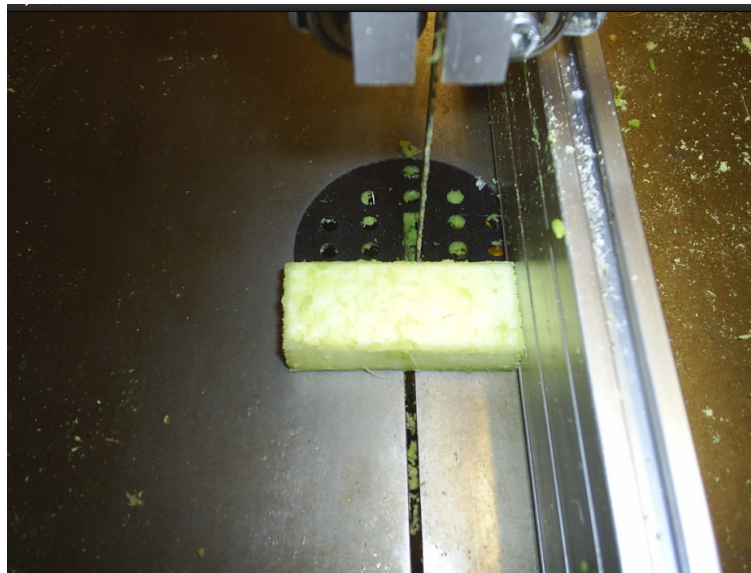


Figura 26. Extracción de probetas cúbicas de las hojas del agave

En esta etapa se utilizó una cierra cinta de 12 plg., marca CRAFTMAN modelo 22400 como la que se muestra en la Figura 27. Sus especificaciones son las siguientes: Motor de inducción: 1 h.p. 120/240 V. 60 Hz, diámetro de volantes: 304.8 mm, mesa de trabajo: 400 x 548 mm, altura de la mesa (desde el piso): 991mm, capacidad de trabajo: 203 x 305 mm, velocidades

de la cinta (2): 440 y 960 metros por minuto, dimensiones de la cinta: 6.3 a 15.8 x 2,370 mm, inclinación de la mesa: izquierda 10° y derecha 45°, dimensiones de la máquina: 690 x 680 x 1,670 mm y peso neto / peso bruto: 82 kg / 88 kg.

Esta máquina ha sido empleada para la extracción de probetas paralelepípedas de agave en la realización de ensayos de impacto (José, 2008).



Figura 27. Máquina sierra cinta

Después de ser extraídas, las probetas se almacenaron en bolsas de plástico con la nomenclatura que se manejó durante el desarrollo de esta investigación. Así mismo, como se observa en la Figura 28, las bolsas fueron selladas y almacenadas a una temperatura entre 4 y 5°C y humedad relativa entre 65 y 70%. Esto con la finalidad de evitar en lo posible la pérdida de la humedad de las muestras.





Figura 28. Almacenamiento de las probetas en bolsas de plástico

### 2.5. Determinación del contenido de humedad de las hojas del Agave.

Se determinó la humedad de las hojas seleccionadas, esto es con la finalidad de conocer la cantidad de agua presente en ellas. Esta actividad se realizó en base a la norma oficial mexicana NOM-116-SSA1-1994, bienes y servicios, en el laboratorio de suelos del CIIDIR IPN Unidad Oaxaca.

La Norma Oficial Mexicana establece el procedimiento para determinar la humedad por tratamiento térmico con el método por arena o gasa y es aplicable a alimentos en general, con excepción de aquellos en los que se requiera una metodología específica. En este método se agrega arena o gasa, se incrementa la superficie de contacto y la circulación del aire en la muestra, favoreciéndose así la evaporación durante el tratamiento térmico. El contenido de humedad en la muestra se calculó con la ecuación 6 expresada en por ciento (%):

$$humedad(\%) = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \times 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde

M1= Cápsulas de níquel con la gasa, secada durante 2 horas a  $100 \pm 2^\circ\text{C}$ .

M2= Cápsula preparada y una cantidad de producto inferior a 10 g.

M3= Cápsula preparada y el producto secadas durante 4 horas a  $100^\circ \pm 2^\circ\text{C}$ .

Para determinar la masa de las muestras se empleó una balanza analítica marca Sartorius Basic plus modelo BP211D como la que se muestra en la Figura 29.



Figura 29. Balanza analítica.

## 2.6. Condiciones de los ensayos a compresión en las hojas del agave.

Esta parte del trabajo se realizó en el laboratorio del Centro de Servicios de Alta Tecnología (CESAT), de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP). Todas las muestras fueron acondicionadas en el laboratorio a 20°C y 50% de humedad relativa, durante un periodo de 24 hrs. Antes de iniciar los ensayos, todas las probetas fueron medidas por triplicado, en sus dos lados y su altura, como se muestra en la Figura 30.

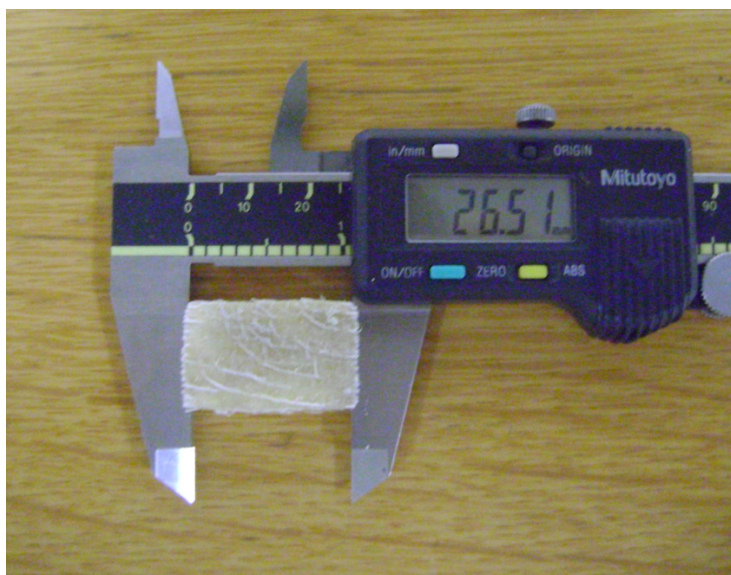


Figura 30. Mediciones de las probetas.

Posteriormente fue necesario realizar una serie de operaciones previas, para poner en marcha el sistema, preparar el bastidor y ajustar las diversas funciones del cuadro de mandos de la maquina. El procedimiento se realizó de la siguiente manera:

- Se comprobó que las conexiones eléctricas estén correctamente instaladas
- Se realizó un proceso de autodiagnostico del sistema
- Se determinó la altura de la cruceta, utilizando el mando de aproximación, hasta la altura que permita instalar la probeta entre los dispositivos.
- Se eligieron las unidades de medida, en este caso el sistema internacional (SI) que son mm para el desplazamiento y kN para la carga.
- Se calibró y equilibró la máquina, diariamente
- Se calibró la posición de la longitud, con ello se tuvo la seguridad de que todos los ensayos comenzaron en el mismo punto y con la misma distancia inicial entre los dispositivos de compresión.
- Se ajustó el fin de la carrera, con la finalidad de limitar el recorrido de la cruceta y por seguridad del propio equipo, ya que si se produce algún fallo, la barra actuadora de la cruceta hará contacto con los fines de carrera que limitan el recorrido. Esto abrirá el interruptor de fin de carrera y se detendrá la cruceta.
- Se ingresaron al sistema las dimensiones de cada unas de las probetas a ensayar, (ancho, espesor y largo).
- Se programó el equipo con el programa Trapezium Single, Se oprimieron los iconos de ensayos a compresión y se calibró la carga máxima de 10kN.
- Se programó la velocidad de ensayo (2.54mm/min, 14mm/min y 25.4mm/min).
- Finalmente, se determinaron los parámetros a obtener. En este trabajo se obtuvo: el esfuerzo máximo ( $\sigma$ ) reportado en megapascales (MPa), la deformación unitaria ( $\epsilon$ ) expresada en por ciento (%), el módulo de elasticidad ( $E$ ) reportado en megapascales (MPa) y la energía de compresión ( $T_c$ ) reportada en joules (J), como se muestra en la Figura 31.

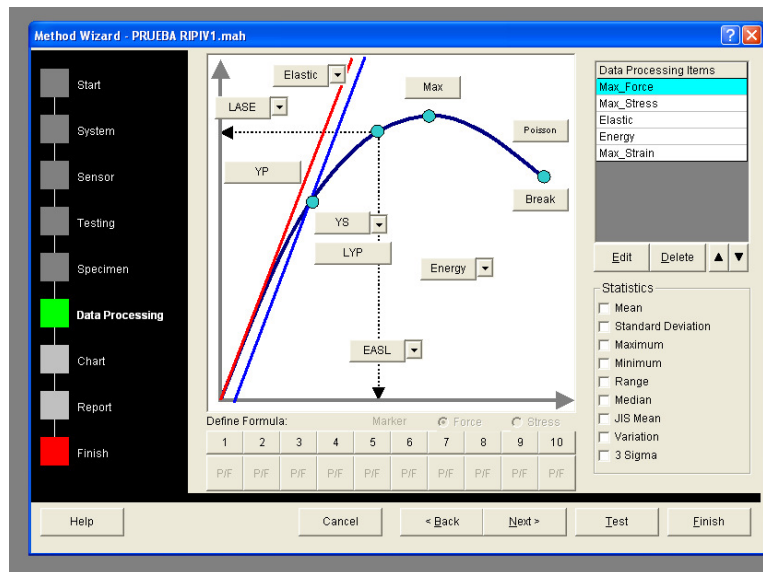


Figura 31. Ventana de programación del equipo.

Las probetas fueron montadas a una Máquina Universal de ensayos estáticos marca Shimadzu modelo Autograph AGS-J, como la mostrada en la Figura 32. Esta tiene una resolución 0.0098 N y precisión  $\pm 0.025$  y cuenta con una celda de carga de 10kN.



Figura 32. Máquina para ensayos estáticos Shimadzu modelo Autograph AGS-J

Los datos obtenidos directamente del programa Trapezium Single, se codificaron y ordenaron, consecutivamente se realizó un análisis descriptivo, sucesivamente se llevaron las pruebas de homogeneidad, normalidad e independencia, para finalmente realizar el análisis de ANOVA, todo esto se realizó con el programa SAS 9.0 para Windows a un nivel de significancia del 5% ( $P < 0.05$ ). Con la finalidad de poder generar los resultados y/o conclusiones del trabajo

## **2.7. Sumario**

En este capítulo se detalló cada una de las etapas de la metodología en las que se basa este trabajo de investigación, con base en los fundamentos de los antecedentes teóricos de algunos trabajos que han determinado el comportamiento mecánico en otros vegetales, cuya información se presentó en el capítulo 1. Finalmente, en el siguiente apartado se expondrán los resultados que se consiguieron.



### **3. RESULTADOS**

En este capítulo se muestran los resultados de las actividades del procedimiento experimental, iniciando con la descripción de las características geométricas de las hojas de agave empleadas, el contenido de humedad, finalizando con los resultados obtenidos en los ensayos a compresión.

### 3.1. Características geométricas de las hojas de *Agave angustifolia* Haw.

Las hojas seleccionadas de las regiones de Tlacolula, Yautepec y Ejutla fueron transportadas al laboratorio de metrología del CIIDIR IPN Unidad Oaxaca, en donde se les determinaron sus características físicas y geométricas. Los resultados alcanzados fueron los siguientes. De la población de Tlacolula (R1), la longitud promedio de las hojas es de 1.150 m, tienen un espesor de 4.62 cm un ancho de 10.031 cm y un peso de 0.747 kg, para una densidad de 145.943 kg/m<sup>3</sup>, de la población de Yautepec (R2), la longitud promedio de las hojas es de 1.38 m, cuentan con un espesor de 5.825 cm, un ancho de 8.3 cm y un peso de 1.0735 kg, para una densidad de 184.20 kg/m<sup>3</sup>, finalmente de la población de Ejutla (R3), la longitud promedio de las hojas es de 1.39 m cuentan con un espesor de 4.52 cm, un ancho de 6.41 cm, y un peso de 0.93 kg, para una densidad relativa de 162.98 kg/m<sup>3</sup>, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Características geométricas de las hojas de *Agave angustifolia* Haw de cada una de las regiones.

Parámetro	longitud(m)			espesor(cm)			ancho(cm)			peso(kg)			volumen(m <sup>3</sup> )			densidad (Kg/m <sup>3</sup> )		
Región	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Máx.	1.97	1.68	1.49	9.00	7.00	9.00	13.00	15.00	13.00	1.20	1.44	1.22	0.01	0.01	0.01	206.40	292.24	254.69
Mín.	0.87	1.13	0.98	0.05	4.00	3.00	0.10	6.00	5.38	0.46	0.73	0.46	0.00	0.00	0.00	68.81	117.86	79.82
<b>Media</b>	<b>1.15</b>	<b>1.39</b>	<b>1.20</b>	<b>4.56</b>	<b>5.29</b>	<b>4.63</b>	<b>9.89</b>	<b>8.31</b>	<b>9.34</b>	<b>0.75</b>	<b>1.07</b>	<b>0.79</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>145.94</b>	<b>184.20</b>	<b>162.98</b>
S.D.	0.10	0.03	0.02	0.41	0.11	0.38	0.70	0.61	0.47	0.04	0.04	0.06	0.00	0.00	0.00	9.43	8.25	7.66
C.V	8.89	1.95	1.90	9.00	2.07	8.24	7.10	7.30	4.99	5.61	3.94	7.38	9.96	5.16	8.13	6.46	4.48	4.70

Max: Máximo, Min: Mínimo, SD: Desviación estándar, C.V: Coeficiente de variación.

### 3.2. Contenido de humedad.

Para determinar el contenido de humedad se efectuaron ensayos de las tres regiones de donde se cosecharon las hojas (R1, R2 y R3); las condiciones promedio del laboratorio fueron de 22 °C con 50% de humedad relativa, esta actividad se realizó a la par con los ensayos de compresión.

En base a la Norma Oficial Mexicana NOM-116-SSA1-1994, bienes y servicios. Determinación de humedad en alimentos por tratamiento térmico. Método por arena o gasa, se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Tabla 8. Los resultados muestran que las hojas de la región 1 (R1) tienen 79% de humedad, las hojas de la región 2 (R2) tienen en promedio 82% de humedad y finalmente las hojas de la región fue del 83.25%.

Tabla 8. Contenido de humedad en las hojas de agave de cada una de las regiones, expresada en %

	Regiones		
	R1	R2	R3
Máx.	87.85	85.28	88.31
Mín.	53.32	76.85	57.16
<b>Media</b>	<b>79.04</b>	<b>81.82</b>	<b>83.25</b>
S.D.	7.44	3.52	9.66
C.V.	9.41	4.3	11.61

Max: Máximo, Min: Mínimo, SD: Desviación estándar, C.V: Coeficiente de variación.

De acuerdo a los resultados obtenidos y a la grafica de promedios del contenido de humedad, la Figura 33 muestra que las hojas provenientes de la región1 (R1) tienen menor humedad que las hojas cosechadas en la región 2 y región 3, por lo cual se esperaría que la resistencia a la compresión de las hojas de la región 1 será mayor que las hojas provenientes de la región 2 y región 3.

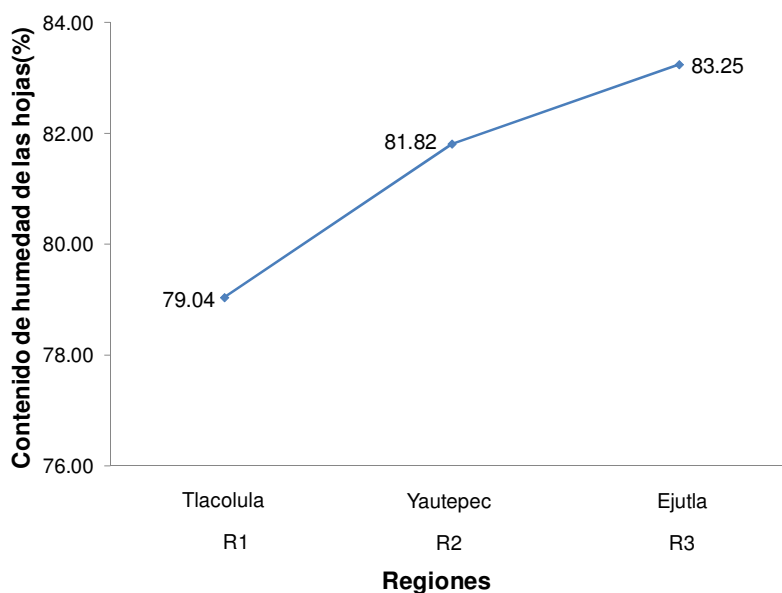


Figura 33. Gráfica de contenido de humedad de las regiones 1, 2 Y 3.



### 3.3. Ensayos a compresión

Posteriormente para los ensayos a compresión las probetas fueron transportadas al laboratorio del CESAT de la UPAEP. Las condiciones en el laboratorio para los ensayos, fue de 20°C y 50% de humedad relativa.

Cada una de las propiedades mecánicas (esfuerzo máximo ( $\sigma$ ), la deformación unitaria ( $\epsilon$ ), el módulo de elasticidad ( $E$ ) y la energía de compresión ( $Tc$ ) de las hojas del *Agave angustifolia* Haw fueron analizados y se presentan a continuación. Cabe recordar que se utilizó un arreglo factorial  $3^2 \times 2$  (tres regiones, dos posiciones y tres velocidades de deformación), dando un total de 18 tratamientos y 10 repeticiones, para un total de 180 unidades experimentales explicado en el diseño experimental en el apartado 2.1.

#### 3.3.1. Esfuerzo Máximo ( $\sigma$ )

Los datos obtenidos para el esfuerzo, se codificaron y ordenaron como se muestra en la Tabla 20 en el anexo 2, sucesivamente fue necesario realizarle tres pruebas a los datos obtenidos producto de los ensayos a compresión: a) de homogeneidad de varianzas (prueba de Bartlett y Levene's), b) de normalidad y c) de independencia, por el método gráfico. Para el caso de la homogeneidad, los datos se probaron con un nivel de significancia de 0.05 y contraste de Bartlett y Levene's. La Figura 34 muestra que las varianzas defieren entre las agrupaciones, sin embargo la variabilidad en las varianzas entre cada grupo no son significativamente diferentes (la varianzas son homogéneas).

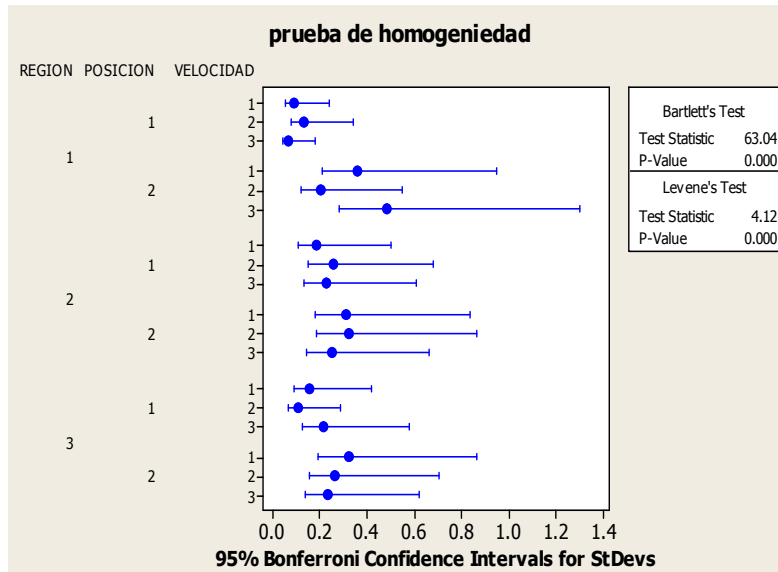


Figura 34. Prueba de homogeneidad para los datos de esfuerzo.

En lo que se refiere a la normalidad y con base en el argumento de la prueba realizada, es razonable asumir que los datos no se desvían substancialmente de una distribución normal, ya que los puntos se ajustan a la distribución normal como lo muestra la Figura 35. Cabe mencionar que si los datos no vinieran de una distribución normal, los puntos no seguirán la línea.

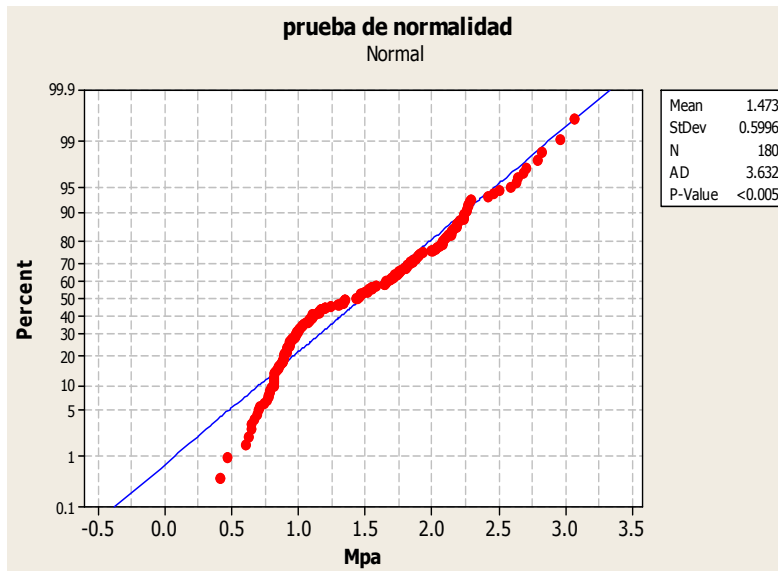


Figura 35. Prueba de normalidad para los datos de esfuerzo.

Finalmente, para el caso de Independencia, las gráficas de valores individuales muestran que cada tratamiento tiene un promedio diferente. Los grupos de poblaciones se logran diferenciar y no se nota que se vean afectados como se observa en la Figura 36. La región 2 con la posición 1 y con las tres respectivas velocidades presentan los valores más bajos; mientras que los puntos más altos los tienen las hojas de la región 1 (Tlacolula), ensayadas en posición

2 (perpendicular a la fibra) y con una velocidad de deformación 3 (25.4 mm/min). La varianza dentro de cada centro de entrega es muy similar. La línea del centro se refiere al promedio de cada grupo.

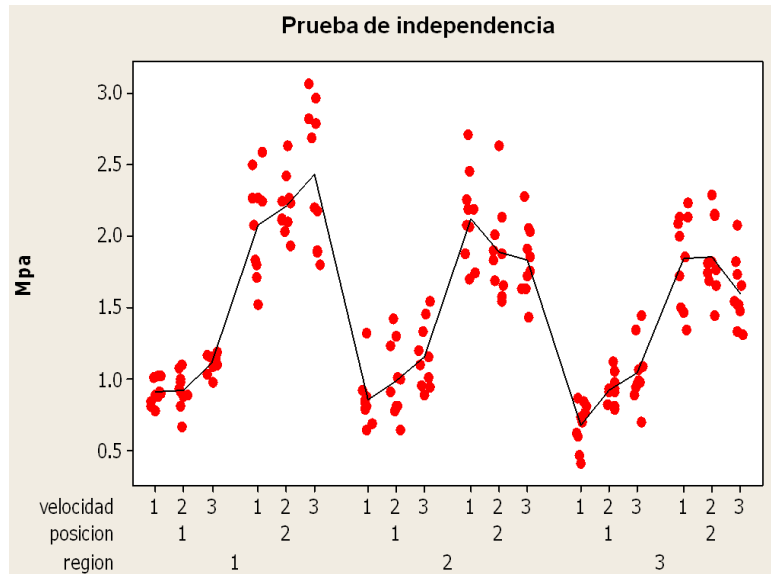


Figura 36. Prueba de independencia para los datos de esfuerzo.

Debido a que los datos mostraron homogeneidad, normalidad e independencia se procedió a realizar el análisis de varianza ANOVA como se muestra en Tabla 9. En primer lugar se observa que los factores Región (R) y posición (P) tienen un efecto significativo sobre el esfuerzo máximo de compresión. En seguida se observa que el factor velocidad (V) no tiene un efecto significativo sobre el esfuerzo máximo de compresión, esto es a un nivel de significancia del 5% ( $P < 0.05$ ). Finalmente, la interacción entre la Región, Posición y Velocidad (RPV) provoca un efecto significativo sobre el esfuerzo máximo de compresión, de igual manera a un nivel de significancia del 5% ( $P < 0.05$ ).

Tabla 9. Análisis de varianza (ANOVA) para el esfuerzo máximo de compresión ( $\sigma$ ).

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F-Valor	Pr>F
<b>Modelo</b>	17	53.9510798	3.17359293	49.85	<.0001
<b>Región(R)</b>	2	2.41605766	1.20802883	18.98	<.0001
<b>Posición(P)</b>	1	47.4250805	47.4250805	744.97	<.0001
<b>Velocidad(V)</b>	2	0.38115503	0.19057752	2.99	0.0529
<b>RP</b>	2	1.20860979	0.6043049	9.49	0.0001
<b>RV</b>	4	0.6275776	0.1568944	2.46	0.0472
<b>PV</b>	2	0.93034962	0.46517481	7.31	0.0009
<b>RPV</b>	4	0.96224958	0.2405624	3.78	0.0058
<b>Error</b>	162	10.3130314	0.06366069	----	----
<b>Total</b>	179	64.2641111	----	----	----
	<b>R-cuadrado</b>	<b>Coef Var</b>	<b>Raiz MSE</b>	<b><math>\sigma</math> Media</b>	
	0.839521	17.102345	0.252311	1.473481	

La Tabla 10 muestra el comportamiento de la resistencia a la compresión de las hojas del *Agave angustifolia* Haw por cada uno de los tratamientos ensayados y también se muestra la prueba de medias Tukey. Esto con la finalidad de realizar una comparación entre los tratamientos y establecer cuales marcan diferencias. Por medio de esta prueba se observó que la interacción entre la región (R), la posición (P) y la velocidad de deformación (V), afectan a la variable Esfuerzo ( $\sigma$ ). Las hojas provenientes de la región 1(Tlacolula), ensayadas en una posición 2(perpendicular) y una velocidad 3(25.4mm/min) (R1P2V3), son las hojas que soportan mayor esfuerzo antes de llegar al punto de ruptura con un valor medio de 2.43 MPa.

Tabla 10. Resistencia a la compresión de las hojas ( $\sigma$ )

Nº	Tratamiento	Esfuerzo, $\sigma$ (MPa)				
		Max.	Min.	Media	SD.	C. V.
1	R1P1V1	1.03	0.78	<b>0.91 de<sup>y</sup></b>	0.09	9.58
2	R2P1V1	1.33	0.65	<b>0.86 de</b>	0.19	21.66
3	R1P2V1	2.59	1.52	<b>2.08 ab</b>	0.35	17.00
4	R2P2V1	2.71	1.70	<b>2.13 ab</b>	0.31	14.59
5	R1P1V2	1.11	0.67	<b>0.93 de</b>	0.13	13.60
6	R2P1V2	1.43	0.65	<b>1.00 de</b>	0.25	25.38
7	R1P2V2	2.64	1.93	<b>2.21 ab</b>	0.20	9.20
8	R2P2V2	2.63	1.55	<b>1.89 bc</b>	0.32	16.96
9	R1P1V3	1.19	0.99	<b>1.12 d</b>	0.07	5.85
10	R2P1V3	1.55	0.89	<b>1.16 d</b>	0.23	19.43
11	R1P2V3	3.06	1.80	<b>2.43 a</b>	0.48	19.93
12	R2P2V3	2.28	1.44	<b>1.83 bc</b>	0.25	13.45
13	R3P1V1	0.87	0.41	<b>0.68 e</b>	0.15	22.54
14	R3P1V2	1.12	0.79	<b>0.93 de</b>	0.10	11.19
15	R3P1V3	1.45	0.71	<b>1.04 de</b>	0.21	20.51
16	R3P2V1	2.24	1.35	<b>1.85 bc</b>	0.32	17.41
17	R3P2V2	2.28	1.45	<b>1.85 bc</b>	0.26	14.12
18	R3P2V3	2.08	1.30	<b>1.60 c</b>	0.23	14.48
<b>Media</b>		1.87	1.14	<b>1.47</b>		

Max: Máximo, Min: Mínimo, SD: Desviación estándar, C.V: Coeficiente de variación.  
y: Medias con la misma letra indican similitud estadística

Siguiendo con el análisis de la resistencia a la compresión de las hojas del agave de las dos regiones (R), en las dos posiciones (P) y las tres velocidades de deformación ensayadas (V), como se muestra en la grafica de la Figura 37, los valores más altos de Esfuerzo ( $\sigma$ ) se obtuvieron en hojas de la región 1, en una posición 2 y realizando los ensayos con una velocidad 3. Esto quiere decir que las hojas que presentan una mayor resistencia a la compresión son las que provienen de la región de Tlacolula, ensayadas en posición perpendicular y empleando una velocidad de deformación de 25.4mm/min (R1P2V3).

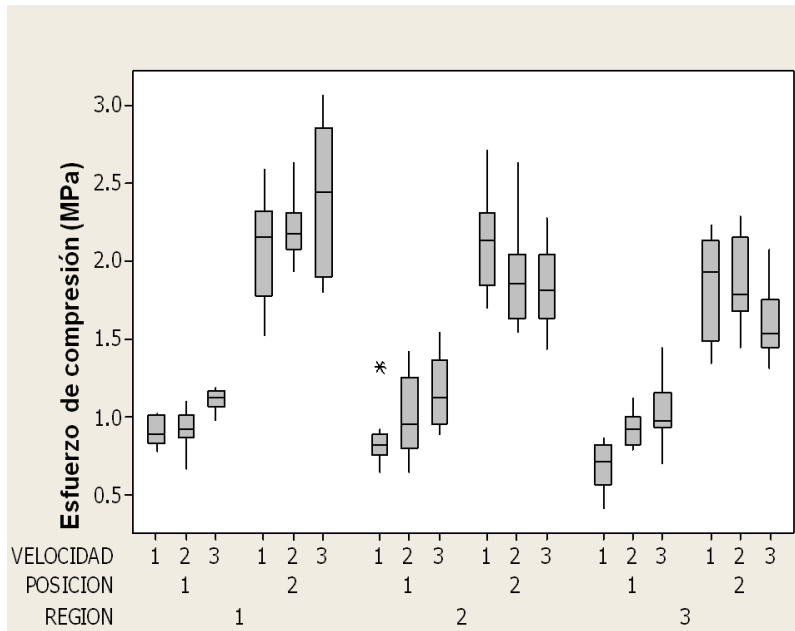


Figura 37. Gráfica de cajas para el Esfuerzo ( $\sigma$ ).

Gráficamente la Figura 38a y Figura 38b muestran mediante un análisis de intervalos de mínimas diferencias significativas (LSD) y prueba de medias por factores, a un nivel de significancia del 5% ( $P < 0.05$ ), el efecto de la región y la posición sobre la variable esfuerzo respectivamente. Según el análisis Tukey, se observa que la región y la posición afectan significativamente a esta variable. En la Figura 38a se observa que las hojas provenientes de la región 1 (Tlacolula) tienen una mayor resistencia a la compresión con un valor medio de 1.61 MPa, que las hojas que provienen de la región 2 (Yautepec) con un valor medio de 1.47 MPa y que las hojas que provienen de la región 3 (Ejutla) con un valor medio de 1.32 MPa. Así mismo en la Figura 38b se observa que las hojas ensayadas en posición 2 (perpendiculares a la fibra) tienen mayor resistencia a la compresión con un valor medio de 1.98 MPa, que las hojas ensayadas en posición 1 (paralelas a la fibra) con un valor medio de 0.96 MPa.

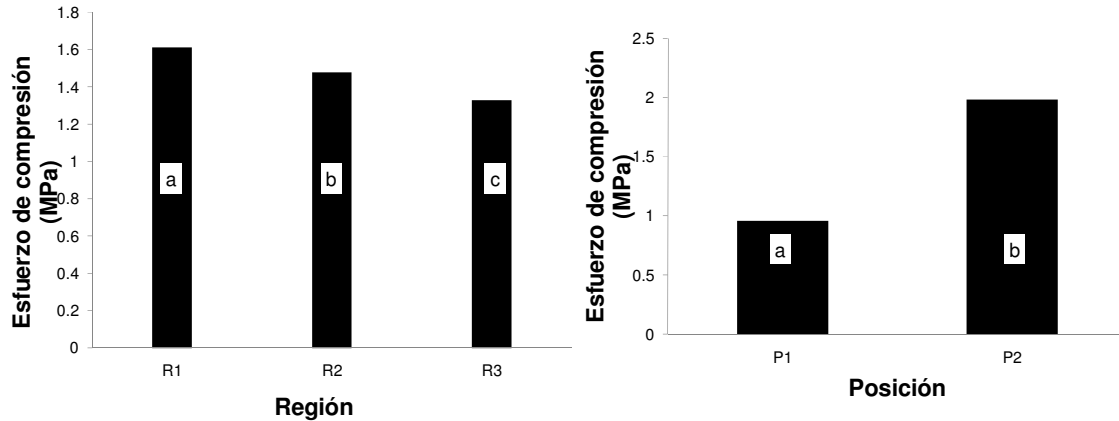


Figura 38. Prueba de medias para los factores: a) Región y b) Posición.  
Medias de cada factor con la misma letra indican similitud estadística

En lo que respecta al factor Velocidad, la Figura 39 muestra mediante un análisis de intervalos de mínimas diferencias significativas (LSD) y prueba de medias por factor, a un nivel de significancia del 5% el efecto de la velocidad, sobre el Esfuerzo máximo de compresión ( $\sigma$ ). En dicha figura y según el análisis Tukey, se observa que para la velocidad V3 (25.4mm/min), las hojas alcanzan la mayor resistencia con un valor medio de 1.53 MPa, disminuyendo significativamente cuando se reduce la velocidad de ensayo a una V2 (14mm/min) con un valor medio de 1.46 MPa y finalmente para la velocidad V1 (2.54mm/min), las hojas tienen una resistencia de 1.41 MPa. Esta disminución no es significativa respecto a la V2 pero si a la V3.

Con este análisis, se evidencia que la velocidad de deformación influye en la resistencia a la compresión de las hojas, cuando se incrementa la velocidad de deformación, el esfuerzo de compresión también, lo cual concuerda con (Kistrup y Nielsen, 2000), y Nuñez, et al., (2001), debido a que la magnitud del esfuerzo desarrollado no es solo función de la deformación, sino también de la velocidad impuesta y en forma general al aumentar la velocidad de deformación, los valores de la resistencia serán mayores.

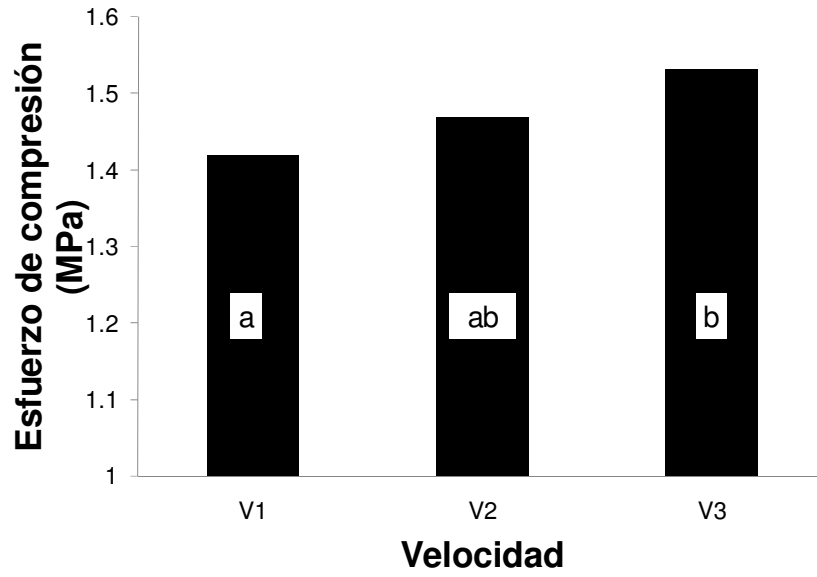


Figura 39. LSD y prueba de medias para el factor Velocidad.  
Medias con la misma letra indican similitud estadística

### 3.3.2. Deformación unitaria ( $\epsilon$ )

Los datos para deformación unitaria ( $\epsilon$ ) fueron obtenidos directamente del programa Trapezium Single, posteriormente se realizó el análisis de ANOVA, a través del programa SAS 9.0 para Windows. La Tabla 21 del anexo 2 muestra la ordenación y codificación de los datos que fueron obtenidos directamente del programa Trapezium Single. Sucesivamente, se realizaron las pruebas de homogeneidad, normalidad e independencia de los datos.

Para el caso de la homogeneidad, los datos se probaron con un nivel de significancia de 0.05 y contraste de Bartlett y Levene's, la Figura 40 muestra que la variabilidad en las varianzas no son significativamente diferentes (las varianzas son homogéneas).

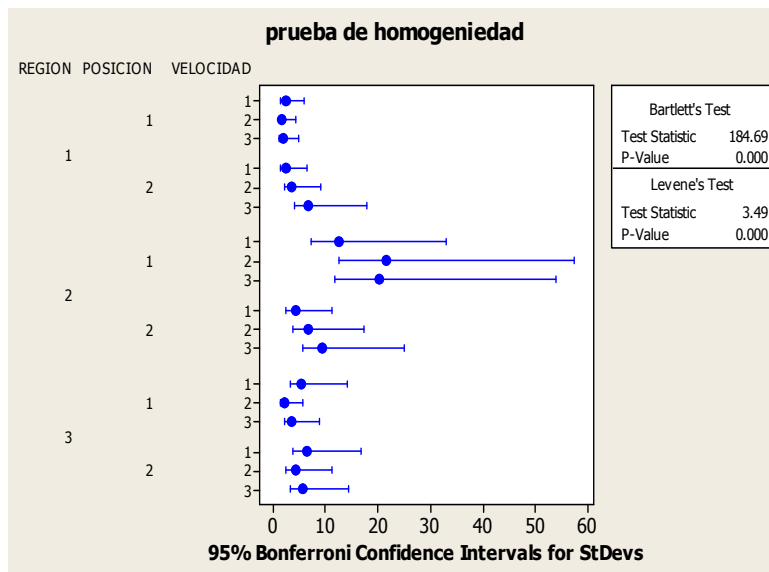


Figura 40. Prueba de homogeneidad para los datos de deformación unitaria.

En lo que se refiere a la normalidad, los datos obtenidos en los ensayos de compresión, y con base en el argumento de la prueba realizada, es razonable asumir que estos no se desvían substancialmente de una distribución normal, ya que los puntos siguen la línea de referencia como se muestra en la Figura 41. Cabe mencionar que si los datos no vinieran de una distribución normal, los puntos no seguirán la línea.



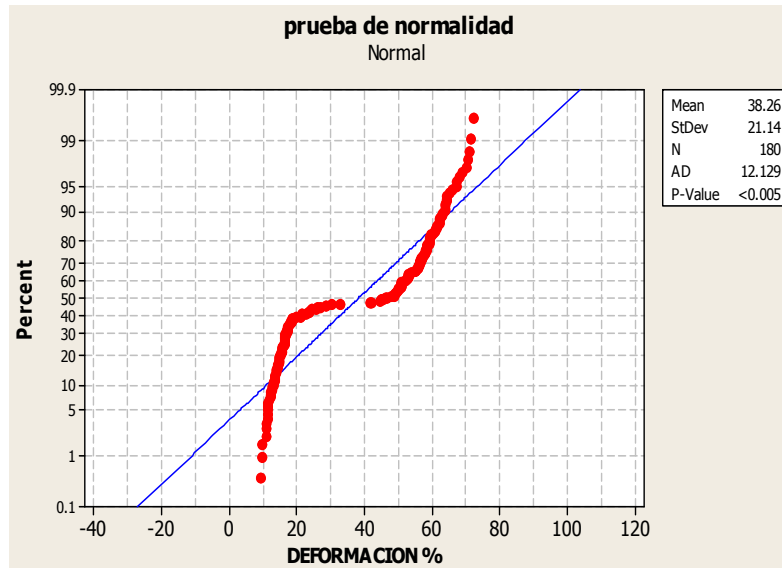


Figura 41. Prueba de normalidad para los datos de deformación unitaria.

Finalmente, para el caso de Independencia, las gráficas de valores individuales muestran que cada tratamiento tiene un promedio diferente como se observa en la Figura 42. Dichas gráficas ilustran que cada velocidad, posición y región tiene un promedio diferente. La región 1 con la posición 1 y con las tres respectivas velocidades presenta los valores de deformación más bajos; mientras que los puntos más altos los tiene la región 1, posición 2 y velocidad 3. La varianza dentro de cada centro de entrega parece ser la misma. La línea del centro se refiere al promedio de cada grupo.

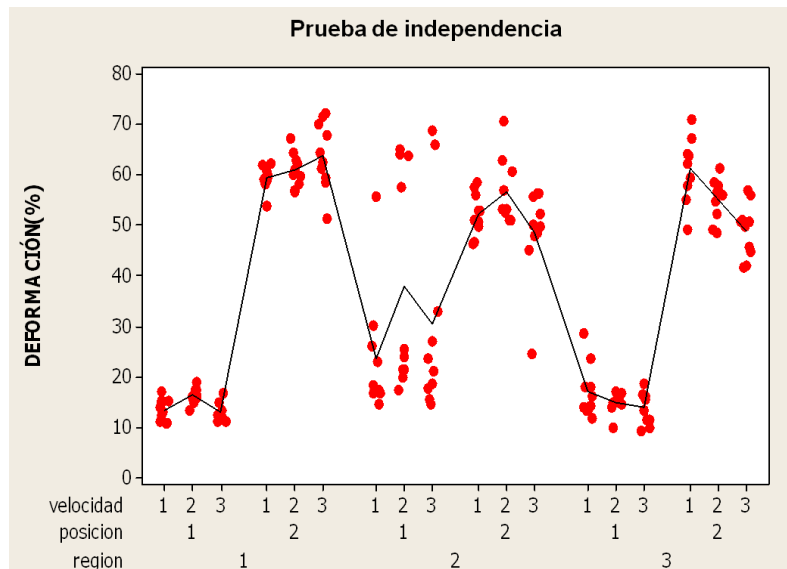


Figura 42. Prueba de independencia para los datos de deformación unitaria.

La Tabla 11 muestra el análisis de varianza ANOVA para la deformación y se presentan a continuación. En primer lugar se observa que el factor Región (R), el factor posición (P) y el factor velocidad (V) tienen un efecto significativo sobre la deformación, esto es a un nivel de

significancia del 5% ( $P < 0.05$ ). En seguida se observa que cuando hay interacción entre la Región, Posición y Velocidad (RPV) no provoca un efecto significativo sobre la deformación, de igual manera a un nivel de significancia del 5% ( $P < 0.05$ ).

Tabla 11. Análisis de varianza (ANOVA) para la deformación unitaria ( $\epsilon$ )

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F-Valor	Pr>F
<b>Modelo</b>	17	67823.3695	3989.60997	53.03	<.0001
<b>Región(R)</b>	2	1243.89606	621.94803	8.27	0.004
<b>Posición(P)</b>	1	59065.1919	59065.1919	785.16	<.0001
<b>Velocidad(V)</b>	2	461.41013	230.705065	3.07	0.0493
<b>RP</b>	2	5162.60275	2581.30138	34.31	<.0001
<b>RV</b>	4	1207.35877	301.839693	4.01	0.0039
<b>PV</b>	2	249.74801	124.874005	1.66	0.1934
<b>RPV</b>	4	433.16187	108.290468	1.44	0.2233
<b>Error</b>	162	12186.7713	75.2269832	-----	-----
<b>Total</b>	179	80010.1408	-----	-----	-----
	<b>R-cuadrado</b>	<b>Coef Var</b>	<b>Raiz MSE</b>	<b><math>\epsilon</math> Media</b>	
	0.847685	22.66962	8.673349	38.25979	

La Tabla 12 muestra el comportamiento de la deformación unitaria de las hojas del *Agave angustifolia* Haw por cada uno de los tratamientos ensayados, así como la prueba de medias Tukey para cada tratamiento, en la cual se indica la interacción entre la región (R), la posición (P) y la velocidad de deformación (V), afectan a la variable Deformación ( $\epsilon$ ). En ella se observa que las hojas provenientes de la región 1, con una posición perpendicular y una velocidad de 25.4mm/min, son las que se deforman mas antes de llegar al punto de ruptura con un valor medio de 63.968%, esto es a un valor critico del rango estudentizado de 4.72480 y una diferencia mínima significativa de 15.112%.

Tabla 12. Deformación unitaria de las hojas ( $\epsilon$ ).

Nº	Tratamiento	Deformación unitaria $\epsilon$ (%)				
		Max.	Min.	Media	S.D.	C. V.
1	R1P1V1	17.04	10.86	<b>13.49 f<sup>y</sup></b>	2.15	15.96
2	R2P1V1	55.80	14.51	<b>23.75 ef</b>	12.28	51.72
3	R1P2V1	62.28	53.91	<b>59.38 ab</b>	2.32	3.90
4	R2P2V1	58.43	46.43	<b>52.26 ab</b>	4.17	7.97
5	R1P1V2	18.83	13.46	<b>16.41 f</b>	1.50	9.17
6	R2P1V2	65.08	17.53	<b>38.10 cd</b>	21.36	56.06
7	R1P2V2	67.31	56.52	<b>60.95 ab</b>	3.37	5.53
8	R2P2V2	70.77	51.03	<b>56.56 ab</b>	6.42	11.36
9	R1P1V3	16.70	11.31	<b>12.91 f</b>	1.73	13.38
10	R2P1V3	68.83	14.65	<b>30.62 ed</b>	20.13	65.76
11	R1P2V3	72.15	51.47	<b>63.96 a</b>	6.60	10.32
12	R2P2V3	56.28	24.55	<b>48.69 bc</b>	9.28	19.05
13	R3P1V1	28.54	11.97	<b>17.13 ef</b>	5.24	30.61
14	R3P1V2	17.12	9.92	<b>14.99 f</b>	2.05	13.68
15	R3P1V3	9.88	18.73	<b>9.22 f</b>	10.58	3.25
16	R3P2V1	71.04	49.26	<b>61.39 ab</b>	6.25	10.18
17	R3P2V2	61.25	48.65	<b>55.22 ab</b>	4.08	7.39
18	R3P2V3	56.88	41.59	<b>48.93 bc</b>	5.33	10.91
<b>Media</b>		48.57	30.35	<b>38.00</b>		

Max: Máximo, Min: Mínimo, SD: Desviación estándar, C.V: Coeficiente de variación.  
y: Medias con la misma letra indican similitud estadística

La Figura 43 ilustra el análisis gráfico de la deformación unitaria de las hojas del agave, en ella se puede observar que las hojas de agave donde se obtuvo el valor más alto de deformación unitaria ( $\epsilon$ ) fueron de las que provienen de la región 1, ensayadas en dirección perpendicular (P2) a una velocidad de 25.4mm/min.

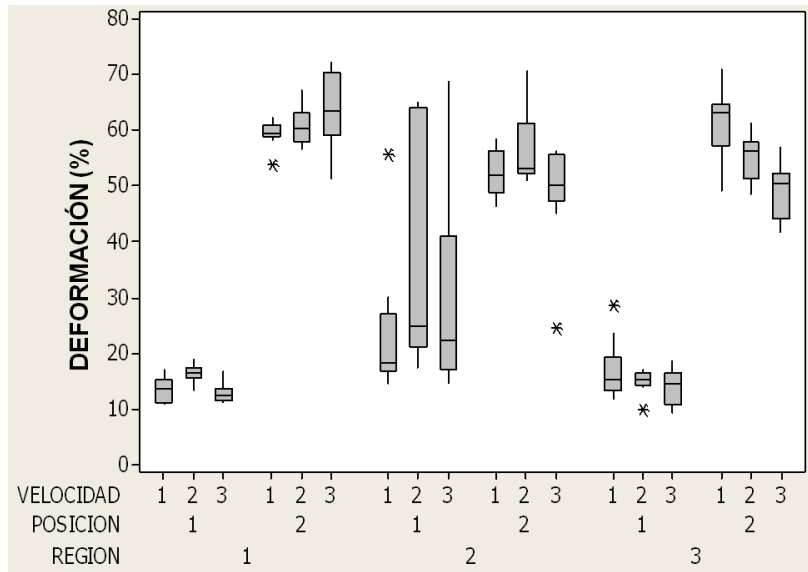


Figura 43. Gráfica de cajas para el análisis descriptivo de la deformación unitaria ( $\epsilon$ ).

En la Figura 44a y Figura 44b se muestra mediante un análisis de intervalos de mínimas diferencias significativas (LSD) y prueba de medias por factor, a un nivel de significancia del 5% ( $P < 0.05$ ), el efecto de la región y posición, sobre la deformación unitaria ( $\epsilon$ ). Según el análisis Tukey, se observa que, las hojas que provienen de R1 (Tlacolula) y R3 (Ejutla) tienen similitud estadística con un valor de 37.85 y 35.26 % respectivamente. Sin embargo, las hojas de R2 (Yautepec) es donde se obtiene el valor más alto de deformación con un valor medio de 41.663%, siendo estadísticamente diferente con respecto a la deformación de las hojas de las regiones R1 y R2.

Así mismo las hojas ensayadas en posición 2 sufren una mayor deformación con un valor medio de 56.374%, que las hojas ensayadas en posición 1 con un valor medio de 20.145%.

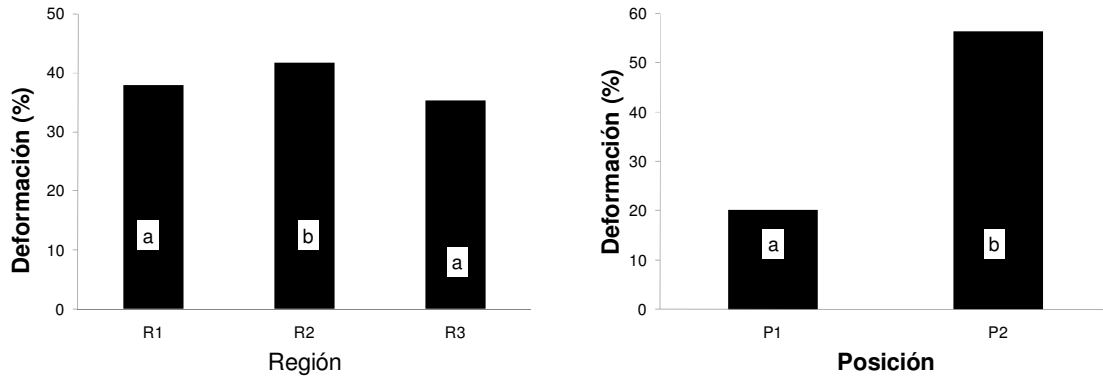


Figura 44. Prueba de medias para el factor: a) Región y b) Posición. Medias de cada factor con la misma letra indican similitud estadística

De la Figura 45 se puede observar el efecto de la velocidad de ensayo, sobre la deformación unitaria ( $\epsilon$ ) a un nivel de significancia del 5% ( $P < 0.05$ ). Según el análisis de Tukey se observa que a medida que se incrementa la velocidad de la aplicación de la carga, las hojas se deforman más, ya que para la velocidad V1 (2.54mm/min) las hojas se deforman 37.22%, aumentando de forma significativa cuando se emplea la velocidad V2 (14mm/min), la deformación crece a 40.375%. Sin embargo, cuando se emplea la V3 (25.4mm/min), la deformación en las hojas muestran un efecto significativo respecto a la V1 y V2, disminuyendo considerablemente con un valor 36.503%.

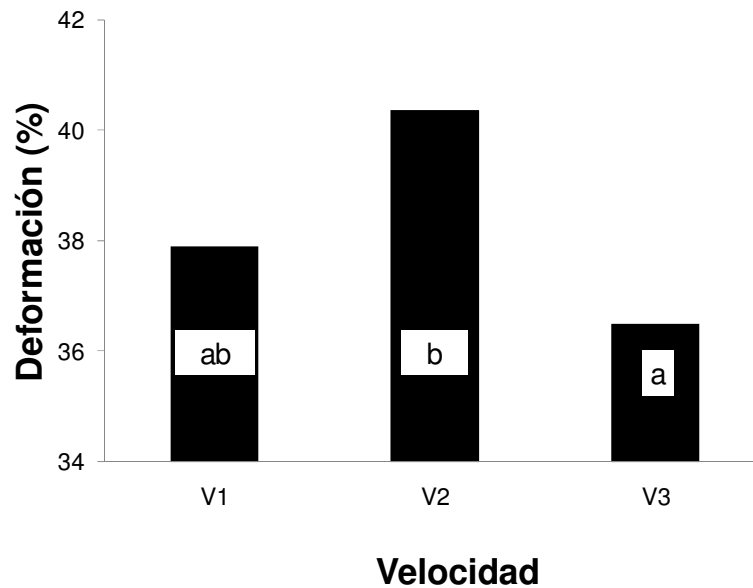


Figura 45. Prueba de medias para el factor Velocidad. Medias con la misma letra indican similitud estadística

### 3.3.3. Módulo de elasticidad ( $E$ )

La Tabla 22 en el anexo 2, muestra la ordenación y codificación de los datos que fueron obtenidos directamente del programa Trapezium Single, al igual que en el caso del esfuerzo y deformación unitaria, se efectuaron las tres pruebas a los datos del módulo de elasticidad. Para el caso de la homogeneidad, los datos se probaron con un nivel de significancia de 0.05 y contraste de Bartlett y Levene's. La Figura 46 demuestra que las varianzas son homogéneas.

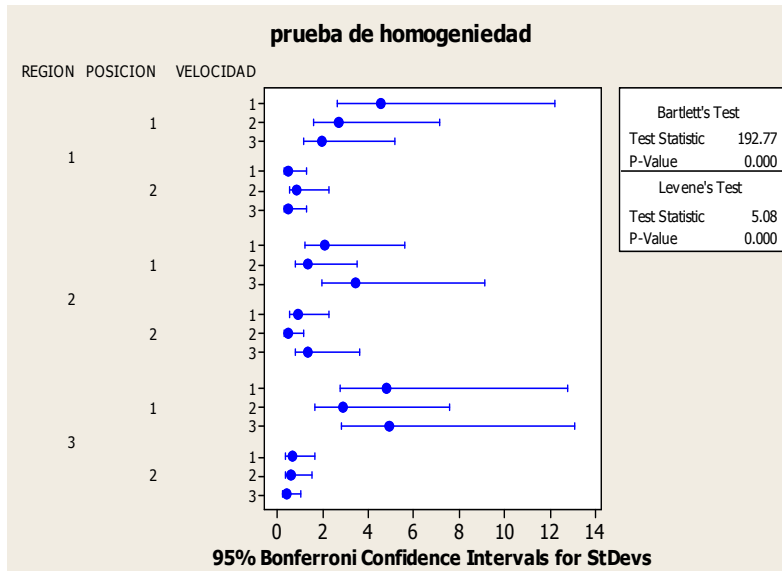


Figura 46. Prueba de homogeneidad para los datos de módulo de elasticidad.

En lo que se refiere a la normalidad, los datos obtenidos en los ensayos de compresión, y con base en el argumento de la prueba realizada, es razonable asumir que estos no se desvían substancialmente de una distribución normal, ya que los puntos siguen la línea de referencia como se muestra en la Figura 47, es importante hacer notar que si los datos no vinieran de una distribución normal, los puntos no seguirán la línea.

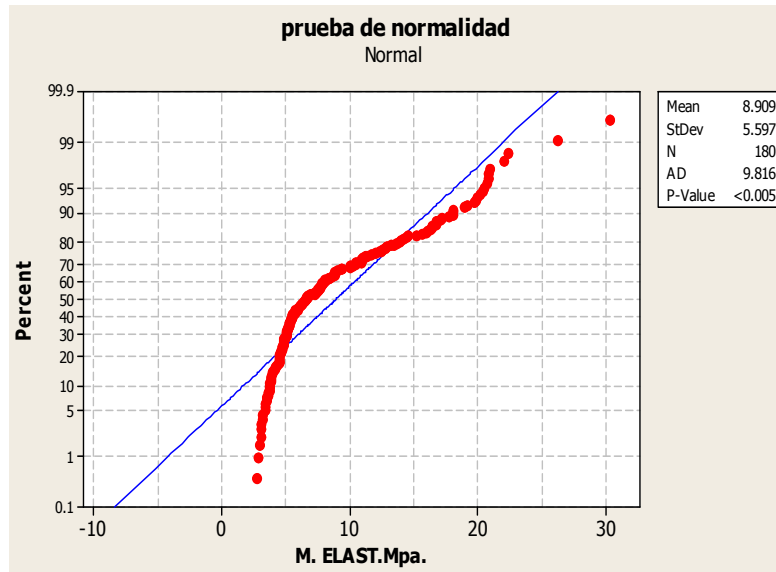


Figura 47. Prueba de normalidad para los datos de módulo de elasticidad.

Finalmente, para el caso de Independencia, las gráficas de valores individuales muestran que cada tratamiento tiene un promedio diferente como se observa en la Figura 48. Las gráficas de valores individuales ilustran que cada velocidad, posición y región tiene un promedio diferente. Los puntos más altos los tiene la región 1, posición 1 y velocidad 3. La varianza dentro de cada centro de entrega parece ser la misma. La línea del centro se refiere al promedio de cada grupo.

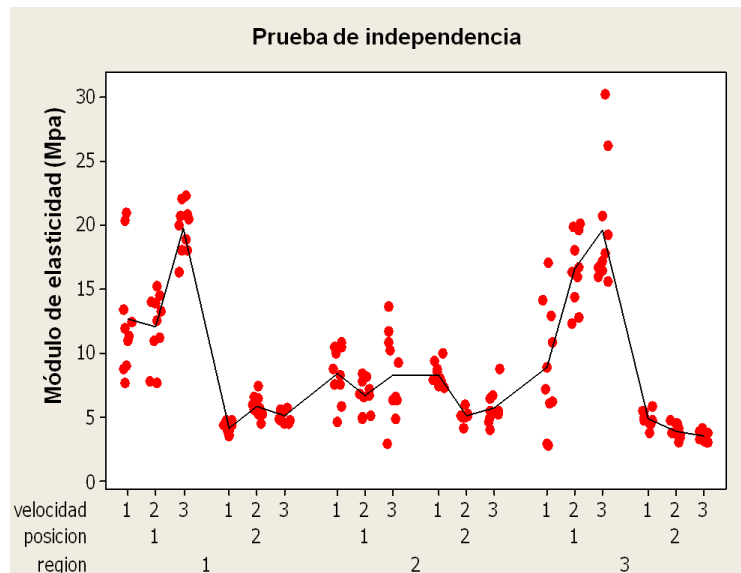


Figura 48. Prueba de independencia para los datos de módulo de elasticidad.

Los datos del módulo de elasticidad obtenidos en los ensayos manifestaron homogeneidad, normalidad e independencia, debido a que cumplió con estas condiciones se procedió con el análisis de varianza ANOVA mostrada en la Tabla 13. En primer lugar se observa que los tres factores Región (R), posición (P) y velocidad de ensayo (V) tienen un efecto significativo

sobre el módulo de elasticidad, a un nivel de significancia de 5% ( $P < 0.05$ ). En seguida se observa que la interacción entre la Región, Posición y Velocidad (RPV) también provoca un efecto significativo sobre el módulo de elasticidad, de igual manera a un nivel de significancia del 5% ( $P < 0.05$ ).

Tabla 13. Análisis de varianza (ANOVA) para el Módulo de elasticidad (E)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F-Valor	Pr>F
<b>Modelo</b>	17	4636.05144	272.708908	45.44	<.0001
<b>Región(R)</b>	2	288.389234	144.194617	24.03	<.0001
<b>Posición(P)</b>	1	2454.54707	2454.54707	409.01	<.0001
<b>Velocidad(V)</b>	2	197.938966	98.969483	16.49	<.0001
<b>RP</b>	2	816.922087	408.461044	68.06	<.0001
<b>RV</b>	4	282.65963	70.6649075	11.78	<.0001
<b>PV</b>	2	362.189202	181.094601	30.18	<.0001
<b>RPV</b>	4	233.405256	58.351314	9.72	<.0001
<b>Error</b>	162	972.19431	6.00119944	-----	-----
<b>Total</b>	179	5608.24575	-----	-----	-----
	<b>R-cuadrado</b>	<b>Coef Var</b>	<b>Raiz MSE</b>	<b>ε Media</b>	
	0.826649	27.49758	2.449735	8.90891	

La Tabla 14 muestra el comportamiento promedio de los tratamientos ensayados del módulo de elasticidad de las hojas del *Agave angustifolia* Haw, así como la prueba de medias Tukey para cada uno. Tómese en cuenta, que esto se realizó con la finalidad de comparar entre las medias de cada uno de los tratamientos y establecer cuáles de ellos marcan diferencias entre sí.

En dicha tabla se observa también que las hojas provenientes de la región 1 (R1), ensayadas en posición paralela a la fibra (P1) y usando una velocidad deformación de 25.4mm/min (V3), son las hojas más rígidas con un valor medio de 19.80 MPa. Esto es a un valor crítico del rango estudentizado de 4.72480 y una diferencia mínima significativa de 3.1299MPa.



Tabla 14. Módulo de elasticidad de las hojas (E)

Nº	Tratamiento	Módulo de elasticidad, $E$ (MPa)				
		Max.	Min.	Media	S.D.	C. V.
1	R1P1V1	20.94	7.77	<b>12.74 b<sup>y</sup></b>	4.54	35.65
2	R2P1V1	10.89	4.66	<b>8.48 cde</b>	2.08	24.55
3	R1P2V1	4.80	3.54	<b>4.15 f</b>	0.46	11.14
4	R2P2V1	10.05	7.42	<b>8.38 cde</b>	0.84	10.06
5	R1P1V2	15.22	7.67	<b>12.15 bc</b>	2.66	21.92
6	R2P1V2	8.41	4.89	<b>6.70 def</b>	1.30	19.39
7	R1P2V2	7.52	4.54	<b>5.93 def</b>	0.83	13.91
8	R2P2V2	6.02	4.26	<b>5.17 def</b>	0.42	8.22
9	R1P1V3	22.33	16.32	<b>19.80 a</b>	1.91	9.66
10	R2P1V3	13.71	2.92	<b>8.31 cde</b>	3.39	40.79
11	R1P2V3	5.74	4.57	<b>5.15 def</b>	0.46	8.87
12	R2P2V3	8.82	4.02	<b>5.75 def</b>	1.33	23.16
13	R3P1V1	17.08	2.80	<b>8.94 bcd</b>	4.76	53.26
14	R3P1V2	20.12	12.36	<b>16.64 a</b>	2.82	16.99
15	R3P1V3	30.29	15.68	<b>19.64 a</b>	4.88	24.84
16	R3P2V1	5.91	3.83	<b>4.95 ef</b>	0.59	12.04
17	R3P2V2	4.79	3.05	<b>3.91 f</b>	0.55	14.30
18	R3P2V3	4.20	3.09	<b>3.54 f</b>	0.38	10.80
Media		12.05	6.30	<b>8.91</b>		

Max: Máximo, Min: Mínimo, SD: Desviación estándar, C.V: Coeficiente de variación.  
y: Medias con la misma letra indican similitud estadística

En el análisis gráfico del módulo de elasticidad mostrado en la Figura 49, se puede observar que las hojas de agave donde se obtuvo los valores medios más altos del módulo de elasticidad ( $E$ ) fueron de las hojas que provienen de la región 1 (R1), ensayadas en dirección paralela (P1) y con velocidades de deformación de 25.4mm/min (V3)

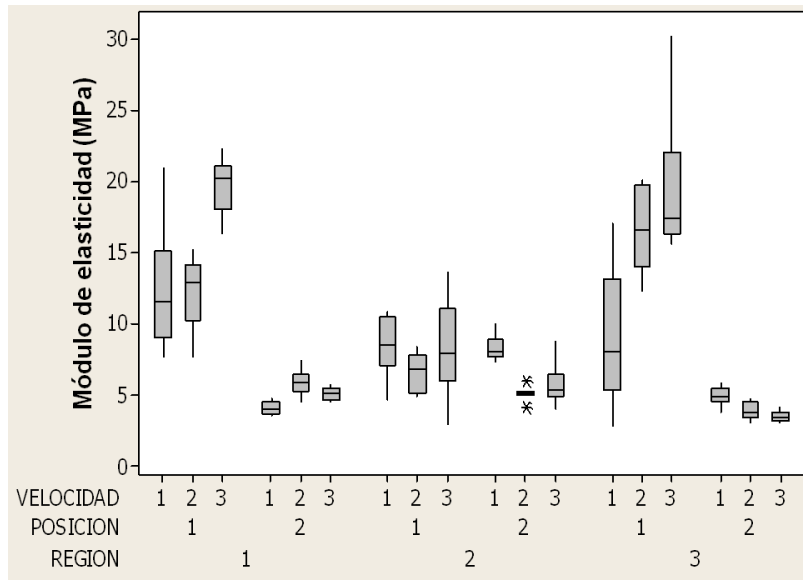


Figura 49. Gráfica de cajas, del módulo de elasticidad (E).

Gráficamente la Figura 50a y la Figura 50b manifiestan si existe algún efecto de la Región y la Posición sobre el Módulo de elasticidad, a través prueba de medias por factor e intervalos de mínimas diferencias significativas (LSD), a un nivel de significancia del 5% ( $P < 0.05$ ). En la Figura 50a se observa, según el análisis Tukey, que las hojas provenientes de la región 1 (Tlacolula) son las más rígidas con un valor medio de 9.98 MPa, que las hojas que provienen de la región 2 (Yautepec), pero no tiene una diferencia significativa respecto a las hojas de la región 3 (Ejutla). Así mismo, según la posición de ensayo las hojas tienen un comportamiento diferente, ya que para una P1 (paralela a las fibras) las hojas tienen una rigidez de 12.60 MPa y cuando las hojas son ensayadas en una P2 (perpendicular a la fibra) causa una disminución significativa de la rigidez con un valor medio de 5.21 MPa, como se muestra en la Figura 50b, este hecho concuerda con investigaciones realizadas a otros materiales fibrosos como la yuca, ya que este material es más rígido en sentido paralelo que en sentido perpendicular a la fibra (Ciro, et al., 2007),

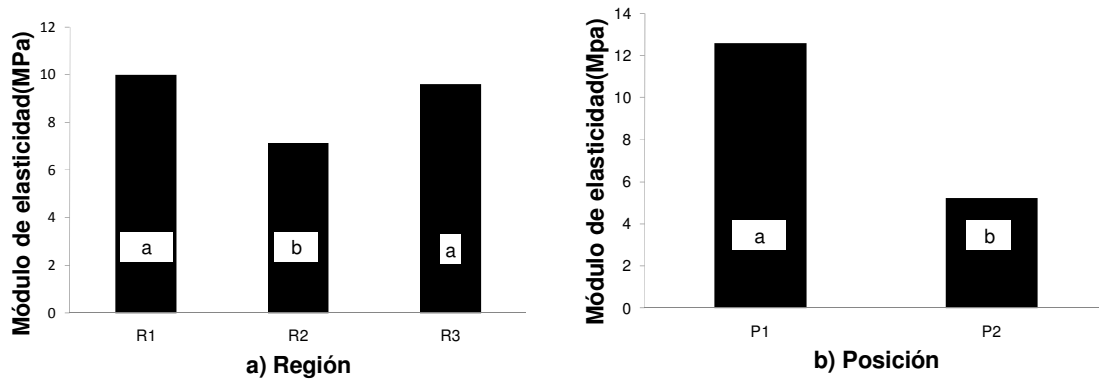


Figura 50. Prueba de medias para los factores: a) Región y b) Posición. Medias de cada factor con la misma letra indican similitud estadística

En la gráfica mostrada en la Figura 51, se observa el efecto de la velocidad, sobre el Módulo de elasticidad ( $E$ ), mediante un análisis de intervalos de mínimas diferencias significativas (LSD) y prueba de medias por factor, a un nivel de significancia del 5% ( $P < 0.05$ ). En dicha figura se observa que a medida que se incrementa la velocidad aumenta la rigidez de las hojas. Para la V1 (2.54mm/min), las hojas tienen una rigidez de 7.94 MPa, para la V2 (14mm/min) la rigidez crece, pero este aumento no es significativo respecto a la V1, finalmente al ensayarse las hojas con V3 (25.4mm/min) las hojas tienen un incremento significativo respecto a la V1 y V2 con un valor de 10.36 MPa. En general con este análisis se evidencia que la velocidad de deformación influye significativamente en la rigidez de las hojas, ya que a mayor velocidad de deformación, las hojas tienden a ser más rígidas.

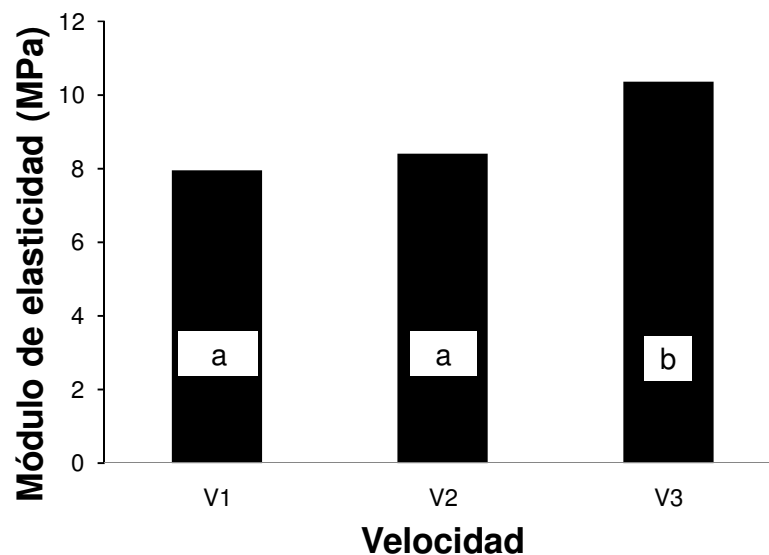


Figura 51. LSD y prueba de medias para el factor Velocidad. Medias con la misma letra indican similitud estadística

### 3.3.4. Energía de Compresión ( $T_c$ )

En el caso de la energía de compresión necesaria para llevar al punto de fractura al material ensayado, la Tabla 23 en el anexo 2 muestra la ordenación y codificación de los datos que fueron obtenidos directamente del programa Trapezium Single. Posteriormente estos datos fueron suministrados al paquete SAS 9.0. Con esta información se hicieron las pruebas de homogeneidad, normalidad e independencia para finalmente efectuar el análisis de varianza ANOVA. Al igual que para los casos anteriores, se realizaron las tres pruebas a los datos de la energía de compresión. Para el caso de la homogeneidad, los datos se probaron con un nivel de significancia de 0.05 y contraste de Bartlett y Levene's. La Figura 52 muestra que la variabilidad en las varianzas no son significativamente diferentes (las varianzas son homogéneas).

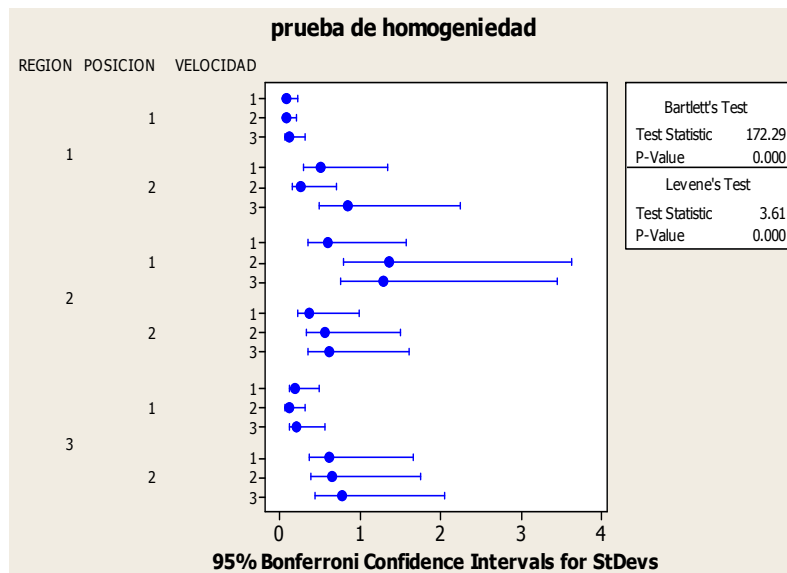


Figura 52. Prueba de homogeneidad para los datos de la energía de compresión

En lo que se refiere a la normalidad, los datos obtenidos en los ensayos de compresión, y con base en el argumento de la prueba realizada, es razonable asumir que estos no se desvían substancialmente de una distribución normal, ya que los puntos siguen la línea de referencia como se muestra en la Figura 53. Si los datos no vinieran de una distribución normal, los puntos no seguirán la tendencia lineal.

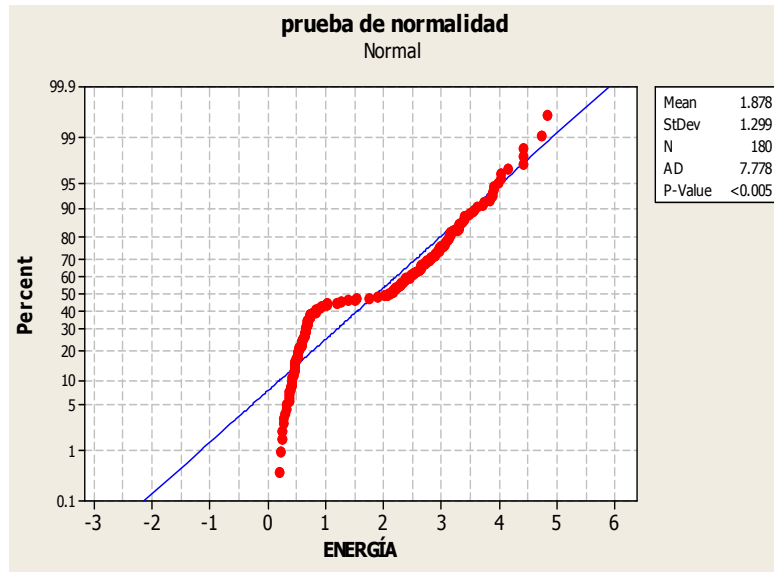


Figura 53. Prueba de normalidad para los datos de módulo de elasticidad.

Finalmente para el caso de Independencia, las gráficas de valores individuales muestran que cada tratamiento tiene un promedio diferente como se observa en la Figura 54. Las gráficas de valores individuales muestran que cada velocidad, posición y región tiene un promedio diferente. Los puntos más altos los tiene la región 1, posición 1 y velocidad 3. La varianza dentro de cada centro de entrega parece ser la misma. La línea del centro se refiere al promedio de cada grupo.

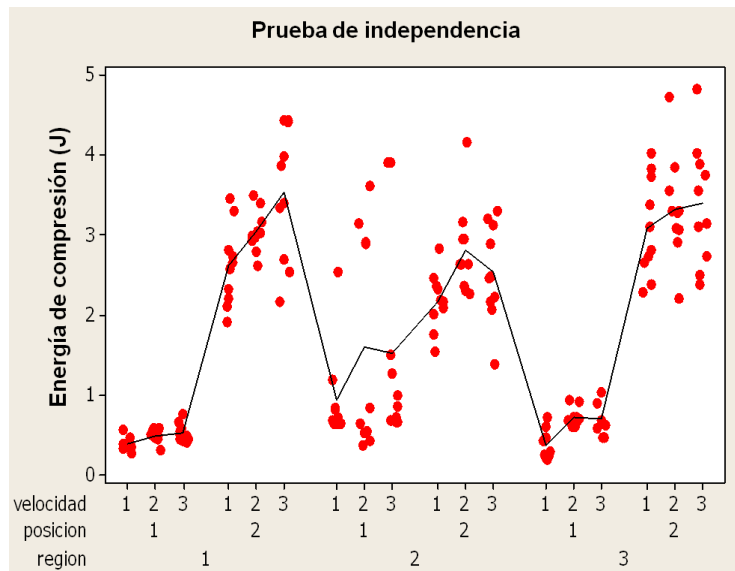


Figura 54. Prueba de homogeneidad para los datos de módulo de elasticidad.

Dado que los datos obtenidos en los ensayos mostraron homogeneidad, normalidad e independencia se procedió con el análisis de varianza ANOVA, en ella indica que la la posición de carga paralela y perpendicular a la fibra (P1 y P2), la velocidad de deformación

(V1, V2 y V3) y la interacción de ellas es significativa al 5%( $P<0.05$ ), no así para el factor región (R), como se muestra a continuación en la Tabla 15.

Tabla 15. Análisis de varianza (ANOVA) para la energía de compresión ( $T_c$ )

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F-Valor	Pr>F
<b>Modelo</b>	17	237.914216	13.9949539	35.25	<.0001
<b>Región(R)</b>	2	1.0913718	0.5456859	1.37	0.2559
<b>Posición(P)</b>	1	204.979359	204.979359	516.33	<.0001
<b>Velocidad(V)</b>	2	7.0830923	3.54154615	8.92	0.0002
<b>RP</b>	2	21.6808197	10.8404099	27.31	<.0001
<b>RV</b>	4	1.3818657	0.34546643	0.87	0.4832
<b>PV</b>	2	0.2300773	0.11503865	0.29	0.7488
<b>RPV</b>	4	1.4676302	0.36690755	0.92	0.4514
<b>Error</b>	162	64.3127576	0.39699233	----	----
<b>Total</b>	179	302.226873	----	----	----
	<b>R-cuadrado</b>	<b>Coef Var</b>	<b>Raiz MSE</b>	<b>Tc Media</b>	
	0.787204	33.55192	0.630073	1.877905	

Los resultados de la energía de compresión obtenidos durante el ensayo se exponen en la Tabla 16. Se observa el promedio del comportamiento de la energía necesaria para llevar el producto al punto de falla, así mismo se muestra la prueba de medias Tukey para cada uno de los tratamientos, en la cual se indica la interacción entre la región (R), la posición (P) y la velocidad de deformación (V), afectan a la variable energía de compresión ( $T_c$ ). En ella se observa que las hojas provenientes de la región 1 (R1), con una posición perpendicular (P2) y ensayadas con una velocidad de 25.4mm/min (V3), son las hojas que necesitan mayor cantidad de energía para hacer que fallen, esto es a un valor crítico del rango estudentizado de 4.72480 y una diferencia mínima significativa de 1.0271MPa.

Tabla 16. Energía de compresión de las hojas (Tc)

Nº	Tratamiento	Energía de compresión, $T_c$ (J)				
		Max.	Min.	Media	S.D.	C. V.
1	R1P1V1	0.57	0.27	<b>0.39 g<sup>y</sup></b>	0.08	20.13
2	R2P1V1	2.54	0.64	<b>0.94 efg</b>	0.58	62.14
3	R1P2V1	3.46	1.91	<b>2.61 ab</b>	0.50	19.10
4	R2P2V1	2.84	1.54	<b>2.17 bcd</b>	0.36	16.74
5	R1P1V2	0.58	0.33	<b>0.50 g</b>	0.07	14.67
6	R2P1V2	3.62	0.38	<b>1.60 cde</b>	1.35	84.66
7	R1P2V2	3.49	2.62	<b>3.04 ab</b>	0.26	8.53
8	R2P2V2	4.15	2.28	<b>2.81 ab</b>	0.56	19.80
9	R1P1V3	0.77	0.42	<b>0.53 fg</b>	0.12	21.65
10	R2P1V3	3.91	0.66	<b>1.52 def</b>	1.29	84.88
11	R1P2V3	4.43	2.16	<b>3.53 a</b>	0.84	23.71
12	R2P2V3	3.29	1.39	<b>2.53 abc</b>	0.60	23.70
13	R3P1V1	0.72	0.20	<b>0.37 g</b>	0.18	48.23
14	R3P1V2	0.93	0.60	<b>0.72 efg</b>	0.11	15.58
15	R3P1V3	1.03	0.46	<b>0.71 efg</b>	0.20	29.09
16	R3P2V1	4.02	2.29	<b>3.09 ab</b>	0.61	19.95
17	R3P2V2	4.72	2.20	<b>3.32 a</b>	0.65	19.64
18	R3P2V3	4.81	2.38	<b>3.39 a</b>	0.76	22.44
<b>Media</b>		2.77	1.26	<b>1.88</b>		

Max: Máximo, Min: Mínimo, SD: Desviación estándar, C.V: Coeficiente de variación.  
y: Medias con la misma letra indican similitud estadística

Siguiendo con el análisis de la energía de compresión, en la grafica de la Figura 55 se puede observar que las hojas de agave donde se obtuvo el valor promedio más alto de la energía de compresión fueron de las hojas que provienen de la región 1, ensayadas en dirección perpendicular (P2) a una velocidad de 25.4 mm/min con un valor medio de 3.53 J.

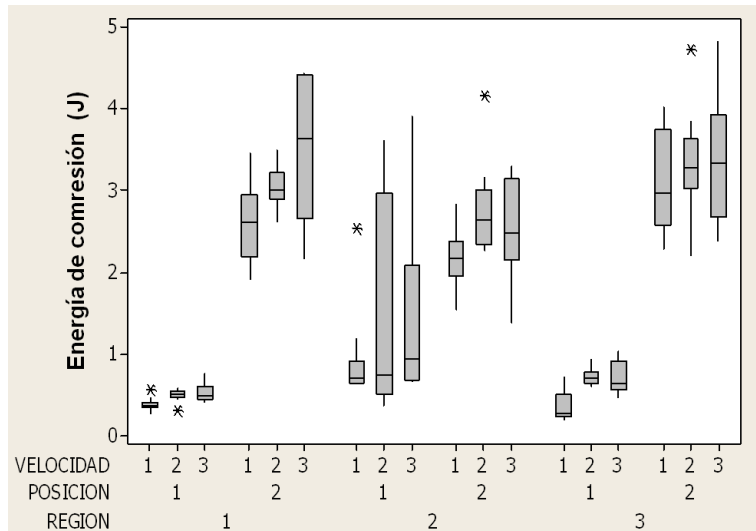


Figura 55. Gráfica de cajas para el análisis descriptivo de la energía de compresión (E).

Gráficamente, la Figura 56a y la Figura 56b muestra si existe algún efecto de la región y la posición sobre la energía de compresión. Esto mediante un análisis de intervalos de mínimas diferencias significativas (LSD) y prueba de medias por factor, a un nivel de significancia del 5% ( $P < 0.05$ ). En la Figura 56-a se observa que la región de donde provienen las hojas no tiene un efecto sobre la cantidad de energía necesaria para llevarlas al punto de fractura, debido a que se observa similitud estadística entre las 3 regiones. Por lo contrario según la posición de ensayo las hojas tienen un comportamiento diferente, ya que para una P1 (paralela a las fibras) las hojas necesitan una energía de 0.914 J y cuando las hojas son ensayadas en una P2 (perpendicular a la fibra) causa un aumento en la energía con un valor medio de 2.7825 J, esto es a un valor crítico del rango estudentizado de 2.80322 y una diferencia significativa mínima de 0.7581 J.

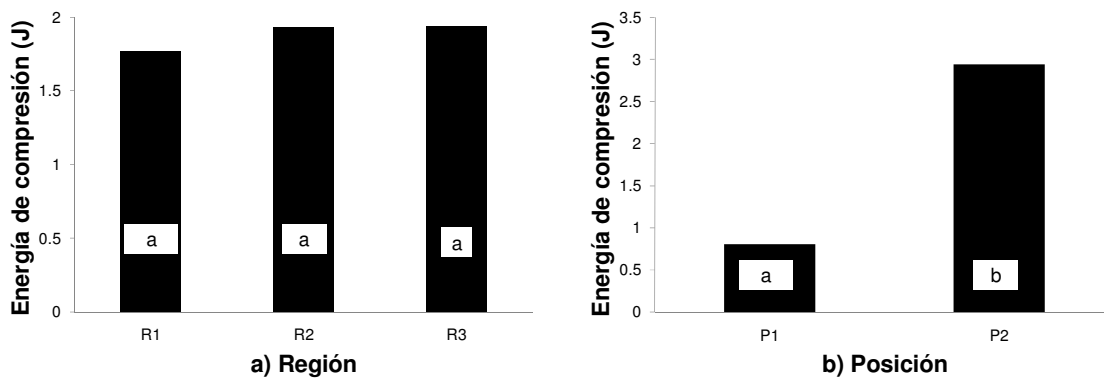


Figura 56. LSD y prueba de medias para el factor Región.  
Medias de cada factor con la misma letra indican similitud estadística

En la gráfica mostrada en la Figura 57 mediante un análisis de intervalos de mínimas diferencias significativas (LSD) y prueba de medias por factor, a un nivel de significancia del



5%( $P < 0.05$ ), se observa el efecto de la velocidad, sobre la energía de compresión. En dicha figura se muestra que a medida que se aumenta la velocidad, se necesita mayor energía para llevarlas al punto de falla, ya que para la V1 (2.54mm/min). Las hojas necesitan una energía de 1.59 J, para la velocidad 2 (14mm/min) se necesita una energía de 1.99 J, según el análisis Tukey este aumento es significativo respecto a la velocidad 1, finalmente al ensayarse las hojas con la V3 (25.4mm/min) las hojas tienen un aumento significativo solo respecto a la velocidad 1 con un valor de 2.03 J.

En general con este análisis se evidencia que la velocidad de deformación influye significativamente en la energía necesaria para llevar el producto al punto de ruptura, ya que a mayor velocidad de deformación, las hojas necesitan mayor energía para llegar a dicho punto.

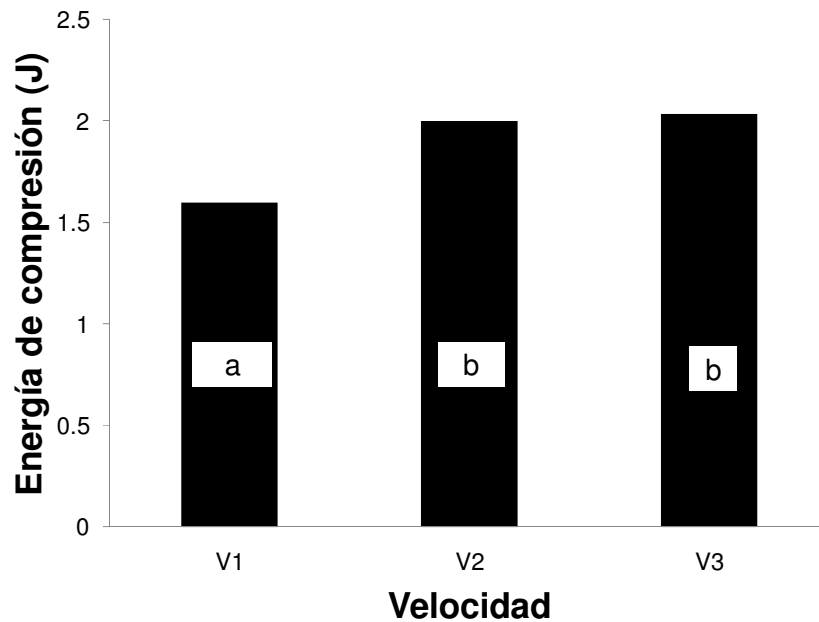


Figura 57. LSD y prueba de medias para el factor Velocidad. Medias de cada factor con la misma letra indican similitud estadística

### 3.4. Correlación entre el esfuerzo ( $\sigma$ ), deformación unitaria ( $\epsilon$ ), módulo de elasticidad ( $E$ ) y Energía de compresión ( $T_c$ )

La Tabla 17 muestra el análisis de correlación entre las variables Esfuerzo ( $\sigma$ ), deformación unitaria ( $\epsilon$ ), el módulo de elasticidad ( $E$ ) y la energía de compresión ( $T_c$ ) a través de los coeficientes de correlación de Pearson. En dicha tabla se observa una relación directa, entre el esfuerzo, la deformación y la energía de compresión ya que a medida que se produce un mayor esfuerzo en las hojas, la deformación y la energía de compresión se incrementa en idéntica proporción. Así mismo se observa que no ocurre lo mismo entre el esfuerzo y el módulo de elasticidad ya que entre ellos existe una relación inversa, debido a que al aumentar el esfuerzo, disminuye la rigidez de las hojas indicada por el módulo de elasticidad.

La correlación entre la deformación y el módulo de elasticidad se observa que es inversa ya que si la deformación de las hojas aumenta, la rigidez de estas disminuye, pero la correlación entre la deformación y la energía de compresión es directa esto se puede entender que para que el material se deforme más, se necesita mayor cantidad de energía para lograrlo.

Finalmente, la relación entre el módulo de elasticidad y la energía de compresión es inversa, a medida que el material es más rígido, se necesita menor cantidad de energía para llevarlo al punto de ruptura en los ensayos a compresión.

Tabla 17. Correlaciones de la variables respuesta

	<b>Esfuerzo de compresión</b>	<b>Deformación unitaria</b>	<b>Módulo de elasticidad</b>	<b>Energía de compresión</b>
<b>Esfuerzo de compresión</b>	1	0.84283*	-0.50112*	0.85750*
<b>Deformación unitaria</b>		1	-0.73915*	0.93709*
<b>Módulo de elasticidad</b>			1	-0.67768*
<b>Energía de compresión</b>				1

\*=Significativo al 0.05 de probabilidad

### 3.5. Sumario

En este último capítulo se expusieron los resultados conseguidos de las actividades programadas en la metodología y efectuadas según el procedimiento experimental propuesto para llevar a cabo los ensayos a compresión, a partir de estos se generaron las discusiones de los resultados y las conclusiones finales, los cuales se presentan en las siguientes secciones.

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La Tabla 18 muestra el resumen del análisis de varianza ANOVA a un nivel de significancia del 5% ( $P < .05$ ). En primer lugar se observa que el factor Región (R) tiene un efecto significativo sobre el esfuerzo, la deformación unitaria y el módulo de elasticidad, no así sobre la energía de compresión. En seguida se observa que el factor posición (P) es estadísticamente determinante sobre todas las variables estudiadas (esfuerzo máximo, deformación, módulo de elasticidad y energía de compresión), posteriormente se observa que el factor velocidad (V) provoca un efecto significativo sobre la deformación unitaria, el módulo de elasticidad y la energía de compresión, no así sobre el esfuerzo máximo. Finalmente la interacción entre la Región, Posición y Velocidad (RPV) provoca un efecto significativo sobre el esfuerzo máximo y el módulo de elasticidad.

Tabla 18. Resumen del análisis de varianza ANOVA.

Fuente de variación	Grados de libertad	Esfuerzo máximo	Deformación unitaria	Módulo de elasticidad	Energía de compresión
		Pr>F	Pr>F	Pr>F	Pr>F
<b>Región(R)</b>	2	<.0001	0.004	<.0001	0.2559
<b>Posición(P)</b>	1	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
<b>Velocidad(V)</b>	2	0.053	0.049	<.0001	0.0002
<b>RP</b>	2	0.0001	<.0001	<.0001	<.0001
<b>RV</b>	4	0.047	0.004	<.0001	0.4832
<b>PV</b>	2	0.001	0.193	<.0001	0.7488
<b>RPV</b>	4	0.006	0.223	<.0001	0.4514
<b>Error</b>	162	-----	-----	-----	-----
<b>Total</b>	179	-----	-----	-----	-----

El contenido de humedad en las hojas de las tres regiones es diferente. De acuerdo a los resultados obtenidos, las hojas de la región1 (R1) tienen menor humedad que las hojas cosechadas en la región 2 (R2) y la región 3 (R3), esta podría ser una razón por la cual la resistencia a la compresión de las hojas de la región 1 (R1) resultó mayor que las hojas provenientes de la región 2 (R2) y de la región 3 (R3). Diferentes investigaciones han demostrado que el contenido de humedad influye sobre las propiedades mecánicas a compresión de otros materiales agrícolas, como lo han reportado Mammam (2005), Baümler (2006) y Esref (2007). Esta situación es importante, debido a que dependiendo de la cantidad de humedad presente en el material la resistencia a la compresión variara, en forma general,

a mayor contenido de humedad la resistencia a la compresión disminuye y en forma viceversa Alchakra (1996).

En la Figura 58 se observa el diagrama esfuerzo-deformación del comportamiento de las hojas ensayadas en sentido paralelo y perpendicular a la fibra, en ella se observa que en sentido perpendicular a las fibras (P2) las hojas son más resistentes, lo cual difiere con la yuca, ya que el tubérculo es más resistente en sentido paralelo (Ciro, 2007). Así mismo, en dicha posición sufren mayor deformación y necesitan mayor cantidad de energía para llegar al punto de ruptura, esto se debe al hecho que si el esfuerzo y la deformación a la cual se logra la falla son más altos en dirección perpendicular, el área bajo la curva al punto de falla es mayor y ocasiona que se necesite incremente la energía como se muestra en la Figura 58 y la Tabla 19. Sin embargo, en sentido paralelo a las fibras (P1) las hojas son más rígidas lo cual concuerda con diferentes investigaciones de diferentes materiales fibrosos, como las realizadas en la yuca (Ciro, 2007), en pencas de agave sometidas a cocción (García, 2004) y en pencas de agave verde (Pozos, 2001).

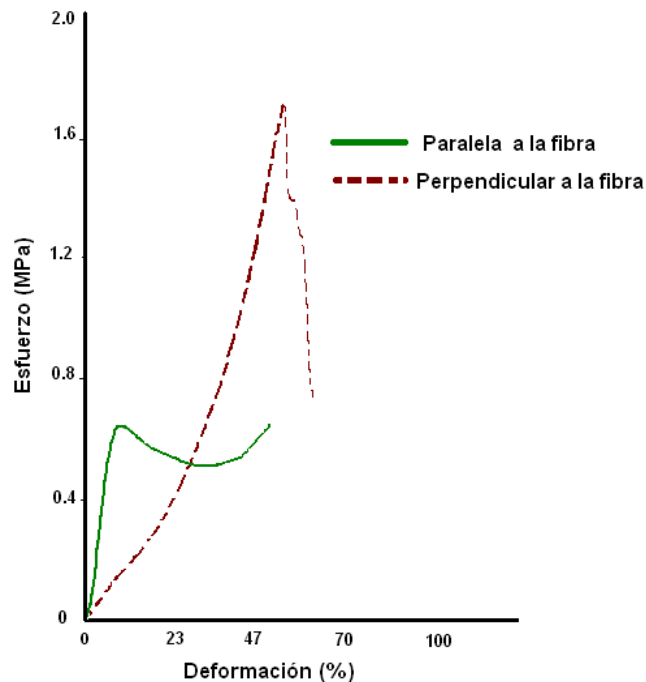


Figura 58. Diagrama esfuerzo-deformación.

Por otro lado, se comprobó que la velocidad de ensayo influye sobre la resistencia a la compresión, la deformación unitaria, el módulo de elasticidad y la energía de compresión de las hojas, ya que en términos generales cuando se aumenta la velocidad de ensayo la resistencia a la compresión aumenta, lo cual concuerda con (Kistrup et al., 2000, y Nuñez, et al., 2001). Mencionan que la magnitud del esfuerzo desarrollado no es solo función de la deformación, sino también de la velocidad impuesta y en forma general a mayor velocidad de

deformación, la resistencia aumentará. En el caso del módulo de elasticidad se evidencia que la velocidad de deformación también influye significativamente. A mayor velocidad de deformación, el comportamiento de las hojas tiende a ser más rígidas. Finalmente, los valores alcanzados de la energía de compresión crecen en forma significativa cuando se aumenta la velocidad de deformación. Con la velocidad mayor ensayada, las hojas necesitan mayor cantidad de energía para llevarlas al punto de ruptura. Así mismo, manifiestan un comportamiento elástico no lineal, no existe una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, sin embargo, al aumentar la velocidad de ensayo, las hojas se comportan de forma más elástica ocasionando un aumento en la resistencia a la compresión y la energía de compresión, pero cuando la velocidad de ensayo se disminuye, se comporta como un líquido viscoso lo que ocasiona una disminución en los valores del módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión, por lo que las hojas tienen un comportamiento viscoelástico.

En base a los resultados mostrados, las hojas del *Agave angustifolia* Haw se pueden considerar como materiales anisotrópicos, es decir, el esfuerzo máximo, la deformación unitaria, el módulo de elasticidad y la energía de compresión dependen de la región de donde provienen las hojas, la dirección sobre la cual se impone la carga, y finalmente de la velocidad de ensayo como se muestra en la Tabla 19. Sin embargo por la anisotropía del material, los valores obtenidos en este trabajo pueden diferir si se consideraran otros factores como: diferentes edades del agave, con una geometría cilíndrica, así como distintas relaciones entre el área de la sección transversal y longitud de la probeta.

Tabla 19. Comportamiento de las propiedades mecánicas a compresión de las hoja

Nº	Tratamiento	Esfuerzo, $\sigma$ (MPa)	Deformación, $\epsilon$ (%)	Módulo de elasticidad, $E$ (MPa)	Energía de compresión, $T_c$ (J)
		Media	Media	Media	Media
1	R1P1V1	0.91 de <sup>y</sup>	13.49 f <sup>y</sup>	12.74 b <sup>y</sup>	0.39 g <sup>y</sup>
2	R2P1V1	0.86 de	23.75 ef	8.48 cde	0.94 efg
3	R1P2V1	2.08 ab	59.38 ab	4.15 f	2.61 ab
4	R2P2V1	2.13 ab	52.26 ab	8.38 cde	2.17 bcd
5	R1P1V2	0.93 de	16.41 f	12.15 bc	0.50 g
6	R2P1V2	1.00 de	38.10 cd	6.70 def	1.60 cde
7	R1P2V2	2.21 ab	60.95 ab	5.93 def	3.04 ab
8	R2P2V2	1.89 bc	56.56 ab	5.17 def	2.81 ab
9	R1P1V3	1.12 d	12.91 f	19.80 a	0.53 fg
10	R2P1V3	1.16 d	30.62 ed	8.31 cde	1.52 def
11	R1P2V3	<b>2.43 a</b>	<b>63.96 a</b>	5.15 def	<b>3.53 a</b>
12	R2P2V3	1.83 bc	48.69 bc	5.75 def	2.53 abc
13	R3P1V1	0.68 e	17.13 ef	8.94 bcd	0.37 g
14	R3P1V2	0.93 de	14.99 f	16.64 a	0.72 efg
15	R3P1V3	1.04 de	9.22 f	<b>19.64 a</b>	0.71 efg
16	R3P2V1	1.85 bc	61.39 ab	4.95 ef	3.09 ab
17	R3P2V2	1.85 bc	55.22 ab	3.91 f	3.32 a
18	R3P2V3	1.60 c	48.93 bc	3.54 f	3.39 a
<b>Media</b>		1.47	38	8.91	1.88

<sup>y</sup>: Medias de la misma columna y con la misma letra indican similitud estadística

## CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, en este estudio, se muestran las características físicas, el contenido de humedad, así como las propiedades mecánicas de las hojas de *Agave angustifolia* Haw sometidas a ensayos de compresión.

La diferencia de humedades entre las hojas, provenientes de las distintas regiones afectan significativamente la resistencia a la compresión, la deformación y el módulo de elasticidad, pero no así la energía de compresión para llevar al material punto de falla.

El factor posición, es el factor más determinante estadísticamente, esto se debe a que afecta de forma significativa todas las variables que se evaluaron.

El último factor analizado fue la velocidad de deformación, con el análisis realizado se demuestra que la velocidad de deformación influye significativamente en las propiedades mecánicas a compresión. A mayor velocidad de deformación, se alcanzan los valores más altos de resistencia, módulo de elasticidad y energía de compresión. Así mismo, las hojas tienen un comportamiento viscoelástico evidenciado por la velocidad de aplicación de carga en el ensayo.

Finalmente se puede asumir que las hojas son un material anisotrópico, es decir que las propiedades evaluadas se ven afectadas por la humedad de las hojas propias de la región de donde provienen, por la dirección de carga, así como de la velocidad de deformación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbot, J., A. y Lu, R., (1996). Anisotropic mechanical properties of apples. Transactions of the ASAE 39(4): 1451-1459.
- Al Chakra, W., Allaf, K. Y Jemai, A. B. (1996). Characterization of brittle food products: application of the acoustical emission method. Journal Of Texture Studies. 27,327-348.
- ASTM International, (2008). Standard test method for compressive properties of rigid plastics. ASTM D695.
- Beltrán F. J. A., Hernández G. L. H., Urriolagoitia C. G., Villa G., Rodríguez R. G. y Mendoza N. M. A. (2004) "Análisis numérico-experimental de la mecánica de la fractura en materiales polímeros" Científica, Vol. 8, Núm. 4, 185-192.
- Buitrago, V.G., López P. A., Coronado, A. y Osorno, F. (2004). Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de papa cultivada en Colombia. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 8 (1), p.102-110.
- Caballero, C. M., Silva, S. L., López, H., I., José, J., A., Cortés M., C., Montes B., J. y García, M., R., (2008a). Diseño y construcción de una máquina seccionadora de agave verde. Memorias de 14 congreso internacional anual de la SOMIM. 30.
- Caballero, C. M., Silva, S. L., López, H., I., José, J., A., Cortés M., C., Montes B., J. y García, M., R., (2008b). Diseño y construcción de una máquina para moler agave cocido. Memorias de 14 congreso internacional anual de la SOMIM. 29
- Ciro, H., J., Vahos, D., L. y Márquez, C., J., (2005). Estudio experimental de la fuerza de fractura en frutas tropicales: El tomate de árbol (*Cyphomandra Betacea Sendt*). Redalyc. 72(146), 55-64.
- Ciro, V.H.J., Largos, A.S. Y Casafús, P.H.S. (2007). Caracterización reológica de la yuca (*Manihot Esculenta Crantz*) Parte I: respuesta a la compresión unidireccional. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Red De Revistas Científicas De América Latina Y El Caribe, España Y Portugal. Redalyc. 25-36.
- Cortés, M. C. (2009). Propiedades mecánicas a tensión de las fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw, residuo proveniente de la producción artesanal del mezcal. Tesis de maestría. CIIDIR-IPN
- Chen, P., Ruiz-Altisent, M., Lu, F. Y Kader, A. A. (1987). Study of impact and compression damage on Asian pear. Asae 30.4, 1193-1197.
- Duran, H. y Pulido J. (2007). Análisis de la Molienda en el Proceso de Elaboración de Mezcal. Información Tecnológica. 18(1), 47-52.
- Espinosa, H., (2002). La materia prima para producir el mezcal oaxaqueño, catalogo de la diversidad de agaves. Oaxaca, Mex. SAGGARPA, INIFAP.
- Eşref, I., Halil, Ü., (2007). Moisture-dependent physical properties of white speckled red kidney bean grains. Journal of food engineering. Department Of Agricultural Machinery, Faculty Of Agriculture, Uludag University, Bursa 16059, Turkey 82 (2), Pp 209-216.
- FAO. (2004). Los efectos ambientales de las fibras duras y el yute en aplicaciones industriales no textiles. Consulta sobre fibras naturales. [http://www.fao.org/es/esc/common/ecg/343/es/esc\\_4\\_sp.pdf](http://www.fao.org/es/esc/common/ecg/343/es/esc_4_sp.pdf)
- Fitzgerald, R., W., (1990). Mecánica de materiales. Alfaomega
- García, R., R., L., (2004). Investigación de las cualidades mecánicas de la agavácea *angustifolia* Haw sometida a cocción. Tesis de maestría. IPN

- Groover, M. P. (1997). Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, Procesos Y Sistemas. México: Prentice Hall.
- Hernández G. L. H. y Ruiz C. (1993). Assessment of data for dynamic crack initiation under shock pressure loading: Part I – Experiment. Theoretical and Applied Fracture Mechanics Vol 19, 75-83.
- Hernández G. L. H., Urriolagoitia C. G., Urriolagoitia S. G., Sandoval P. J. M., Merchán C. E. A. y Guardado G. J. F. (2009) “Assessment of the structural integrity of cracked cylindrical geometries applying the EVTUBAG program” Revista Técnica de Ingeniería de la Universidad de Zulia. Vol. 32, Núm 3, 190-199,
- Hidalgo, R., M., (2001). Diseño de una máquina partidora de piñas de agave (*A. Angustifolia* Haw) para la producción de mezcal en el Estado de Oaxaca. Tesis de Maestría. ESIME-IPN.
- Jekendra, Y. (1999). Physical and rheological properties of forage crops with reference to cutting. College Of Agriculture. Central Agricultural University. Iroisemba. Imphal, 795001. India. Vol. 48, Núm. 181, Pp 76-78.
- José, J., A., (2008). Determinación de la energía de corte de impacto sobre el *Agave angustifolia* Haw. Tesis de Maestría. CIIDIR-IPN.
- Kashaninejad ,M. A., Mortazavi,M. A., Safekordi, A.Y Tabil L.G. (2006). Some physical properties of pistachio (*Pistacia Vera* L.) nut And Its kernel. Journal Of Food Engineering.Elsevier. 72, Pp.30–38
- Kistrup, T, A., y Nielsen, M., (2000). Influence of uniaxial compression rate on rheological parameters and sensory texture prediction of cooked potatoes. Journal of Texture Studies. 31 pp. 25-39
- López, H., I. (2008). Pruebas de resistencia a la tensión en fibras de las hojas del *Agave angustifolia* Haw para determinar su comportamiento mecánico. Tesis de Maestría. CIIDIR-IPN
- Mamman, E., Umar, B. y Aviara, (2005). Effect of moisture content and loading orientation on the mechanical properties of Balanites Aegyptiaca Nuts. Agricultural Engineering International.The CIGR Ejournal. (2) 2-16.
- Masouidi, H., Tabatabaeefar, A., Y Mohammad, B., A., (2007). Deterimination of storage effect on mechanical propierties of apples using the uniaxial compression Test. Canada Biosistems Engineering. 49, 329-333.
- Maya, J J y Sabu, T (2007). Biofibras and Biocomposites, Journal of Carbohydrate Polymers, en prensa.
- Mayorga, H. E., Rôssel, K. D., Ortiz, L. H., Quero, C. A., Y Amante, O. A. (2004). Análisis comparativo en la calidad de fibra de *Agave lechuguilla* Torr., procesada manual y mecánicamente. *Agrociencia Colegio de Postgraduados*, 38(2), 219-225
- Mohsenin, N. N. (1986). Physical Properties Of Plant And Animal Materials. Vol. 1. Structure, Physical Characteristics And Mechanical Properties. New York: Gordon And Breach Science Publishers.
- Montes, B, J, (2009). Estudio del efecto de la fibra de bagazo de *Agave angustifolia* Haw en la resistencia a la felxión y compresión del adobe compactado. Tesis de maestría. CIIDIR-IPN
- Montgomery, D. C., (2006). Diseño y análisis de experimentos. México: Iberoamérica.
- Norma oficial mexicana NOM-116-SSA1-1994, bienes y servicios. Determinación de humedad en alimentos por tratamiento térmico. Método por arena o gasa.
- Núñez, S. M. C., Méndez, M. M. G., Y Solorza, F. J. (2001). *Introducción a la reología*. México: Instituto Politécnico Nacional



- Nzuko, A., U., G., 1980. Mechanical properties of corn cobs. Thesis Doctor. Department of Agricultural Engineering. McGill University.
- Palma, F., (1991). El género *Agave* L. y su distribución en el estado de Oaxaca. Tesis de Licenciatura UNAM, Escuela Nacional de estudios profesionales iztacala.
- Popov, E., P. Y Balan, T. A.(2000). Mecánica de sólidos. Pearson Educación, México
- Pozos, O., J., (2001). Determinación de las propiedades físico-mecánicas del *Agave angustifolia* Haw(espadañ azul), utilizado en la fabricación de mezcal. Tesis de Maestría. ESIME-IPN.
- Ravi, R., Roopa, B. S. y Bhattacharya, S., (2007). Texture evaluation by uniaxial compression of some snack foods. *Journal of texture studies*. 38, 135-152.
- Reddy, N., Y Yang, Y. (2007). Characterizing natural cellulose fibers from velvet leaf (*Abutilon Theophrasti*) Stems. *Journal Bioresource Technology*, Article In Press, 1-6.
- Robles, M., (2006). Análisis prospectivo del potencial micorrizico y la respuesta a la inoculación con hongos de micorriza arbuscular del maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw). Tesis de Maestría. CIIDIR-IPN-Oaxaca.
- SAGARPA, SEDAF, y COMMAC. (2006). *Plan rector del sistema producto maguey-mezcal*. Oaxaca: COMMAC.
- Seyed M.A. R., B., Emadzadeh, A. R., A. y . Mohammad A., (2007). The physical properties of pistachio nut and its kernel as a function of moisture content and variety: Part I. Geometrical properties. *Journal of Food Engineering Department of Food Science and Technology, University Of Ferdowsi, Mashad, Iran* 81 (1), Pp. 218-225.
- Silva S. L., Hernandez, G., L., H., Caballero, C. M., y López, H., I., (2009). Tensile strength fibers extracted from the leaves of the *angustifolia* Haw *Agave* in function of their length. *Applied mechanics and materials*. Trans tech publications. Switzerland. 15, 103-108.
- Sirisomboon, P., Kitchaiya, P., Pholpho T.y Mahuttanyavanitch, W., (2007). Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels. *Journal Biosystem Engineering*. Elsevier. 97, 201-207
- Sitkei, György,(1986.). *Mechanics of agricultural Materials*. Elsevier. Press,Hungria.
- Tabatabaeefar, A. Y Rajabipour, A. (2005). Modeling the mass of Apples By Geometrical Attributes. *Scientia Horticulturae*.Elsevier. 105 ,Pp 373–382.
- Tabilo, M. G. Y Barbosa, C. G. (2005). Reology for the food industry. *Journal Of Food Engineering*, 67, 147-156.
- Villa G. y Rabasa, J. M. Sandoval Pineda, A. Campos Vázquez, A. Escamilla Navarro, A. Luna Avilés y J. C. de J. Balanzá Chavarria. Reseña de los proyectos de investigación realizados en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la SEP-ESIME (2007) Científica Vol. 11, núm. 2, 73-82.
- Villaseñor, C., A., Chavez, S., H., Saucedo, C., Salazar, A., Landois, L., L. y Hernández, L, H.,(2006). Comportamiento mecánico y fisiológico de fruto de melón ( *Cucumis melo* L.) bajo compresión axial.. *Fitotecnia*. México. 29(2), 157-162.

# ANEXOS

### Anexo 1. Ecuaciones empleadas para el análisis estadístico

Media aritmética.-La media aritmética que suele llamarse simplemente la “media”, es el promedio más utilizado. Es la suma de los valores observados dividida por el número total de observaciones. La media aritmética de una muestra se designa usualmente por el símbolo  $\bar{x}$ . Para obtener esta medida, hay que introducir dos símbolos más, la notación de sumatoria  $\sum$  y el subíndice  $i$ . La media aritmética viene dada por

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{x_1 + x_1 + \dots + x_n}{n} \quad \text{Ecuación 7}$$

Mediana.-La mediana es el valor que divide un conjunto de observaciones, ordenadas con respecto a la magnitud de los valores, de tal manera que el número de partidas por encima de la mediana sea igual al número de partidas por debajo de la misma. En general, si  $X_1, X_2, \dots, X_n$  son unos números ordenados por magnitud creciente (o decreciente), y si  $n$  es impar, la mediana es el número situado en el centro del conjunto de números:

$$Med = \frac{x_{n+1}}{2} \quad \text{Ecuación 8}$$

Si  $n$  es par, la mediana viene dada por

$$Med = \frac{x_{\frac{n}{2}} + x_{(\frac{n}{2})+1}}{2} \quad \text{Ecuación 9}$$

Medidas de dispersión.-Las medidas de dispersión nos dicen como se reparten o dispersan los datos a uno y otro lado del centro.

Varianza.-La formula de la varianza de una muestra de  $n$  observaciones, llamado  $s^2$  dicha varianza, es

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}{n}$$

Ecuación 10

La varianza se expresa en unidades cuadradas y no en la unidad original debido a la operación de elevar al cuadrado que se ha efectuado. Por consiguiente es preciso extraer la raíz cuadrada para volver a la unidad original.

Desviación estándar.- O desviación típica es la raíz cuadrada positiva de la media de los cuadrados de las desviaciones de las partículas respecto a la media aritmética, es una variación promedio por observación. Siendo S la desviación estándar de la muestra, se tiene pues:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

Ecuación 11

Coeficiente de variación.- Es útil para comparar dispersiones a escalas distintas pues es una medida invariante ante cambios de escala. Por otro lado presenta problemas ya que a diferencia de la desviación estándar este coeficiente es variable ante cambios de origen. Por ello es importante que todos los valores sean positivos y su media de por tanto un valor positivo; que:  $\bar{x} > 0$ . Se calcula por:

$$CV = \frac{S}{\bar{x}}$$

Ecuación 12

Donde S es la desviación estándar. Se puede dar en tanto por ciento:

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} * 100$$

Ecuación 13

Las ecuaciones que se emplearon para el análisis de varianza ANOVA son descritas a continuación:

En el caso de la suma total de cuadrados corregida se determinará usando la ecuación 7.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y^2}{abcn} = \text{Ecuación 14}$$

En la suma de cuadrados de los efectos principales (Región, Posición y Velocidad) se calculará con las ecuaciones 8, 9 y 10 respectivamente.

$$SS_{\text{Región}} = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i...}^2}{bcn} - \frac{y^2}{abcn} = \frac{(G_1)^2 + (H_1)^2 + (I_1)^2}{60} - \frac{y}{120} \text{ Ecuación 15}$$

$$SS_{\text{Posición}} = \sum_{j=1}^b \frac{y_{j...}^2}{acn} - \frac{y^2}{abcn} = \frac{(A_2)^2 + (B_2)^2}{30} - \frac{y}{120} \text{ Ecuación 16}$$

$$SS_{\text{Velocidad}} = \sum_{k=1}^c \frac{y_{k...}^2}{abn} - \frac{y^2}{abcn} = \frac{(A_1 + D_1)^2 + (B_1 + E_1)^2 + (C_1 + F_1)^2}{40} - \frac{y}{120} \text{ Ecuación 17}$$

Para calcular la suma de cuadrados de las interacciones de dos factores, se utilizarán las siguientes ecuaciones: En el caso de la interacción entre el Nivel-Posición o interacción NP, se requiere usar las celdas N x P {Y<sub>ij</sub>}, y se utiliza la ecuación 11.

$$\begin{aligned} SS_{RP} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij..}^2}{cn} - \frac{y^2}{abcn} - SS_R - SS_P = SS_{\text{subtotales}(RP)} - SS_R - SS_P \\ &= \frac{(P1R1)^2 + (P2R1)^2 + (P1R2)^2 + (P2N2)^2}{30} - \frac{y}{120} - SS_R - SS_P \end{aligned} \text{ Ecuación 18}$$

La interacción del Región-Velocidad, o interacción RV, se calcula usando los totales de las celdas R x V {Y<sub>ik</sub>}, y se aplica la ecuación 12.

$$\begin{aligned} SS_{RV} &= \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{y_{ik..}^2}{bn} - \frac{y^2}{abcn} - SS_N - SS_V = SS_{\text{subtotales}(RV)} - SS_N - SS_V \\ &= \\ &= \frac{(V1N1)^2 + (V2N1)^2 + (V3N1)^2 + (V1N2)^2 + (V2N2)^2 + (V3N2)^2}{20} + \frac{y}{120} - SS_N - SS_V \end{aligned} \text{ Ecuación 19}$$

La interacción de la Posición-Velocidad, o interacción PV, se calcula usando los totales de las celdas P x V {Y<sub>jk</sub>}, y se emplea la ecuación 13.

$$\begin{aligned}
 SS_{PV} &= \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{jk..}^2}{an} - \frac{y^2}{abcn} - SS_P - SS_V = SS_{\text{subtotales}(PV)} - SS_P - SS_V \\
 &= \frac{(A_1)^2 + (B_1)^2 + (C_1)^2 + (D_1)^2 + (E_1)^2 + (F_1)^2}{20} - \frac{y}{120} - SS_P - SS_V
 \end{aligned}$$

Ecuación 20

Para el cálculo de la suma de cuadrados de la interacción de los tres factores se calculará usando el total de las celdas R x P x V,  $\{Y_{ijk}\}$  que están encerrados en círculos de la tabla 1 y aplicando la ecuación 14:

$$\begin{aligned}
 SS_{RPV} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{ijk}^2}{n} - \frac{y^2}{abcn} - SS_R - SS_P - SS_V - SS_{RP} - SS_{RV} - SS_{PV} \\
 &= SS_{\text{subtotales}(RPV)} - SS_R - SS_P - SS_V - SS_{NP} - SS_{NV} - SS_{PV} \\
 &= \frac{A^2 + B^2 + C^2 + \dots + Q^2}{10} - \frac{y}{120} - SS_{\text{Región}} - SS_{\text{Posición}} \\
 &\quad - SS_{\text{Velocidad}} - SS_{RP} - SS_{RV} - SS_{PV}
 \end{aligned}$$

Ecuación 21

Finalmente para la suma de cuadrados del error, se calcula restando la suma de cuadrados de cada efecto principal e interacción a la suma total de cuadrados como se muestra en la ecuación 15.

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{Subtotales}(RPV)} = SS_T - \frac{A^2 + B^2 + C^2 + \dots + Q^2}{10} - \frac{y}{120}$$

Ecuación 22

**Anexo 2. Tablas de los datos codificados de los ensayos a compresión.**

Tabla 20. Datos codificados del Esfuerzo máximo de compresión ( $\sigma$ ).

Dirección de las fibras (P)												Yi	
Paralelo a las fibras (P1)						Perpendicular a las fibras(P2)							
Región (R)	velocidad de deformación (V)			velocidad de deformación (V)			velocidad de deformación (V)			Yi			
	2.54mm/min(V1)	14mm/min(V2)	25.4mm/min(v3)	2.54mm/min(V1)	14mm/minV2)	25.4mm/min(v3)	2.54mm/min(V1)	14mm/minV2)	25.4mm/min(v3)				
R1	0.92	1.00	1.10				1.71	2.10	2.21				
	0.85	0.92	1.15				2.24	2.27	2.82				
	1.01	0.88	1.10				1.52	2.42	2.69				
	0.89	1.11	1.16				2.50	2.24	1.80				
	1.03	0.82	1.17				2.08	2.03	2.79				
	0.90	9.11	0.98	9.30	1.16	11.16	2.59	20.81	2.11	22.12	3.06	24.30	96.78
	1.03		0.93		0.99		1.80		2.24		2.18		
	0.78		0.90		1.09		2.26		1.93		2.96		
	0.82		1.09		1.04		1.84		2.13		1.90		
	0.89		0.67		1.19		2.27		2.64		1.89		
R2	0.80	1.30	1.34				2.46	1.90	2.04				
	0.93	0.91	0.96				2.71	1.84	1.44				
	0.86	0.82	0.95				2.19	1.88	1.72				
	0.84	0.65	1.16				1.75	1.69	1.86				
	0.88	8.59	0.78	9.98	1.01	11.61	1.88	21.28	1.55	18.87	2.06	18.35	88.68
	0.69		0.82		1.20		1.70		1.58		1.64		
	0.65		1.24		1.10		2.19		2.01		1.91		
	1.33		1.02		1.46		2.08		1.66		1.76		
	0.79		1.00		1.55		2.26		2.14		2.28		
	0.82		1.43		0.89		2.07		2.63		1.64		
R3	0.63	0.79	0.71				2.09	1.82	2.08				
	0.87	0.94	0.99				2.14	1.77	1.55				
	0.70	0.91	0.97				1.72	1.45	1.31				
	0.85	0.82	1.07				2.00	2.15	1.52				
	0.77	6.89	0.94	9.31	0.89	10.47	1.86	18.50	1.66	18.54	1.82	16.04	79.76
	0.47		0.98		1.35		2.24		1.69		1.66		
	0.61		0.91		0.98		1.35		2.16		1.34		
	0.82		1.13		0.95		1.50		2.29		1.53		
	0.74		0.83		1.45		2.14		1.75		1.74		
	0.42		1.06		1.09		1.47		1.81		1.48		
Totales B x C		24.59	28.58	33.24			60.59	59.53	58.68			265.23	
Y.jk.		86.42						178.81					
Totales N x P						Totales N x V							
Yij..						Yi.k.							
P						V							
R	Paralelo (P1)		Perpendicular(P2)		R	2.54mm/min(V1)	14mm/minV2)	25.4mm/min(v3)					
R1	29.56		67.22		R1	29.92	31.41	35.45					
R2	30.18		58.50		R2	29.87	28.85	29.96					
R3	26.67		53.09		R3	25.40	27.86	26.51					

Tabla 21. Datos codificados para la deformación ( $\epsilon$ )

		Dirección de las fibras (P)											
		Paralelo a las fibras (P1)					Perpendicular a las fibras(P2)						
Región (R)		velocidad de deformación (V)					velocidad de deformación (V)						
		2.54mm/min(V1)	14mm/min(V2)	25.4mm/min(V3)	2.54mm/min(V1)	14mm/min(V2)	25.4mm/min(V3)	2.54mm/min(V1)	14mm/min(V2)	25.4mm/min(V3)	2.54mm/min(V1)	14mm/min(V2)	25.4mm/min(V3)
		17.04	16.32	13.47	59.27	57.04	67.92						
		14.14	17.28	14.96	59.79	56.52	70.09						
		15.39	16.52	11.31	60.80	62.11	62.57						
		10.86	17.56	16.70	58.96	60.91	61.38						
R1		14.84	134.94	15.86	164.15	11.32	129.11	59.40	593.79	62.88	609.50	58.65	639.68
		11.21	17.38	12.58	61.86	58.27	72.15						
		12.29	18.83	12.45	58.20	64.51	71.63						
		15.24	16.02	12.55	59.33	60.17	64.38						
		12.96	14.90	12.29	62.28	59.78	59.44						
		10.96	13.46	11.48	53.91	67.31	51.47						
		30.31	64.17	23.79	46.43	63.02	56.28						
		17.27	24.10	17.77	46.70	53.23	45.17						
		16.87	17.53	27.07	49.81	52.97	52.39						
		18.37	19.98	32.97	50.99	53.11	48.04						
R2		14.51	237.46	21.56	381.04	21.02	306.18	50.87	522.62	51.08	565.60	56.22	486.91
		18.51	25.66	15.68	52.89	57.08	48.68						
		26.20	57.55	14.65	57.58	51.03	55.59						
		55.80	21.46	65.86	56.08	52.71	50.25						
		22.91	65.08	68.83	58.43	60.60	49.74						
		16.70	63.95	18.54	52.85	70.77	24.55						
		13.92	15.79	9.23	63.82	49.08	50.77						
		13.41	14.47	18.73	71.07	56.01	50.90						
		11.97	16.67	16.49	57.91	48.66	45.62						
		16.31	16.56	15.64	67.20	57.93	50.69						
R3		23.61	171.31	17.13	149.96	16.47	138.92	63.91	613.96	52.22	552.26	56.19	489.36
		14.29	15.53	13.47	64.08	54.93	49.87						
		13.34	9.92	11.36	49.26	56.80	41.59						
		18.01	13.92	11.48	59.41	58.42	56.88						
		28.55	15.00	16.17	62.30	61.25	44.82						
		17.89	14.97	9.89	55.01	56.96	42.02						
Totales B x C		543.71	695.15	574.21	1730.38	1727.36	1615.96						
Y.jk.													
Y.J..		1813.06					5073.70						
		Totales N x P					Totales N x V						
		Y.jj.					Yi.k.						
		P					V						
R		Paralelo (P1)		Perpendicular(P2)			R	2.54mm/min(V1)	14mm/min(V2)	25.4mm/min(v3)			
R1		428.20		1842.98			R1	728.73	773.65	768.79			
R2		924.67		1575.13			R2	760.08	946.64	793.09			
R3		460.19		1655.59			R3	785.27	702.22	628.29			



Tabla 22. Datos codificados por el módulo de elasticidad (E)

Dirección de las fibras (P)													
Región de la hoja (R)	Paralelo a las fibras (P1)						Perpendicular a las fibras(P2)						Yi
	velocidad de deformación (V)			velocidad de deformación (V)			velocidad de deformación (V)			velocidad de deformación (V)			
	2.54mm/min(V1)	14mm/min(V2)	25.4mm/min(v3)	2.54mm/min(V1)	14mm/min(V2)	25.4mm/min(v3)	2.54mm/min(V1)	14mm/min(V2)	25.4mm/min(v3)	2.54mm/min(V1)	14mm/min(V2)	25.4mm/min(v3)	
R1	8.86	15.22	22.05	4.80	6.13	4.86							
	7.77	12.62	18.92	3.76	5.78	5.74							
	11.35	7.86	20.78	3.92	6.48	4.87							
	20.44	13.28	18.12	3.54	5.71	4.57							
	11.99	127.37	14.52	121.46	20.53	197.97	4.26	41.53	5.31	59.33	4.58	51.47	599.14
	20.94		14.05		18.05		3.60		6.60		5.55		
	12.50		11.30		16.32		3.96		5.99		5.43		
	11.04		13.94		20.87		4.50		4.54		4.79		
	9.09		7.67		22.33		4.76		5.28		5.41		
	13.40		11.01		20.00		4.44		7.52		5.68		
R2	7.58	8.41	13.71	8.09	6.02	5.56							
	10.89	6.59	9.34	7.99	5.28	4.02							
	10.48	7.81	6.33	7.42	5.13	5.28							
	8.82	6.79	2.92	7.84	5.11	6.50							
	9.99	84.78	6.92	66.98	6.41	83.13	7.53	83.82	5.20	51.69	5.37	57.52	427.93
	8.35		7.27		11.69		8.85		4.26		5.07		
	5.92		5.15		10.28		8.57		5.08		4.69		
	4.66		8.16		6.65		9.42		5.07		5.49		
	7.61		5.01		4.88		8.07		5.33		6.72		
	10.48		4.89		10.92		10.05		5.20		8.82		
R3	14.21	12.78	16.05	4.61	4.14	3.78							
	17.09	16.40	15.69	3.83	3.47	3.38							
	7.28	16.75	17.77	5.52	4.52	3.18							
	6.15	12.37	20.75	5.53	4.79	3.25							
	6.29	89.49	20.13	166.50	16.48	196.47	4.94	49.56	3.72	39.12	3.13	35.41	576.54
	10.87		14.47		30.29		4.81		3.58		3.81		
	12.92		19.84		19.23		4.82		4.50		3.90		
	8.90		18.05		17.25		4.51		3.46		3.10		
	2.98		16.02		26.23		5.07		3.05		3.67		
	2.80		19.70		16.75		5.92		3.86		4.20		
Totales B x C	212.15	188.44	281.10	125.35	111.02	108.99						1027.06	
Y.jk.													
Y.J..		681.69			345.37								
	Totales N x P						Totales N x V						
	Yj..						Yi.k.						
	P						V						
R	Paralelo (P1)			Perpendicular(P2)			R	2.54mm/min(V1)	14mm/min(V2)	25.4mm/min(v3)			
R1	446.80182			152.33457			R1	168.90217	180.79433	249.43989			
R2	234.89297			193.03302			R2	168.59716	118.67209	140.65674			
R3	452.45			124.09			R2	139.05	205.62	231.88			

Tabla 23. Datos codificados para la energía de compresión (Tc).

Dirección de las fibras (P)													
Región de la hoja (R)	Paralelo a las fibras (P1)						Perpendicular a las fibras(P2)						Yi
	velocidad de deformación (V)						velocidad de deformación (V)						
	2.54mm/min(V1)	14mm/min(V2)	25.4mm/min(v3)		2.54mm/min(V1)	14mm/min(V2)	25.4mm/min(v3)						
	0.36	0.51	0.58		1.91	2.78	3.40						
	0.37	0.48	0.68		2.82	3.05	3.87						
	0.41	0.50	0.45		2.21	2.96	3.99						
	0.27	0.58	0.77		3.30	3.00	2.71						
R1	0.57	3.93	0.46	5.02	0.43	5.33	2.33	26.11	3.03	30.41	4.40	35.26	106.07
	0.33	0.52	0.52		3.46	2.62	4.43						
	0.46	0.58	0.42		2.12	2.93	3.35						
	0.40	0.51	0.49		2.65	3.49	4.43						
	0.36	0.55	0.45		2.73	3.16	2.53						
	0.39	0.33	0.55		2.58	3.40	2.16						
	1.19	3.62	1.27		2.47	2.64	3.21						
	0.83	0.83	0.66		2.84	2.63	2.08						
	0.65	0.44	1.01		2.36	2.64	2.46						
	0.69	0.38	1.50		2.09	2.37	2.17						
R2	0.64	9.41	0.54	15.95	0.86	15.18	2.01	21.73	2.28	28.09	3.29	25.34	115.71
	0.65	0.53	0.73		1.54	2.95	2.23						
	0.73	2.91	0.68		2.17	3.16	3.12						
	2.54	0.66	3.91		2.19	2.31	2.48						
	0.84	3.15	3.90		2.32	2.95	2.89						
	0.64	2.89	0.67		1.76	4.15	1.39						
	0.27	0.92	0.47		4.03	2.90	4.82						
	0.30	0.93	1.04		3.38	3.29	3.89						
	0.26	0.60	0.64		2.65	2.21	2.74						
	0.47	0.61	0.68		3.11	3.06	3.14						
R3	0.61	3.75	0.66	7.26	0.60	7.12	2.74	30.95	3.08	33.25	4.03	33.91	116.24
	0.20	0.71	0.89		3.83	3.56	3.10						
	0.22	0.68	0.65		2.29	3.27	2.50						
	0.43	0.68	0.47		2.81	4.72	3.75						
	0.73	0.73	1.03		3.72	3.85	3.55						
	0.24	0.73	0.64		2.38	3.30	2.39						
Totales B x C	17.09	28.24	27.64		78.80	91.74	94.51		338.02				
Y.jk.													
Y.J..		72.97				265.05							
	Totales N x P						Totales N x V						
	Yij..						Yi.k.						
	P						V						
R	Paralelo (P1)			Perpendicular(P2)			R	2.54mm/min(V1)	14mm/minV2)	25.4mm/min(v3)			
R1	14.29			91.79			R1	30.04	35.43	40.60			
R2	40.55			75.16			R2	31.14	44.04	40.53			
R2	18.13			98.10			R2	34.70	40.51	41.02			

Anexo 3 Diagramas esfuerzo-deformación de los ensayos a compresión

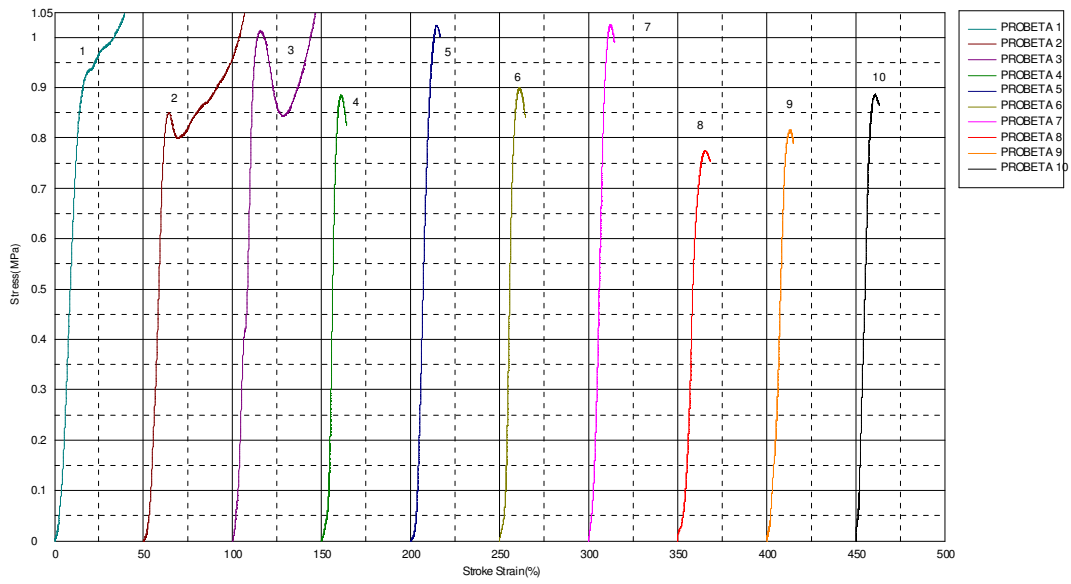


Figura 59. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R1P1V1

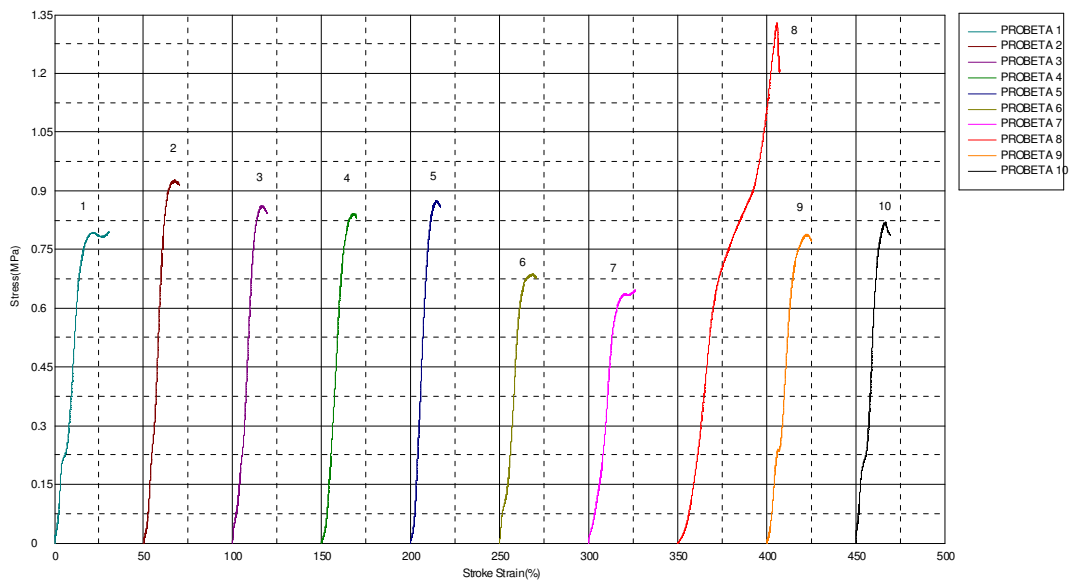


Figura 60. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R2P1V1

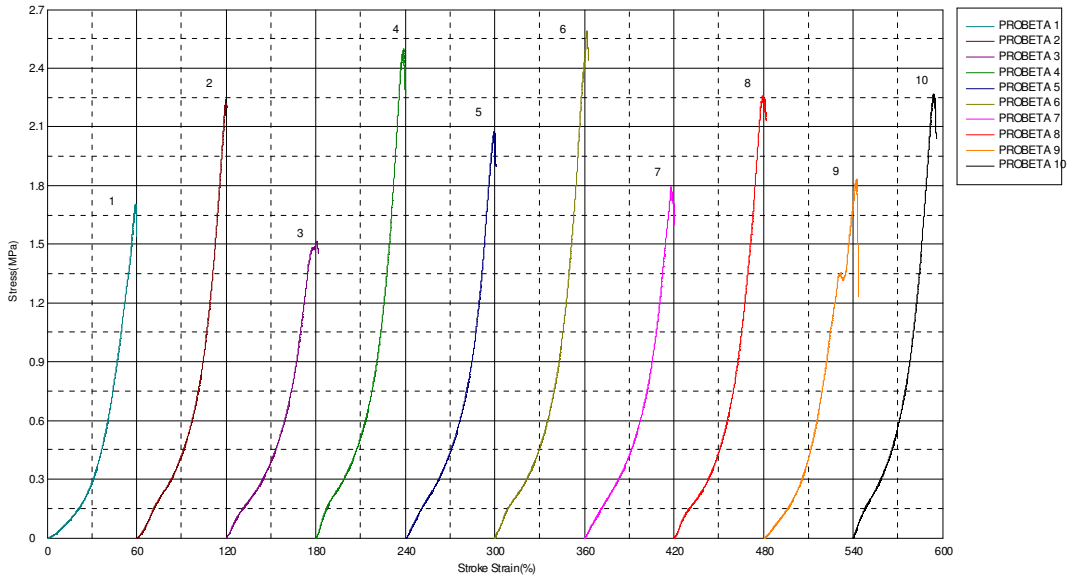


Figura 61. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R1P2V1

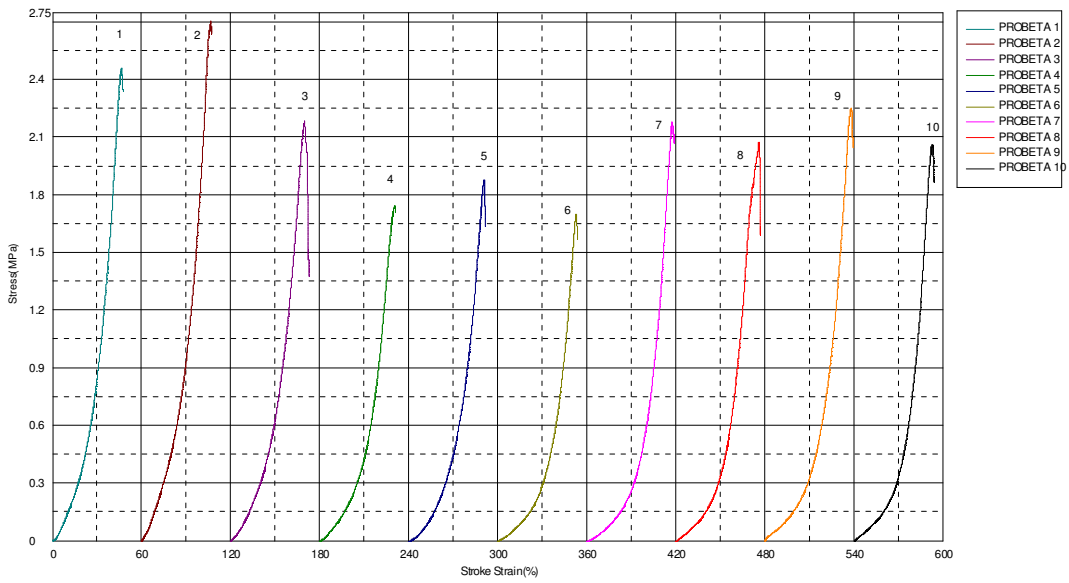


Figura 62. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R2P2V1

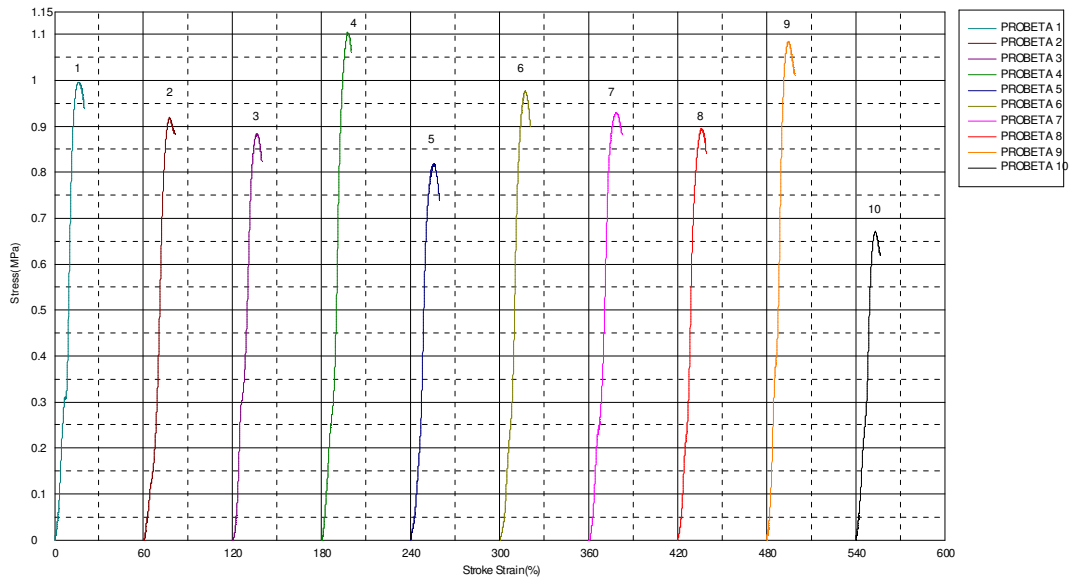


Figura 63. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R1P1V2

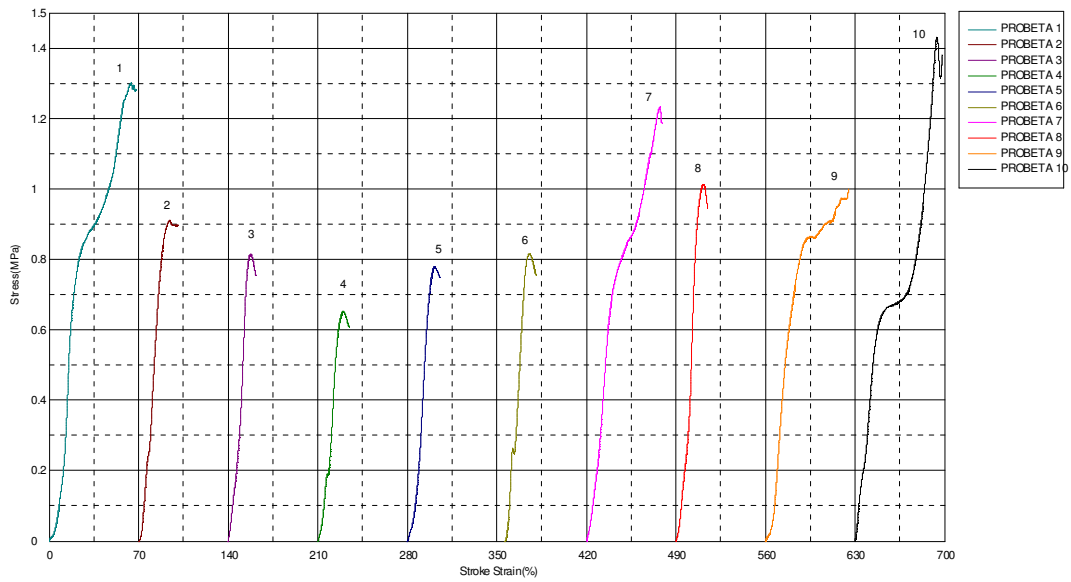


Figura 64. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R2P1V2

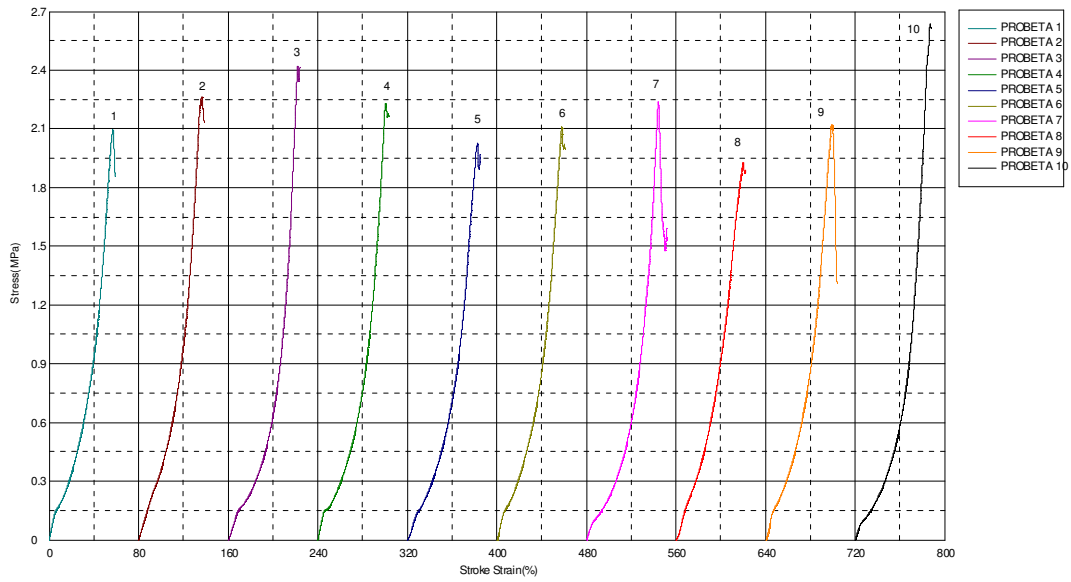


Figura 65. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R1P2V2

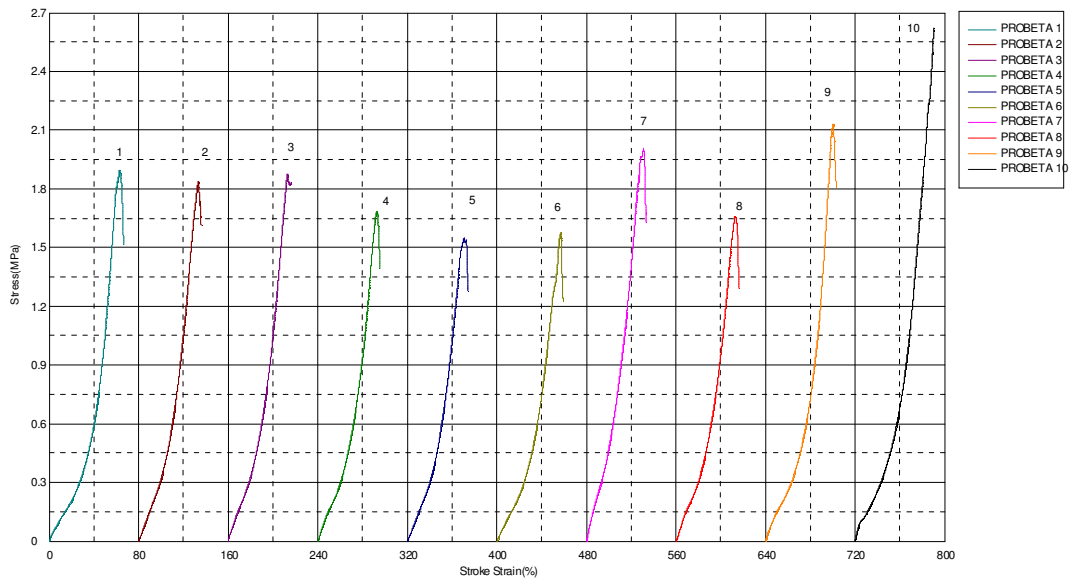


Figura 66. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R2P2V2

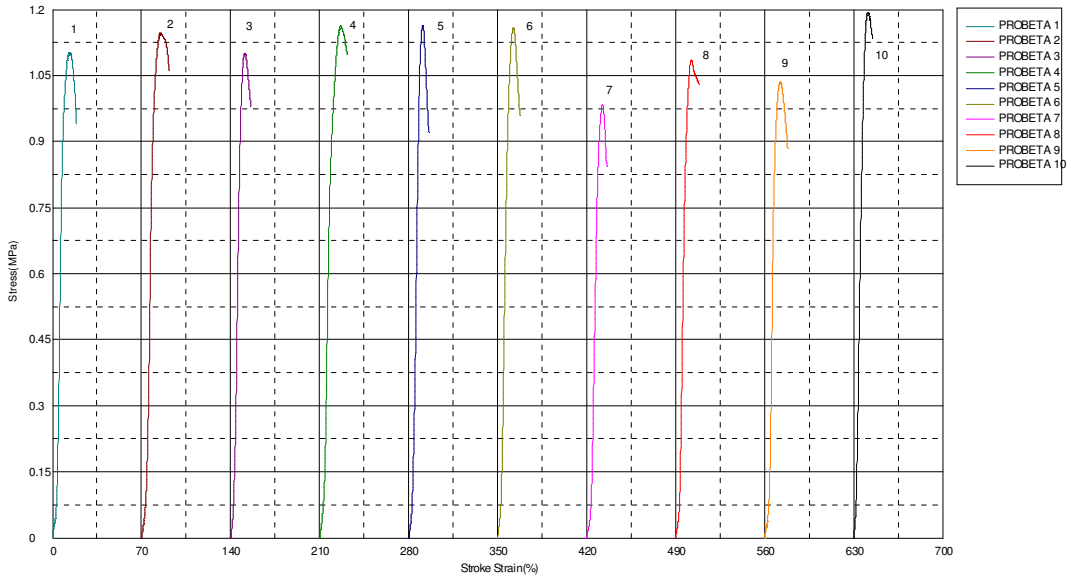


Figura 67. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R1P1V3

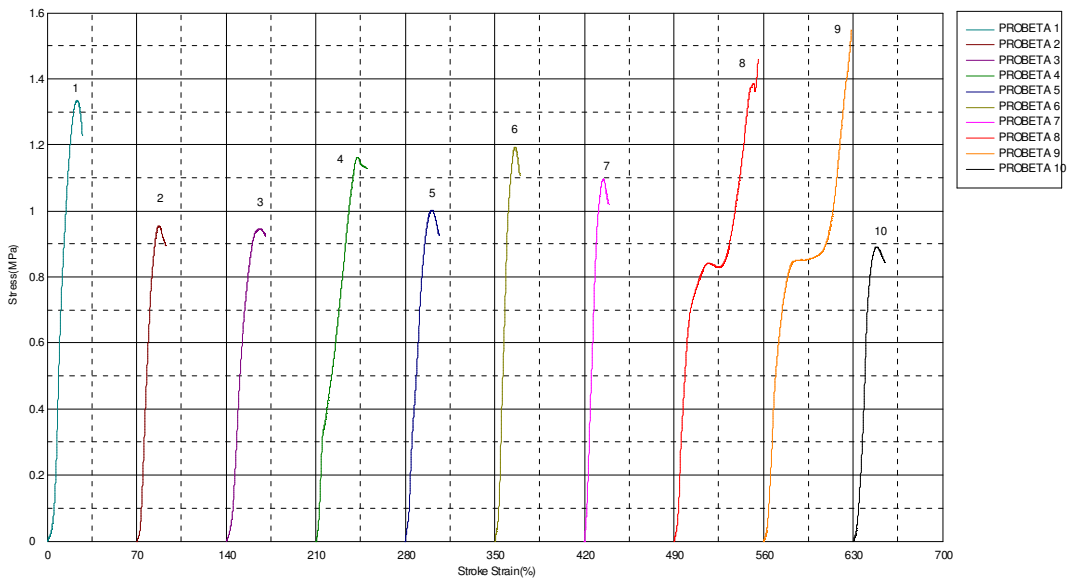


Figura 68. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R2P1V3

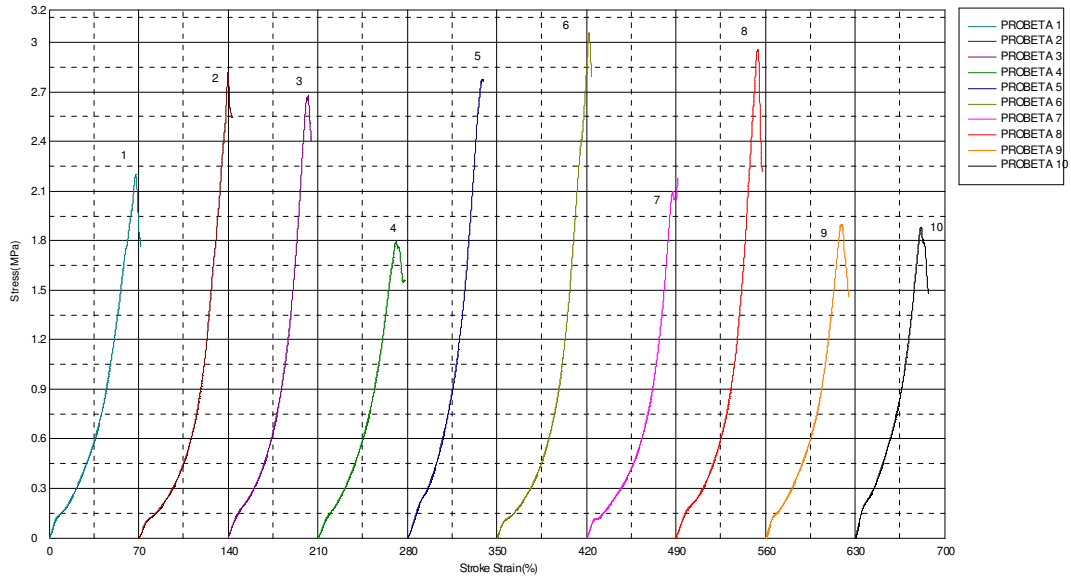


Figura 69. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R1P2V3

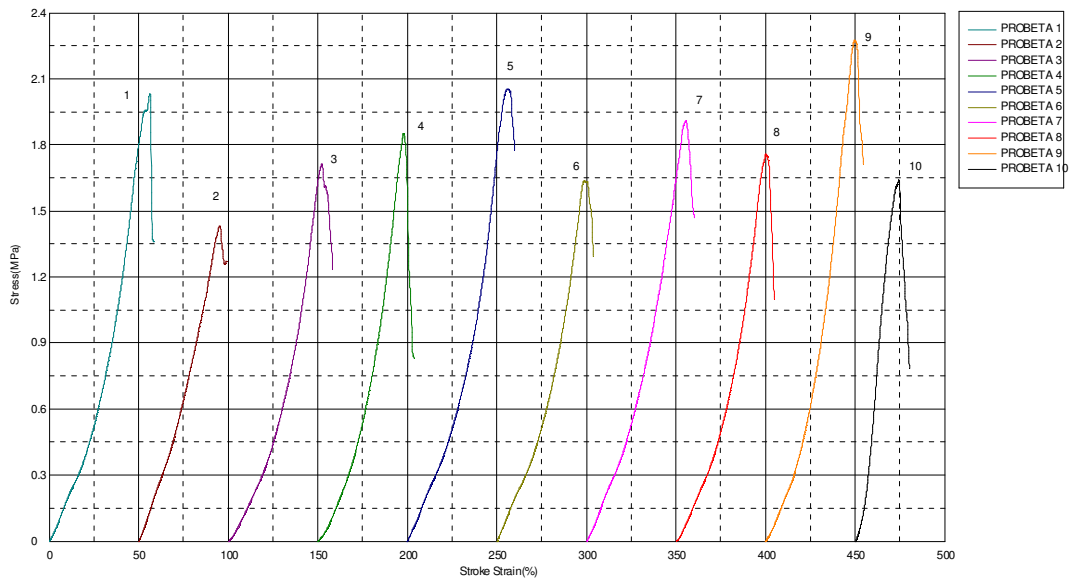


Figura 70. Diagrama esfuerzo-deformación para el tratamiento R2P2V3