



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRICOLAS**

**CAMPUS SAN LUIS POTOSI**

**PROGRAMA EN MAQUINARIA AGRICOLA**

**EVALUACION FUNCIONAL Y MODIFICACIONES A  
UNA MÁQUINA DESFIBRADORA DE LECHUGUILLA  
(Agave lecheguilla Torr.)**

**Elesban Mayorga Hernández**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**SALINAS DE HIDALGO, SAN LUIS POTOSI.**

**2004**

---

---

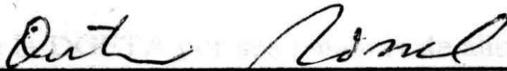
La presente tesis titulada: **EVALUACIÓN FUNCIONAL Y MODIFICACIONES A UNA MÁQUINA DESFIBRADORA DE LECHUGUILLA (Agave lecheguilla Torr. )**, realizada por el alumno: **Elesban Mayorga Hernández**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

## **MAESTRO EN CIENCIAS**

### **PROGRAMA EN MAQUINARIA AGRÍCOLA**

#### **CONSEJO PARTICULAR**

Consejero

  
\_\_\_\_\_

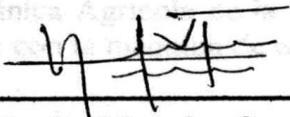
**Dr. habil Dietmar Rössel Kipping**

Asesor

  
\_\_\_\_\_

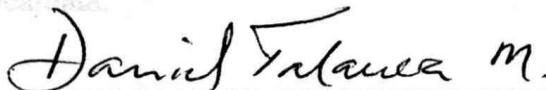
**Dr. Hipólito Ortiz Laurel**

Asesor

  
\_\_\_\_\_

**Dr. Nicolás Morales Carrillo**

Asesor

  
\_\_\_\_\_

**M.C. Daniel Talavera Magaña**

Salinas de Hidalgo San Luis Potosí, Noviembre de 2004

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí, por brindarme la oportunidad para desarrollar mis estudios de Postgrado.

A la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria (DGETA) por permitir mi superación y actualización profesional.

Al personal Académico, Administrativo y de Apoyo del Colegio de Postgraduados, por las facilidades brindadas durante mi estancia; así como por su valiosa amistad.

Al cuerpo de Asesores, Dr. Dietmar Rössell Kipping, Dr. Hipólito Ortiz Laurel, Dr. Nicolás Morales Carrillo y al MC. Daniel Talavera Magaña por su acertada dirección al trabajo realizado

A los compañeros y amigos de la DGETA por sus palabras de aliento durante la realización del presente.

Al Centro Social de Cardonal Hidalgo, en especial al Pbro. Hubert Dephoff, por el apoyo recibido en esta investigación.

Al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, por el apoyo en las pruebas realizadas con la máquina de esfuerzos Instron.

A los productores de lechuguilla del Alto Mezquital, en especial al Sr. Jerónimo Nopal y al Profr. Celedonio Botho Escamilla.

A los compañeros y amigos de la maestría y a los de Salinas; por compartir buenos momentos, pero sobretodo por aligerar la carga de los momentos difíciles.

## DEDICATORIA

A mis padres, por haber forjado con temple y coraje a hombres y mujeres de principios y valores muy sólidos.

A mis hermanos, aquellos quienes siempre estuvieron ahí para impulsarme a seguir adelante.

A mis sobrinos como un pequeño estímulo de superación personal y profesional.

A mis amigos, quienes han compartido los triunfos y las derrotas como si fueran propias, apoyándome en todo momento.

Mi Amor Y Reconocimiento A quien supo alentar pacientemente la culminación de este trabajo.

Nuevamente va por ellos, por los "Toros Salvajes de Chapíngo" de quienes aprendí a enfrentar las innumerables adversidades de la vida dando lo mejor de mí y disfrutando cada momento como si fuera el último

Por último, dedico este trabajo a todos aquellos quienes siempre han confiado en mí sin esperar nada a cambio.

## CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE ECUACIONES	ix
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xi
1.- INTRODUCCION	1
2.- REVISION DE LITERATURA.	3
2.1.- Antecedentes	3
2.2.- Descripción de la planta	3
2.2.1.- Ubicación taxonómica	3
2.2.2.- Descripción botánica	5
2.2.3.- Distribución geográfica	6
2.2.4.- Hábitat	6
2.2.5.- Plagas y enfermedades	7
2.3.- Producción de fibra	8
2.3.1.- Métodos de recolección	8
2.3.2.- Métodos de extracción de fibra	10
2.3.2.1.-Desfibrado de las hojas cortando la planta	10
2.3.2.2.-Desfibrado manual de las hojas sin cortarlas de la planta	10
2.3.2.3.-Desfibrado manual del cogollo	10
2.3.2.4.-Desfibrado mecánico del cogollo	10
2.3.2.5.-Desfibrado manual de las hojas	11
2.3.2.6.-Desfibrado mecánico delas hojas	12
2.3.3.- Procesamiento industrial de la fibra	13
2.4.- Comercialización de la fibra y elaboración de productos derivados de la planta de lechuguilla	16
2.5.- Pruebas y evaluación en equipos agrícolas	18

3.- OBJETIVOS	20
4.- HIPOTESIS	21
5.- DESCRIPCION DE LOS PROCESOS EVALUADOS	22
5.1.- Desfibrado manual	22
5.2.- Desfibrado mecánico	23
6.- MATERIALES Y METODOS	25
6.1.- Materiales utilizados	25
6.2.- Diseño estadístico	26
6.3.- Selección de las muestras	26
6.4.- Evaluación funcional	27
6.4.1.- Mediciones previas al proceso	27
6.4.2.- Proceso de desfibrado	27
6.4.3.- Mediciones posteriores al proceso	28
6.4.4.- Variables calculadas	29
6.5.- Calidad de fibra	31
6.5.1.- Variables calculadas	31
6.5.2.- Análisis estadístico	34
7.- RESULTADOS	35
7.1.- Evaluación funcional	35
7.1.1.- Especificaciones de la maquina	35
7.1.2.- Capacidad de trabajo	37
7.1.3.- Producción de fibra	38
7.1.4.- Porcentaje de despulpado	38
7.1.5.- Eficiencia de limpieza	39
7.1.6.- Requerimientos de potencia	40
7.1.7.- Requerimientos de mano de obra	40
7.2.- Calidad de fibra	41
7.2.1.- Densidad lineal	41
7.2.2.- Resistencia a la tensión	41
7.2.3.- Elongación máxima	42
7.2.4.- Daño mecánico	42

7.2.5.- Coloración	43
7.3.- Determinación de propiedades físico-mecánicas adicionales de la planta de lechuguilla	43
7.3.1.-Densidad de las hojas	44
7.3.2.-Angulo de reposo	44
7.3.3.-Coeficiente de fricción	45
7.3.4.-Resistencia a la tensión y porcentaje de elongación en la fibra	46
7.4.- Modificaciones en la maquina	48
7.4.1.- Análisis cinemático	48
7.4.2.- Análisis de resultados	56
7.4.3.- Parámetros tecnológicos de funcionalidad y calidad de trabajo	58
7.4.4.- Selección de alternativas	59
7.4.4.1.-Matriz de pruebas	60
7.4.4.2.-Evaluación de alternativas	62
7.4.4.3.-Selección de la alternativa optima	63
7.4.5.- Modificaciones al tambor limpiador	64
7.4.5.1.-Calculo del diámetro del cilindro	64
7.4.5.2.-Calculo de la longitud del cilindro	65
7.4.5.3.-Calculo del espesor del cilindro	65
7.4.5.4.-Calculo de las dimensiones de los clavos	69
7.4.5.5.-Calculo de las paletas limpiadoras	73
7.4.5.6.-Dimensionamiento del eje del tambor limpiador	73
7.4.6.- Modificaciones al bastidor	82
8.- CONCLUSIONES	84
9.- RECOMENDACIONES	85
10.- LITERATURA CITADA	86
11.- GLOSARIO	89
12.- ANEXOS	91

## LISTA DE CUADROS

Cuadro		Pagina
Cuadro 1	Clasificación taxonómica de la planta de lechuguilla	7
Cuadro 2	Producción de fibra procesada mecánicamente	41
Cuadro 3	producción de fibra procesada manualmente	41
Cuadro 4	Porcentaje de despulpado manual y mecánico en pencas de lechuguilla	42
Cuadro 5	Cantidad de fibra húmeda obtenida por tonelada de material verde procesado	43
Cuadro 6	Comparación de fineza en fibra de lechuguilla	45
Cuadro 7	Comparación de la carga máxima soportada en fibras de lechuguilla	45
Cuadro 8	Elongación a la ruptura en fibras de lechuguilla	46
Cuadro 9	Comparación del daño mecánico observado en fibras de lechuguilla	46
Cuadro 10	Coeficientes de fricción en fibra y hojas de lechuguilla	50
Cuadro 11	Valores promedio de elasticidad y resistencia a la tensión en fibras húmedas de Agave lecheguilla.	51
Cuadro 12	Fuerza requerida de descarnado en hojas de lechuguilla	59
Cuadro 13	Matriz preliminar de pruebas para el órgano limpiador	64
Cuadro 14	Matriz de pruebas de las herramientas de trabajo del tambor limpiador	66
Cuadro 15	Resultados obtenidos en la evaluación de herramientas del tambor limpiador	67

## LISTA DE FIGURAS

Pagina			
Figura 1	Planta de <i>Agave lecheguilla</i>		4
Figura 2	Cosecha y Almacenamiento de Hojas Externas de <i>Agave lecheguilla</i>		9
Figura 3	Herramientas Utilizadas en el Desfibrado Manual		11
Figura 4	Desfibrado Mecánico de <i>Agave lecheguilla</i>		12
Figura 5	Selección de Fibra		13
Figura 6	Precardado de la Fibra		14
Figura 7	Corte de Fibra de Lechuguilla		14
Figura 8	Embudado de Fibra		15
Figura 9	Marcaje y Empaque de Fibra de Lechuguilla		16
Figura 10	Productos Artesanales de Fibra de Lechuguilla		17
Figura 11	Fibra Terminada Lista Para Exportación		18
Figura 12	Diagrama de Flujo del Proceso de Desfibrado Manual		22
Figura 13	Desfibrado Manual de <i>Agave lecheguilla</i>		23
Figura 14	Diagrama de Flujo del Proceso Mecánico		24
Figura 15	Desfibrado Mecánico de Hojas de Lechuguilla en el Valle del Mezquital		24
Figura 16	Determinación de la Elongación Máxima y Resistencia a Tensión en Fibras de Lechuguilla		33
Figura 17	Determinación del Daño Mecánico en la Fibra		33
Figura 18	Máquina Desfibradora Marca Cardoma		37
Figura 19	Determinación del Ángulo de Reposo		44
Figura 20	Curva Esfuerzo-Deformación en Fibras de Lechuguilla		47

Figura 21	Modelación de Fuerzas en el Tambor Limpiador	48
Figura 22	Disposición de los Clavos que Procesan la Penca	51
Figura 23	Dispositivo Para Calcular la Fuerza de Descarne Requerida en Hojas de Agave lecheguilla	55
Figura 24	Disposición de las Cuchillas Limpiadoras en el Cilindro	61
Figura 25	Fuerzas Que Actúan en el Proceso de Desfibrado	65
Figura 26	Equilibrio de Fuerzas en el Tambor Limpiador	66
Figura 27	Sección Neta Sometida a Esfuerzos de Tensión	68
Figura 28	Diagrama de Cuerpo Libre de las Fuerzas que Actúan en los Clavos	69
Figura 29	Diagrama de Esfuerzo Cortante y Momento Flexionante en los Clavos	71

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación	Página
1.- Capacidad de trabajo	32
2.- Porcentaje de despulpado o descarnado	32
3.- Eficiencia mecánica de limpieza	32
4.- Requerimientos de mano de obra	33
5.- Densidad lineal o fineza	34
6.- Elongación máxima	35
7.- Densidad de las hojas	47
8.- Coeficiente de fricción	49
9.- Coeficiente de fricción dinámico	49
10.- Velocidad lineal del tambor	53
11.- Calculo del torque	54
12.- Calculo de la fuerza tangencial	54
13.- Calculo de la cantidad efectiva de clavos trabajando	56
14.- Calculo de la fuerza aplicada por el cilindro	56
15.- Calculo de la fuerza real aplicada por el cilindro	57
16.- Calculo del diámetro del cilindro	69
17.- Calculo de la longitud del cilindro	70
18.- Esfuerzo de calculo	71
19.- Área transversal de contacto de la placa con el clavo	72
20.- Tensión por aplastamiento	72

21.- Determinación del grosor del cilindro	77
22.- Área total sometida a tensión	73
23.- Calculo de la fuerza de tensión en el tornillo	74
24.- Esfuerzo cortante medio	76
25.- Calculo de la longitud de los tornillos	76
26.- Determinación de la potencia requerida para realizar la limpieza	78
27.- Calculo del momento del tambor	78
28.- Potencia necesaria para vencer el momento de inercia	79
29.- Par de rotación	79
30.- Momento de inercia	79
31.- Calculo de la masa del cilindro	79
32.- Calculo de la masa del tubo	80
33.- Calculo de la masa de las tapas	80
34.- Calculo de la masa de los bujes	80
35.- Calculo de la masa de los clavos	81
36.- Calculo de la masa de las paletas limpiadoras	81
37.- Aceleración angular en el periodo de arranque	82
38.- Esfuerzo cortante causado por el momento torsionante	83
39.- Calculo del diámetro del eje	83
40.- Esfuerzo admisible	84
41.- Calculo del torque producido por el árbol	84
42.- Calculo del diámetro del eje (teoría de Von Misses)	42
43.- Angulo de giro permisible en el eje	43

## RESUMEN

La fibra de lechuguilla (ixtle) se utiliza para elaborar productos de uso industrial como cepillos para pulir metales, relleno de muebles, asientos, tapetes, alfombras, filtros automotrices; puertas, techos, paredes, y mobiliario.

En el presente trabajo se evaluó una máquina desfibradora de lechuguilla, con la finalidad de poder determinar los parámetros funcionales y de calidad de fibra a tomar en cuenta para modificarla. Al no existir una metodología establecida para desfibradoras de lechuguilla, los parámetros de evaluación se adecuaron a los presentes en otras máquinas. Para la calidad de fibra se evaluó la resistencia a la tensión, fineza, elongación máxima, daño mecánico y coloración presentes en la fibra obtenida de la planta de lechuguilla, la cual se procesó mediante los métodos mecánico y manual. Se compararon los tratamientos (manual y mecánico) mediante una prueba de t de student para muestras apareadas, con la finalidad de comparar la calidad de fibra obtenida en cada uno. No se encontraron diferencias entre tratamientos para la fineza (densidad lineal) resistencia a la tensión, elongación máxima y daño mecánico ( $p < 0.05$ ). Sin embargo; en la coloración de la fibra existieron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) debido a la cantidad de residuo que presentaba la que fue tallada con la máquina.

Palabras clave: *Agave lecheguilla*, propiedades físico-mecánicas, fibras duras, desfibrado mecánico, evaluación.

## SUMMARY

At present, lechuguilla fiber (i.e., ixtle) is used to produce items such brushes for The industry also use these fibers to produce doors, roofs, walls, sheets and shelves.

this work tested a lechuguilla-shredding machine . The objective was to determine whether available equipment required modifications given existing performance parameters and fiber quality data. There is no methodology for testing lechuguilla shredding. Variables tested (i.e., fiber quality, resistance to the tension force, fineness, maximum elongation, mechanical damage and color showed by the fibers) were compared with others from machines performing similar processes. Shredding by hand and mechanical shredding were evaluated. Data analysis used t-student tests for paired samples. There were not significant differences between treatments for fineness (i.e., linear density), resistance to the tension force, maximum elongation and mechanical damage ( $p < 0.05$ ). There were significant difference for color of fiber ( $p < 0.05$ ). This appeared to be related to the amount of residue found in the machine

Key words: *Agave lecheguilla*, physical-mechanical properties, hard fibers, mechanical shredding, testing.

## 1.- INTRODUCCION

México es un país caracterizado por su gran diversidad de climas y una amplia variedad en vegetación. Podemos encontrar desde climas tropicales con abundante precipitación hasta climas secos con precipitaciones muy escasas y largos periodos de sequía.

Se estima que mas del 40 % de la superficie nacional, esta constituida por regiones áridas y semiáridas enclavadas en la porción norte y centro-norte. Las características propias de esta región tales como la escasez de recursos acuíferos, la escasa o nula productividad del suelo y la misma agresividad del clima han sido factores desfavorables para el desarrollo de actividades agropecuarias en menor escala, reduciéndose en la mayoría de los casos a la realización de una agricultura y ganadería de autoconsumo y en algunos casos al aprovechamiento de recursos forestales propios de este lugar. Dentro de la flora que se desarrolla en el desierto mexicano, destacan tres especies que se han estado explotando a lo largo de los años por los campesinos; la palma (*Yuca cannerosana*), la lechuguilla (*Agave lechuguilla*) y la candelilla (*Euphorbia antispyhillitica*).

La explotación de fibras de palma y lechuguilla constituyeron durante varios años el sistema ixtlero desarrollado en los estados de Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas. El ixtle de lechuguilla tuvo su mejor época en los años 30's y aunque a lo largo de los años ha tenido altibajos, la venta del producto no ha igualado al de esa época decayendo a raíz de la introducción de los productos plásticos. Sin embargo; la actividad del tallado de ixtle, ha subsistido a pesar de las adversidades logrando que el producto se exporte a países de Europa, Norte y Sudamérica.

La principal limitante tecnológica que enfrentan los productores de fibra de lechuguilla ha sido desde hace décadas, el empleo de herramientas rústicas (cuchillo y tallador) para poder obtener un producto clasificado por la industria como "de primera calidad"; poniendo obstáculos en la compra de la fibra que es tallada con máquinas desfibradoras.

La introducción del principio mecánico del tallado de lechuguilla se remonta a el desfibrado ancestral de la planta golpeando y tirando de la penca sobre las espinas de biznaga (*Echinocactus spp.*) y posteriormente al paso del tiempo se siguió el mismo procedimiento sobre una tabla insertada con clavos; de ahí se toma el principio de "peinar la penca", posteriormente en los años 70's surgen las primeras "maquinas rpiadoras", las cuales constaban de un tambor macizo de madera con clavos insertados sobre el cuerpo de éste, el tambor era accionado con un motor de gasolina o eléctrico. En la actualidad la fabricación de máquinas talladoras de lechuguilla difiere muy poco de los primeros prototipos fabricados siguiendo el principio de peinar la penca con clavos dispuestos en la periferia de un cilindro metálico el cual gira al ser accionado por un motor eléctrico o de gasolina.

El principal inconveniente que presentan las máquinas usadas para procesar lechuguilla, es la mala limpieza, lo que conlleva a tener fibra manchada, con alto contenido de bagazo afectando de manera negativa el precio de compra. En algunos casos la merma del producto es alta debido a que el tambor tira de la fibra limpia enredándola o expulsándola por la tolva de descarga junto con el bagazo.

Las empresas acaparadoras de fibra de lechuguilla muestran desconfianza para proporcionar datos y características acerca de los estándares óptimos de calidad en la fibra bruta, no existiendo referencias acerca de un estudio que muestre que tanto demerita la misma, así como las características que son modificadas al procesar las pencas por métodos mecánicos.

Ante la incesante necesidad de promover la explotación de recursos propios de las zonas áridas y semiáridas para estar en capacidad de elevar el nivel de vida de las familias productoras de ixtle de lechuguilla, es como surge la propuesta de efectuar el presente trabajo en donde además de evaluar y comparar la fibra obtenida manual y mecánicamente; se fundamenta la modificación de las desfibradoras que existen en el mercado con la finalidad de obtener fibra de calidad, en cantidad suficiente y con pocas pérdidas del producto a través de una máquina sencilla, económica, práctica y con un costo de adquisición accesible a la economía de los productores.

## 2.-REVISION DE LITERATURA.

### 2.1.- ANTECEDENTES.

Se tienen referencias de que las tribus indígenas que habitaban la región árida del norte del país, utilizaban desde la antigüedad el ixtle para elaborar cordeles. Evidencias arqueológicas indican su uso desde miles de años atrás. Taylor(1966) citado por Maiti (1980) menciona que “en algunas excavaciones realizadas en la Caverna del Espanto, en el centro de Coahuila México, se encontraron gran cantidad de cordeles, sandalias y tapetes hechos de lechuguilla y yucca. En la época de la Colonia, los productos elaborados de esta fibra solamente eran para uso domestico, no teniendo gran valor comercial. Posteriormente al año de 1856 con el favorecimiento en la formación de latifundios al llevarse a cabo la legislación en la tenencia de la tierra y el ingreso de compañías deslindadoras de otros países, principalmente de los Estados Unidos de Norteamérica; se le da un gran auge al sistema de explotación del ixtle en el norte del país. Los campesinos quienes carecían de organización, fueron empleados por las grandes haciendas en donde a cambio de víveres en la tienda de raya realizaban el laborioso proceso del tallado. Posteriormente se incrementó el uso de fibras vegetales en otros países, creciendo la demanda para ser usadas en arpillería y cordelería; adquiriendo gran importancia al establecerse las industrias textiles. A lo largo de su historia la producción y comercialización de este producto, ha tenido altibajos, sin embargo se ha diversificado tanto su uso a tal grado que la investigación para obtener derivados tanto de la fibra como de la pulpa (guishe) no ha cesado.

Se tienen referencias de que hasta 1980 se empiezan a introducir en forma masiva las máquinas desfibradoras en la región ixtlera, aunque ya se había estado utilizando el proceso mecánico muy localizadamente con algunas máquinas demasiado rústicas. Es importante mencionar que la diferencia entre estas máquinas comparadas con las actuales es mínima, eso nos da una referencia del avance técnico y tecnológico en el proceso de desfibrado de la planta de lechuguilla

### 2.2.- DESCRIPCION DE LA PLANTA.

#### 2.2.1.- UBICACIÓN TAXONOMICA (CLASIFICACION).

En la actualidad existen algunas dudas acerca de la especie (Maiti 1995). Según Marroquín et al. (1981) también es citada como *Agave poselgeri*, Salam Dyke (1859), *Agave lophantha* var. *Pallida* Berger (1915). Otros autores la señalan como *Agave univittata*, *Agave lophantha*, y *Agave funkiana* en la zona de Jaumave y Tula, Tamaulipas; México.

La clasificación mas utilizada en la actualidad es la realizada por Torrey y Bond en el año de 1859.

Tabla No 1 Clasificación taxonómica de la planta de lechuguilla *Agave lechuguilla* Torr (1859)

Reino-----Vegetal  
Subreino-----Fanerógamas  
Grupo-----Angiospermas  
Subgrupo-----Monocotiledóneas  
Orden-----Liliflorales  
Familia-----Amarillidaceae  
Genero-----Agave  
Especie-----Lecheguilla.



Fig. 1.- Planta de *Agave lecheguilla*.

#### 2.2.2.- DESCRIPCION BOTANICA (MORFOLOGIA).

La planta de lechuguilla tiene aspecto de maguey pequeño. Esta planta xerófila conforme se va desarrollando, adquiere la forma de roseta por la disposición de las hojas, por este motivo; esta considerada dentro del matorral desértico rosetófilo o crasirosulifolio espinoso.

**RAIZ:** El sistema radicular de la planta es pivotante, la raíz principal alcanza un diámetro que va de 3 a 4 centímetros y una longitud máxima entre 12 y 20 centímetros (Valero 1946, Zamora 1980, Sánchez 1991).

La forma es cilíndrica y su consistencia es leñosa, presenta raíces secundarias largas y delgadas. A partir de la parte media hasta el final de las raíces secundarias brotan en gran cantidad pequeñas raíces terciarias.

**TALLO:** No presenta un tallo bien definido ya que esta formado por un corto cuello apenas perceptible y de color blanquecino demostrando la ausencia de clorofila.

**HOJAS:** Maiti (1995) menciona que esta planta presenta de 25 a 50 hojas las cuales pertenecen a un solo tallo. Las hojas son coriáceas con una longitud de 30 a 50 centímetros y anchura de 3 a 4 centímetros, sin embargo Rangel (1987) citado por Sánchez (1991) reporta dimensiones de 50 a 90 centímetros de longitud y de 4 a 10 centímetros de ancho. La coloración va de un verde amarillento a verde oscuro. En el margen presentan espinas en forma de gancho con la punta en dirección de la base de la hoja, la separación entre espinas es de 20 a 40 milímetros y su longitud de 3 a 8 milímetros (Maiti 1995). En la punta se localiza una espina terminal que mide de 2 a 5 centímetros. Al centro de la planta crece un conjunto cónico de hojas llamado cogollo, estas son las mas jóvenes de la planta. En la parte norte del país (región ixtlera) el cogollo es la única parte de donde se extrae la fibra por ser ésta la de mayor calidad (Valero 1949) además de facilitar el tallado por contener un tejido más suave.

**ESCAPO FLORAL:** Comúnmente es llamado quiote o garrocha. Su longitud es de 3 a 4.5 metros y su diámetro de 2.5 a 3 centímetros. Esta provisto de bracteas angostas dispuestas a lo largo del mismo apareciendo con la punta hacia afuera a medida que madura y se va lignificando, además de ir tornándose de consistencia leñosa.

**FLORES:** La planta de lechuguilla únicamente florece una vez durante su ciclo vegetativo. Las flores se localizan en la punta del escapo floral en racimos por lo regular de 2 a 3 (en ocasiones mas) bracteas, las flores presentan un perianto tubular verde amarillo (aunque algunas veces se torna de color blanco o púrpura), seis segmentos casi iguales de 1.5 a 2 centímetros de longitud. Los estambres (seis) están insertados en la punta del tubo floral, los filamentos de aproximadamente 3.5 centímetros, antera de 1.5 centímetros; estilo de 2.5 a 4 centímetros y el ovario de 1 a 1.5 centímetros de longitud (De la Cruz et al 1974, citado por Zamora 1980).

**FRUTO:** La planta de lechuguilla es monocárpica por lo cual fructifica solo una vez, produciendo cápsulas coriáceas de color negro o café de 1.5 a 2.5 centímetros de longitud por 1.2 a 1.5 centímetros de diámetro; oblonga, a menudo cilíndrica a obtuso triangular con

una punta aguda corta, 3 cámaras, semillas numerosas, planas, negras y brillantes (De la Cruz et al 1974, citado por Zamora 1980).

Aunque se puede reproducir sexualmente por medio de semillas, la planta presenta rizomas en donde se generan rebrotes o hijuelos antes que la planta florezca dando paso al crecimiento de nuevas plantas (reproducción asexual).

SEMILLAS: Se presentan en gran cantidad, miden de 3 a 7 milímetros de largo, son planas y de color negro brillante .

### 2.2.3.- DISTRIBUCION GEOGRAFICA.

Forma parte principal del tipo de vegetación denominado Matorral Crasirosulifolio Espinoso ó Matorral Desértico Rosetófilo, asociado principalmente con guapilla (*Agave falcata*), espadín (*Agave striata*), guapilla china (*Hetchia glomerata*), sotol (*Dasyilirion spp*) y palmas (*Yuca spp*), llega a formar parte también en poblaciones naturales de menor densidad en Matorral Micrófilo, asociado principalmente con gobernadora (*Larrea tridentata*) y hojasen (*Fluorensis cernua*)(Berlanga et al.1992). Maiti (1995) menciona que entre las principales especies de plantas con las que se asocia la lechuguilla son gobernadora (*Larrea tridentata*), palmas (*Yuca spp*), guayule (*Parthenium argentatum Gray*), nopales (*Opuntia spp*), sotol (*Dasyilirion spp*) y mezquites (*prosopis spp*).

Según Marroquín (1964) citado por Berlanga et al. (1992), su distribución se extiende desde los 99° 03' a 106° 45' de longitud oeste y 21° 59' a los 31° 41' de latitud norte, comprendiendo los estados de Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, Durango, San Luis Potosí, Tamaulipas, y Zacatecas. Rzedowski (1964) menciona que también se le puede encontrar en los estados de Oaxaca, Pueble e Hidalgo.

### 2.2.4.-HABITAT (REQUERIMIENTOS AGROCLIMATICOS).

Se desarrolla preferentemente sobre suelos someros, en laderas calizas y pedregosas cuya profundidad va de 0.1 a 1 metro y de 20 hasta el 80 % de pedregosidad, con pH de 6.5 a 8.5 y contenidos de materia orgánica de 1 a 15 % aunque en ocasiones se desarrolla en suelos planos que cumplen las características anteriores aunado a un buen drenaje. Crece en altitudes de 200 hasta 2000 metros sobre el nivel del mar con temperaturas que oscilan entre – 8 ° a 44 ° centígrados pudiendo resistir heladas e incluso nevadas. Maiti (1995) reporta rangos de temperatura aun más extremosos desde – 12 ° centígrados en invierno hasta 46 ° centígrados en verano.

### 2.2.5.- PLAGAS Y ENFERMEDADES

Debido a la rusticidad de la planta y a la poca importancia que se le ha dado, aún no se ha tomado en cuenta como debiera de ser el estudio e identificación de plagas y enfermedades que la afectan..

En los pocos trabajos realizados se han hecho referencia a estudios llevados a cabo en la zona norte del país por Perales (1987) y De la Cruz (1988) los cuales reportan las siguientes plagas y enfermedades.

**Peltophorus polimitus:** El adulto produce daños en las hojas y el cogollo perforándolos para poder alimentarse. El daño en el escapo floral es similar cuando se encuentra tierno y succulento.

**Scyphophorus interstitialis Gill:** Comúnmente llamado “picudo de la lechuguilla”. El daño a la planta es ocasionado por el adulto que se alimenta de la base de la hoja causando perforaciones irregulares sin consumir la epidermis. En estado larvario barrena la raíz cuando las plantas maduras se encuentran en floración.

**Megathymus sp:** Este barrenador en estado larvario perfora el cogollo en diferentes lugares dañando severamente la estructura de las fibras, motivo por el cual se pierde en su totalidad la fibra al no cosecharse el cogollo.

**Escamas:** Estos insectos impiden la actividad fotosintética de la planta además de alimentarse de la savia ocasionando una clorosis severa y pérdida de vigorosidad.

**Esqueletizadores:** Son insectos demasiado voraces que se alimentan únicamente del ápice de las hojas, en esta parte dejan expuesto el tejido fibroso favoreciendo la oxidación y al paso del tiempo muere y se esclerotiza.

**Roedores y lagomorfos:** Las ardillas y ratas mastican la parte basal de las hojas causando pequeñas heridas. Los topos construyen túneles subterráneos conectados a las raíces de donde se alimentan. Las liebres también mastican las hojas, sin embargo; el daño causado es mucho mayor llegando a cortarlas por completo.

**Alternaria spp:** Se va presentando una coloración amarillenta (secadera) que aumenta gradualmente desde el ápice hasta la base de las hojas; ocasionalmente llega a secar todo el follaje dándole una apariencia de estar tostado o quemado.

**Capnodium spp:** Esta cenicilla o fumagina, cubre las hojas dándole una coloración negruzca, al cubrir a la planta impide en gran medida la actividad fotosintética deteriorándose paulatinamente.

### 2.3.-PRODUCCION DE FIBRA.

Existe una gran variabilidad en la producción de fibra de lechuguilla tanto por unidad de superficie como por planta. Diversos autores entre ellos Patoni (1917), Mesa y Villanueva (1948) Ezqueda(1962), Beltrán(1964), González y Sheffey (1964), De la Cruz y Zapien (1974), Zamora(1980) y Perales (1987), mencionan que la densidad, condiciones climáticas, variación en el tipo de suelo, vigorosidad y desarrollo de la planta, época, intensidad y frecuencia de cosecha, así como el tiempo de regeneración son los principales factores determinantes.

De acuerdo a Zamora (1980) en los lugares en donde se desfibra el cogollo de la planta este se cosecha 10 veces al año (un corte cada 36 días en promedio). Los cogollos tardan de 6 a 12 meses en regenerarse, dependiendo de las lluvias. Una planta de lechuguilla puede durar en producción de 8 a 10 años.

Fuentes (1958) estimó que el contenido promedio de fibra por planta era del 9.12 % en tanto que Perales (1987) menciona que el cálculo de la producción en porcentaje de peso de fibra extraída de un determinado volumen de la planta corresponde de 2 al 10 % del peso total de la misma. Campos (1967), De la Cruz (1978) y Zapien (1980) citados por Sánchez (1991) consideran un contenido de fibra seca por planta entre 9.12 a 11.0 % y de fibra recién tallada (húmeda) de hasta el 40 %.

Existen algunas variantes en la metodología seguida durante el proceso de desfibrado de acuerdo al lugar en donde se procesa, a la parte de la planta que se desfibra (hojas periféricas o cogollo) y al modo de tallar (manual o mecánico). En forma simplificada estas se puedan clasificar de la siguiente manera.

- Desfibrado de las hojas cortando toda la planta.
- Desfibrado manual de las hojas sin separarlas de la planta.
- Desfibrado manual del cogollo.
- Desfibrado mecánico del cogollo.
- Desfibrado manual de las hojas cortándolas de la planta.
- Desfibrado mecánico de las hojas cortándolas de la planta.

### 2.3.1.- METODOS DE RECOLECCION O COSECHA.

La cosecha de la planta de lechuguilla, generalmente consiste en la recolección de los cogollos debido a que contienen las hojas mas jóvenes y por lo tanto es más sencilla la extracción de fibra. Según Sheldon (1980) citado por Maiti (1995) los cogollos se empiezan a recolectar a partir del sexto año. En algunos lugares como es el caso del Valle del Mezquital en el estado de Hidalgo, la cosecha efectuada es de las partes externas de la planta.

- a) RECOLECCION DE COGOLLOS (REGION IXTLERA DEL NORTE DEL PAIS).

Para las regiones en donde se talla el cogollo de la planta (región norte del país), la jornada comienza temprano trasladándose el campesino hasta la plantación destinada. El equipo de recolección consta de una cogollera (pedazo de garrocha de 2 a 2.5 m de largo con anillo metálico en uno de sus extremos) y la huajaca (pequeño morral tejido en forma de red con un aro de madera en la boca). Para descogollar, se introduce el aro de la cogollera hasta la base del cogollo haciendo movimientos laterales con el mango y tirando de él fuertemente hasta separarlo. Al desprender el cogollo se observa que solamente queda una pequeña zona de gemación central que produce la regeneración de la planta al paso del tiempo. Una vez separado el cogollo se introduce en la huajaca que el productor lleva en la espalda, llegando a transportar ahí hasta 20 kg de material.

b) RECOLECCION DE HOJAS (ZONA DEL VALLE DEL MEZQUITAL, EDO. DE HGO).

En los lugares en donde se tallan las hojas externas de la planta, el productor se auxilia de una “tajadera”(garrocha de 2 a 2.5m de longitud con una cuchilla pequeña en forma de media luna en un extremo). Con esta herramienta se cortan una a una las hojas externas de la planta dejando solamente el cogollo. Las hojas se acomodan en forma encontrada formando gavillas o montones que son atados con cuerdas para posteriormente ser transportados por animales o con vehículos hasta el lugar en donde se van a procesar.

Ocasionalmente existen productores quienes transportan máquinas talladoras hasta el lugar de la cosecha para realizar el procesamiento en el mismo lugar y así transportar solamente la fibra.



Fig. 2 .- Cosecha y almacenamiento de hojas externas de Agave lecheguilla.

2.3.2.- METODOS DE EXTRACCION DE LA FIBRA.

#### 2.3.2.1.- DESFIBRADO DE LAS HOJAS CORTANDO TODA LA PLANTA

Utilizando una barra de acero, se extrae la planta con todo y raíces. Para el tallado se utilizan unas tenazas de resorte colocadas en un banco de madera y una rozadera para cortar las hojas y obtener la fibra. Este método ya no es utilizado en la actualidad.

#### 2.3.2.2.- DESFIBRADO MANUAL DE LAS HOJAS SIN CORTARLAS DE LA PLANTA.

Usando unas tenazas con filo, se ejerce una fuerza de tensión sobre la hoja que aun esta unida a la planta hasta que se separa por completo la pulpa (guishe) de la hoja. Posteriormente la fibra se corta y se pone a secar. Al igual que el método anterior, este procedimiento ya no se utiliza.

#### 2.3.2.3.- DESFIBRADO MANUAL DEL COGOLLO.

Cuando se han terminado de cosechar los cogollos, el productor busca un lugar sombreado o en su defecto transporta una buena cantidad de material hasta su vivienda. Las herramientas a utilizar son: un cuchillo romo (sin filo) el cual inserta por la punta a un tronco fijo, debajo del cuchillo coloca un banco o base de madera que es donde se coloca la hoja. Para despulpar el productor presiona la hoja con el cuchillo y tira fuertemente de la penca hasta que queda la fibra limpia de pulpa, se enrolla el extremo desfibrado en un pedazo cilíndrico de madera (bolillo) y se procede a repetir la operación por el otro extremo. Una vez obtenida la fibra, se pone a secar al sol a temperaturas y humedades ambientales típicas de las zonas áridas.

#### 2.3.2.4.-DESFIBRADO MECANICO DEL COGOLLO.

Al igual que en el procedimiento anterior una vez cosechado el cogollo, se recopilan en el sitio en donde se procesará. El productor en este caso utiliza una máquina talladora o “ripiadora” que consta de un cilindro metálico o de madera con puntas de acero dispuestas en la periferia, el cilindro es accionado por un motor eléctrico o de gasolina con potencia variable de acuerdo al tamaño y construcción de la máquina. Al estar girando el tambor, el cogollo es introducido a través de una rejilla para ser desfibrado, primero por un lado y posteriormente se voltea, repitiendo la operación.

### 2.3.2.5.- DESFIBRADO MANUAL DE LAS HOJAS.

Después de cosechar y recopilar las hojas, el productor utiliza un cuchillo romo (sin filo) de acero de 30 a 50 cm de longitud, 3.5 cm de ancho ,0.3 a 0.5 cm de grosor y aproximadamente 0.3 a 0.45 kg de peso, un banco de madera y un pequeño mazo de madera de diámetro y longitud variable con un peso aproximado de 0.5 a 0.7 kg, cada hoja es macerada en la base donde se encuentra la parte mas gruesa, esto se hace para poder facilitar el trabajo cuando se despulpa esa parte de la penca. Una vez machacada la hoja, el productor primero sujeta con la mano la parte más delgada y la coloca sobre el banco de madera, coloca encima el cuchillo el cual se encuentra con la punta insertada en un madero o tronco fijo, presiona la hoja con el cuchillo para raspar hasta una longitud máxima de 15 cm con movimientos repetitivos, una vez limpia; esta parte se enreda en un pedazo cilíndrico de madera para proceder a desfibrar el otro extremo de la penca. Cuando la fibra se encuentra completamente limpia, se coloca al sol por espacio de 3 días para que seque por completo.



Fig. 3 .- Herramientas utilizadas en el desfibrado manual

### 2.3.2.6.- DESFIBRADO MECANICO DE LAS HOJAS.

Ya recopiladas una buena cantidad de hojas en el lugar en donde se van a procesar (en el campo o en la vivienda), el productor utiliza una maquina desfibadora que es semiportatil debido a su peso (aproximadamente 50 kg), construida de acero y accionada por un motor que puede ser eléctrico o de gasolina con una potencia de 0.74 a 2.98 kW (1 a 4 Hp). El principio básico de funcionamiento es el mismo que en las maquinas del norte del país, un tambor metálico giratorio con puntas de acero, va peinando las pencas al introducirse a través de una rejilla de seguridad, primero por un extremo y luego por el otro. Terminado este proceso la fibra se coloca al sol durante 3 días.



Fig. 4 .- Desfibrado Mecánico de Agave lecheguilla

### 2.3.3.- PROCESAMIENTO INDUSTRIAL DE LA FIBRA.

Antes de venderse, la fibra que se exporta tiene que pasar por un proceso industrial en donde se detalla para poder acrecentar su valor comercial en el mercado.

El procedimiento industrial mecánico que se presenta en las plantas beneficiadoras de fibra de lechuguilla por lo general es el mismo, salvo algunas variantes que se presentan en la línea de producción, las cuales se deben a aspectos relacionados con la disponibilidad de espacio, tecnología y mano de obra, sin embargo; a continuación se describe una línea de producción básica.

- a) **SELECCIÓN:** La fibra es clasificada cuidadosamente por personas experimentadas quienes la separan de acuerdo a su calidad (color, tamaño y limpieza). Después se forman manojos de fibras de aproximadamente 2 kg y se empaican en fardos de alrededor de 120 kg para posteriormente ser almacenados o llevados directamente a la factoría en donde se beneficiará.



Fig. 5.- Selección de fibra

- b) **PRECARDADO:** Se separan y peinan los filamentos de la fibra, además de limpiarlos de impurezas. El proceso es a través de una máquina en donde la fibra es peinada en ambos extremos, por punzones de acero, al salir de la máquina la fibra es emparejada en los extremos y se ata con un cordel.



Fig. 6.- Precardado de la fibra

- c) CORTE: Los manojos elaborados se pasan a esta área en donde con una cortadora circular se cortan ambos extremos del manajo de acuerdo al tamaño de la fibra. La eliminación de las puntas y los troncos es por la diferencia de grosor de estas partes con respecto a la parte media de los filamentos.



Fig. 7.- Corte de fibra de lechuguilla

- d) **MEZCLADO:** Continúa el proceso de separación de las fibras, a la vez que son combinadas para uniformizar el color y tamaño de las mismas por medio de una máquina mezcladora cardadora. Sánchez (1991), menciona que en este proceso se adiciona un lubricante textil mezclado con agua al 5 % con el objeto de hacer que la fibra sea más flexible.
- e) **AMARRE Y EMBUDADO:** En esta fase se hace la separación de los CARES y las COLAS, procediendo a hacer manojos que son colocados en un embudo cuyo diámetro es ligeramente menor a los tubos de papel en donde se empaquetan.

Los carés son productos terminados cuya fibra se procesa durante 45 minutos mezclando puntas y troncos de la fibra en forma contraria a fin de obtener uniformidad en colores y texturas (Sánchez 1991).

En la producción de colas PQ y HT, la fibra se mezcla y se peina en un mismo sentido; en las primeras se emplean 35 minutos como mínimo en peinar y mezclar mientras que en las segundas el proceso tarda de 12 a 15 minutos.



Fig. 8.- Embudado de fibra

- f) **GUILLOTINADO:** De acuerdo a las medidas solicitadas por el cliente, los envases de papel se colocan en una cortadora de tipo guillotina de donde van saliendo con las dimensiones que requiere el mercado.

- g) EMPAQUE : La fibra se empaqueta uniformemente de acuerdo a la longitud de los empaques. Los carés son colocados en cajas de cartón de aproximadamente 25 kg, mientras que con las colas se hacen bultos de 50 kg.
- h) MARCAJE: Se anotan las especificaciones del producto tales como medidas, peso bruto, peso neto, color, etc.

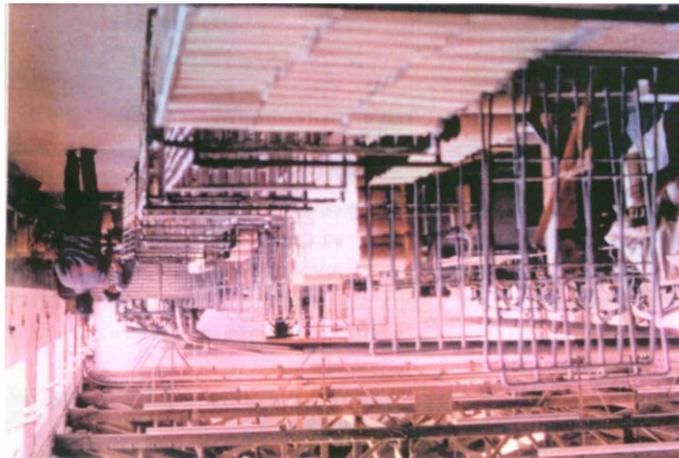


Fig. 9.- Marcaje y Empaque de fibra de lechuguilla

Del proceso industrial resulta el subproducto denominado “maraña” la cual se aprovecha para la manufactura de hilos, sogas, cuerdas, lazos; así como para estropajos, rellenos de muebles y bajoalfombras. Este subproducto equivale al 10 % total de la fibra (De la Garza 1985, citado por Sánchez 1991).

#### 2.4.- COMERCIALIZACION DE LA FIBRA Y ELABORACION DE PRODUCTOS DERIVADOS DE LA PLANTA DE LECHUGUILLA.

La comercialización de la fibra de lechuguilla ha tenido altibajos a lo largo de su historia debido a que diversos factores han influenciado este fenómeno. Sin embargo, el mercado internacional aun sigue vigente debido a las características que presenta esta fibra, con lo cual compite con otros tipos de fibras vegetales.

Se estima que del 10 % de la producción se obtienen los productos semielaborados tales como sacos, cepillos para limpieza en el hogar, cordeles, brochas, bajoalfombras, estropajos, escobetas, etc. cuyo destino es el mercado nacional.

Por sus características físico-químicas la lechuguilla es objeto de demanda y de consumo en todos los continentes, compitiendo favorablemente con otras fibras como la arenga, palmito, coco y piasaba provenientes de Costa de Marfil, India, Sri Lanka y Sierra Leona respectivamente (Sánchez 1991).

En el continente americano son nueve los países que llegan a comprar hasta el 44 % del total exportado, entre los que se encuentran Argentina, Brasil, Chile y Uruguay. En Europa se exporta a Alemania, Bélgica, España, Finlandia, Francia, Holanda, Inglaterra, Italia, Rusia y Suecia. En Africa y Oceanía destacan Sudáfrica, Marruecos, y Australia mientras que en Asia están Japón e India.

Según De la Garza (1985) citado por Sánchez (1991) los carés representan el volumen total de explotación entre el 50 y 57 %; el porcentaje de las colas naturales oscila entre el 43 y 50 %.

Existen una gran diversidad de productos elaborados a partir de la fibra y el bagazo de la planta de lechuguilla, debido a las distintas propiedades que tiene y que la hacen competitiva con respecto a otro tipo de fibras.

**ARTESANALMENTE:** La fibra es transformada en diversos artículos de uso tradicional tales como cables y cordeles, estropajos, costalería, adornos, morrales, ceñidores, redes de pesca, tapetes y otros.

Ancestralmente el bagazo era usado para extraer shampoo en forma rudimentaria, además de que ya seco se usaba para la limpieza de ropa y utensilios de cocina.



Fig. 10.- Productos artesanales de fibra de lechuguilla

**INDUSTRIALMENTE:** La fibra se utiliza para fabricar cepillos, brochas, pinceles, costales y arpillería, fieltro vulcanizado, relleno en muebles y asientos de automóvil, tapetes y alfombras y filtros para automóvil, entre otros. Al mezclarse con fibras sintéticas y resinas se usa en la fabricación de puertas, techos, paredes, láminas, estantería y mobiliario.

Del bagazo(guishe) se ha detectado la presencia de sapogeninas al hacer análisis químicos, ante lo cual existe la elaboración de shampoo y jabones por algunas microempresas.



Fig. 11.- Fibra terminada lista para exportación

## 2.5.- PRUEBAS Y EVALUACIÓN EN EQUIPOS AGRÍCOLAS

La mecanización agrícola es definida como “ La sustitución de los trabajos agrícolas realizados por el hombre, por medio de maquinas”. El grado de mecanización de los países es variable de acuerdo a su desarrollo económico. Millones de agricultores en el mundo trabajan bajo niveles de subsistencia alimenticia debido al limitado acceso a la tecnología impidiéndoles aumentar la producción y como consecuencia de ello se ven imposibilitados para poder mejorar su nivel de vida.

Una innovación en el proceso de mecanización agrícola es aceptada siempre y cuando solucione un problema planteado en un sistema productivo, sin embargo, para que se tenga éxito es necesario tomar en cuenta además de los aspectos técnicos, las condiciones sociales y económicas que prevalecen.

Sin embargo la introducción de maquinas agrícolas lleva todo un proceso implícito en donde se conjugan distintos factores de los cuales dependerá el éxito o fracaso de dicho proceso. Uno de esos factores es la “**prueba y evaluación**” de los equipos que serán utilizados posteriormente por los productores en una región determinada.

Según Johnson (1985) citado por Smith (1994) El término prueba es normalmente usado en conexión con un análisis del comportamiento de una maquina comparado con estándares bien definidos bajo condiciones ideales y repetibles.

En contraste, “evaluación” es la medición del rendimiento de la máquina bajo las condiciones reales de la granja. El propósito principal del comportamiento de un equipo es compararlo con el requerimiento para el cual fue diseñado (Crossley and Kilgour, 1983 ; citados por Smith, 1994).

En la práctica, la gran mayoría de los procedimientos para equipos agrícolas incluyen una parte realizada bajo condiciones ideales y controlables (pruebas), y una parte realizada en condiciones reales de la agricultura (evaluaciones, evaluación técnica de equipos).

Coronel et al. 1999, menciona que “ una prueba de campo es una evaluación que se realiza en condiciones reales de trabajo” mientras que una prueba funcional, “es aquella prueba en donde se realizan las regulaciones necesarias a la máquina, se determina su régimen de trabajo y se comprueba el cumplimiento de su proceso tecnológico”.

Para lograr la eficiencia de un equipo, es necesario realizar tanto la evaluación de campo como la evaluación funcional y así poder determinar las modificaciones que deben de realizarse, y el régimen de trabajo adecuado; obteniendo los mejores resultados.

Existen metodologías de prueba ya establecidas e incluso estandarizadas para aplicarse en maquinas agrícolas, sin embargo, aun hay algunos equipos agrícolas en donde no existen los procedimientos de prueba y evaluación siendo necesario implementarlos y llevarlos a cabo con la finalidad de tener parámetros reales que nos indiquen en que medida se cumple la función para la que fueron fabricados, y mas aun, que nos permitan mejorar el proceso, modificando el diseño original y proponiendo alternativas para alcanzar esa eficiencia máxima que tanto se busca al diseñar nuevas maquinas.

### 3.-OBJETIVOS.

#### - OBJETIVOS POLITICOS.

Proponer alternativas de explotación racional y tecnificada para especies vegetales nativas de las zonas áridas y semiáridas.

#### - OBJETIVOS ECONOMICOS.

Promover el aprovechamiento de especies vegetales naturales susceptibles de exportación.

Eficiantar al máximo la tecnología que existe en el proceso mecanizado de extracción de fibra de lechuguilla en el Valle del Mezquital.

Reducir los costos de extracción de fibra proponiendo una máquina sencilla, eficiente y cuyo costo de adquisición sea accesible a los productores.

#### - OBJETIVOS CIENTIFICOS.

Comparar la calidad de fibra obtenida al despulpar manualmente y mecánicamente.

Identificar las deficiencias de la máquina y hacer las modificaciones correspondientes.

Obtener fibra de lechuguilla con calidad equivalente a la fibra tallada a mano y en cantidad suficiente para hacer de este proceso una actividad remunerable y sostenible.

#### - OBJETIVOS PARTICULARES.

Realizar la evaluación funcional de una máquina desfibradora de lechuguilla comparando la calidad de fibra obtenida con ambos procesos.

Modificar y/o proponer un prototipo para desfibrar lechuguilla mecánicamente, a bajo costo y con calidad equiparable a la del proceso tradicional.

#### 4.- HIPOTESIS.

- a).- La máquina desfibadora de lechuguilla, desperdicia fibra procesada en grandes cantidades.
  
- b).- La fibra obtenida tiene menor resistencia a la tensión, mayor daño mecánico y la limpieza es deficiente al contener gran cantidad de residuos cambiando la coloración de la misma.
  
- c).- La calidad de fibra obtenida mediante el método mecánico de procesamiento, se puede obtener en calidad equivalente a la del proceso manual.
  
- d).- Es factible mejorar el proceso de limpieza mecánica de la fibra.
  
- e).- Es posible obtener fibra de lechuguilla con una calidad equivalente a la fibra tallada a mano.
  
- f).- Modificando el diseño de la maquina desfibadora se puede obtener fibra de buena calidad.

## 5.- DESCRIPCION DE LOS PROCESOS EVALUADOS.

### 5.1.- DESFIBRADO MANUAL.

Las herramientas utilizadas en este proceso son: un mazo de madera de 0.4 a 0.6 kg de peso con dimensiones variables, un cuchillo romo (puntiagudo) de 45 a 50 cm de longitud, por 3.5 cm de ancho y 0.3 a 0.5 mm de grosor; con un peso que oscila entre 0.3 a 0.4 kg y un banco o base de madera.

En este proceso, primeramente se machaca la base de las hojas con el mazo dando de 20 a 40 golpes debido a que esta parte es la mas gruesa, una vez macerada, se coloca la hoja sobre el banco de madera, y sobre esta se coloca el cuchillo, el cual esta insertado por la parte de la punta en una parte fija o empotrada al suelo (por lo regular un tronco de madera). Sosteniendo a la hoja con una mano por la parte de la punta, se talla la parte machacada con movimientos repetitivos, raspando continuamente en tramos de 2 a 15 cm aproximadamente hasta limpiarla por completo. Se enrolla la fibra limpia en un trozo de madera cilíndrico y colocando la punta de la penca en el banco se despulpa por completo la parte restante tirando de el otro extremo y presionando el cuchillo contra el banco de madera. Una vez terminado el desfibrado, se pone a secar al sol la fibra.

MACERADO DE LA BASE DE LA HOJA



RASPADO DE LA BASE



INVERSION DE LA PENCA



RASPADO DE LA PUNTA



SECADO

Fig.12 .- Diagrama de flujo del proceso de desfibrado manual



a).- Machacado de la penca.



b).- Descarne

Fig. 13 .- Desfibrado manual de *Agave lecheguilla*

## 5.2.- DESFIBRADO MECANICO.

El desfibrado mecánico se realiza por medio de una máquina talladora cuyo principio se basa en el peinado de las hojas por medio de un tambor provisto de clavos periféricos, el cual es accionado con un motor eléctrico o de gasolina

Este proceso comienza seleccionando las pencas en grupos de dos a tres de acuerdo a su tamaño, se van introduciendo por la ranura de alimentación de la máquina, sujetándolas por la punta e insertando la base de las pencas para que sea desfibrada primero. De acuerdo a la experiencia del productor el tiempo que permanece la fibra peinándose, lo determina el mismo; se sacan las hojas, se enrolla la parte limpia en un trozo de madera cilíndrico y se introducen ahora las puntas por la ranura de alimentación. Una vez limpia la fibra, se pone a secar al sol.

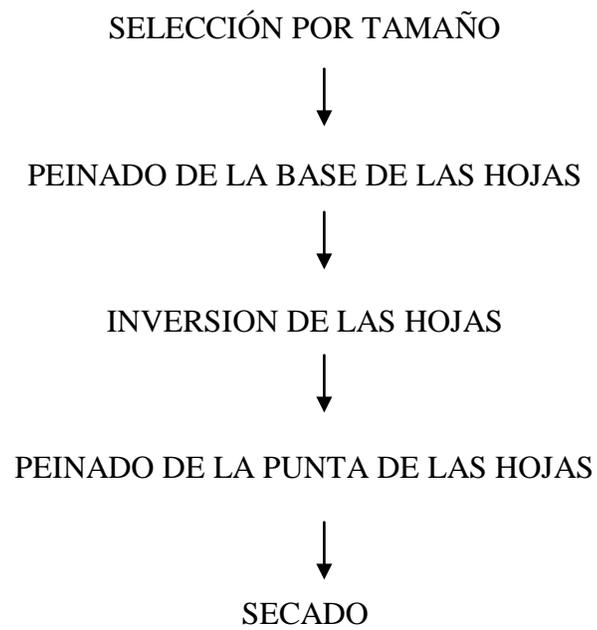


Fig. No.14.- Diagrama de flujo del proceso mecánico



Fig. 15 .- Desfibrado mecánico de hojas de lechuguilla en el Valle del Mezquital

## 6.- MATERIAL Y METODOS.

La realización del trabajo de campo se dividió en tres etapas con la finalidad de poder cubrir con la mayor efectividad la toma de datos y el cálculo de algunos parámetros.

Se buscaron fabricantes y/o distribuidores de máquinas utilizadas para este fin encontrando respuesta en el Centro Social de Cardonal, ubicado en el Municipio de Cardonal en el Estado de Hidalgo. Este centro, es un taller dedicado a la fabricación y venta de implementos y maquinaria agrícola. Asimismo, se contacto con uno de los productores de fibra de lechuguilla quien realizó el tallado tanto mecánico como manual de la fibra.

La primera etapa correspondió a la evaluación funcional, en donde se comparó el procesamiento mecánico vs procesamiento manual, determinando distintas variables que sirvieron para determinar el correcto o deficiente funcionamiento de la máquina y en que grado es mejor o peor el trabajo realizado con respecto al trabajo manual

En la segunda etapa, se comparó la calidad de fibra obtenida en ambos procesos, con la finalidad de poder determinar las deficiencias que presentaba la máquina de acuerdo a los resultados obtenidos en cada uno de los parámetros de evaluación propuestos.

Por ultimo, en la tercera etapa, se hizo el análisis cinemático de la máquina y de acuerdo a los resultados obtenidos en las dos etapas anteriores, se realizaron los cálculos y modificaciones necesarias a los mecanismos con la finalidad de obtener la fibra con calidad y características similares al proceso manual.

### 6.1-MATERIALES UTILIZADOS

Para realizar las determinaciones tanto en campo como en laboratorio se emplearon los siguientes materiales e instrumentos de medición.

- Balanza granataria marca Ohaus con precisión de 0.1 g.
- Balanza analítica marca Sartorius con precisión de 0.001 g.
- Regla metálica graduada de 60 cm.
- Vernier metálico marca Zeus.
- Cronometro digital marca Casio con precisión de 0.01 seg.
- Microscopio marca Kyowa
- Maquina para determinación de esfuerzos marca Instron modelo 1145.
- Cuchillo romo y base de madera para tallar manualmente.
- Mazo de madera para macerar pencas de lechuguilla.
- Máquina talladora de lechuguilla “Cardoma”.
- Bolsas de plástico transparentes de 2 kg.
- Etiquetas.
- Marcadores de tinta indeleble.
- Cinta masquingtape de 2.5 cm.

## 6.2.- DISEÑO ESTADISTICO.

Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar, considerando a cada uno de los dos métodos de desfibrado o despulpado como tratamientos y diferenciando los bloques de acuerdo a la longitud de las pencas. Se usó un tamaño de muestra de 25 pencas por tratamiento ( 5 pencas por bloque ), se diferencio el material en bloques para facilitar el experimento, cabe mencionar que el productor separa el material de acuerdo a la longitud antes de procesarlo.

### TRATAMIENTOS

Proceso tradicional (manual) ----- PT  
Proceso mecanizado ----- PM

### BLOQUES

Longitud de la penca de 35 a 40 centímetros	BLOQUE A
Longitud de la penca de 40 a 45 centímetros	BLOQUE B
Longitud de la penca de 45 a 50 centímetros	BLOQUE C
Longitud de la penca de 50 a 55 centímetros	BLOQUE D
Longitud de la penca de 55 a 60 centímetros	BLOQUE E

## 6.3.- SELECCION DE LAS MUESTRAS.

Se seleccionaron 80 pencas para cada tratamiento, de un total aproximado de 2500 previamente cortadas las cuales el productor considero óptimas para procesarse en base a sus características físicas (tamaño, consistencia y daño físico). Al momento de la selección se tuvo el cuidado necesario para que no existiera daño mecánico y daño biológico, además de obtener la mayor variabilidad posible en el tamaño de las mismas.

Una vez obtenidas se determinó la longitud midiéndolas desde la punta de la espina terminal hasta la base en su parte media, agrupándose en los distintos bloques previamente establecidos. En cada bloque se hizo una segunda selección de 5 pencas bajo los criterios anteriores obteniendo un total de 25 por tratamiento.

## 6.4.- EVALUACION FUNCIONAL

Después de clasificar el material, se marcaron con tinta indeleble escribiendo el número de penca y bloque correspondiente, se midieron distintas variables antes, durante y después del desfibrado tanto manual como mecánicamente. Las mediciones se hicieron en ambos procesos, ya que debido a que no se encontró referencia sobre alguna metodología de evaluación en estas máquinas. Algunas variables calculadas se basaron en el proceso manual que es considerado con optimas características de fibra por la industria.

### 6.4.1.- MEDICIONES PREVIAS AL PROCESO.

**LARGO TOTAL, (cm).** Para poder clasificar el material de acuerdo a su longitud, se midió cada penca desde la punta de la espina terminal hasta la parte media de la base.

**ANCHO DE LA BASE, (cm).** Con un vernier se midió el ancho máximo que presentaba cada penca. Esta característica física sirvió para el dimensionamiento del sistema de alimentación (de material a procesarse) de la máquina.

**GROSOR MAXIMO, (cm).** Localizando la parte mas gruesa de la penca se procedió a medirla con un vernier. Esta variable al igual que la anterior fue de utilidad para determinar las dimensiones del sistema de alimentación.

**MASA TOTAL, (kg).** Con el fin de poder comparar la productividad de ambos procesos, se pesaron las pencas en una balanza granataria.

### 6.4.2.- PROCESO DE DESFIBRADO.

El desfibrado manual se realizó con los instrumentos tradicionales empleados por los productores (cuchillo romo, banco y mazo de madera). Se colocó una cubierta de plástico debajo del banco de madera para recolectar por completo el residuo de cada penca, el productor desfibraba una a una las pencas y una vez terminado el proceso, éste se colocó en bolsas previamente etiquetadas. La fibra a su vez también se etiqueto para poderla diferenciar y se embolso con la finalidad de que hubiese la menor perdida de humedad en ambos (fibra y residuo).

En el caso del desfibrado mecánico, también se colocó una cubierta plástica en la tolva de descarga del residuo, se desfibró una a una cada penca, se apagaba la máquina y se procedía a

recolectar el residuo por completo tanto de la tolva como del tambor giratorio auxiliándose de una brocha de cerda dura. Tanto el residuo como la fibra se embolsaron para evitar la pérdida de humedad y se etiquetaron.

TIEMPO DE DESFIBRADO, (s): Se cronometra el tiempo de desfibrado para poder comparar la productividad de ambos procesos.

#### 6.4.3.- MEDICIONES POSTERIORES AL PROCESO.

##### a) DETERMINACIONES EN HUMEDO.

Después de realizar el desfibrado en cada tratamiento, se procedió a tomar los datos de las determinaciones en húmedo con la finalidad de evitar al máximo la pérdida de humedad.

MASA TOTAL DE LA FIBRA, (gr). Se pesaron cada una de las muestras de fibra obtenidas por penca, para poder determinar la cantidad de material obtenido en verde.

MASA TOTAL DEL RESIDUO, (gr). Para poder conocer el porcentaje de material despulpado en ambos procesos en cada penca, se pesaron cada una de las bolsas que contenían el residuo de las pencas desfibradas.

##### b) DETERMINACIONES EN SECO.

Una vez hechas las determinaciones en húmedo, el material se sacó de las bolsas y se expuso a los rayos del sol durante tres días, se volvió a embolsar y se hicieron las determinaciones en seco.

MASA TOTAL DE LA FIBRA, (gr). Nuevamente se pesaron las muestras de fibra con la finalidad de conocer la cantidad de fibra obtenida para estimar productividad.

MASA TOTAL DEL RESIDUO, (gr). Se pesaron en la balanza granataria las bolsas con residuo seco para estimar el peso seco del bagazo por penca y por volumen de fibra producida.

#### 6.4.4.- VARIABLES CALCULADAS.

CAPACIDAD DE TRABAJO, ( kg / h ). Aprovechando la clasificación del material de acuerdo al tamaño mínimo y máximo de pencas, el cual esta relacionado con su peso, se determinó el rango máximo y mínimo correspondiente a la capacidad teórica de trabajo tanto de la máquina como del proceso manual, con la siguiente fórmula:

$$Ct = \frac{Pm}{T} \quad (1)$$

Donde:

Ct.: capacidad de trabajo kg/h.

Pm: peso del material procesado, kg.

T: tiempo de trabajo, h.

PORCENTAJE DE DESPULPADO O DESCARNE, ( % ). Esta variable se calculó para conocer la efectividad del órgano encargado de separar el bagazo de la fibra.

Tomando en cuenta el peso del material procesado, y el peso del residuo, se obtuvo el porcentaje de descarne con la siguiente ecuación:

$$D = \frac{Pr}{Pt} .100 \quad (2)$$

Donde:

D: despulpado o descarne, %.

Pr: peso del residuo, kg.

Pt: peso total del material verde, kg.

EFICIENCIA MECANICA DE LIMPIEZA, ( % ). Este parámetro se propuso para el proceso mecánico y se calculó tomando como referencia al material obtenido manualmente debido a que cuando se quiso limpiar la fibra procesada con la máquina, se tuvieron dificultades ya que el bagazo secaba muy pronto y se adhería a la fibra.

Asumiendo una mínima variabilidad del material, por ser de una misma población, primero se calculó la cantidad de fibra obtenida por tonelada de material procesado tanto manual como mecánicamente.

Posteriormente se calculó la eficiencia de limpieza de la máquina con la siguiente ecuación:

$$\mathcal{E} = \frac{F_e}{F_o} \cdot 100 \quad (3)$$

Donde:

$\mathcal{E}$  : eficiencia de limpieza, %.

$F_e$ : cantidad de fibra estimada (fibra tallada manualmente), kg/t.

$F_o$ : cantidad de fibra obtenida (fibra tallada mecánicamente), kg/t.

REQUERIMIENTOS DE POTENCIA, ( kW/t). La potencia requerida por la máquina se obtuvo directamente de un wattmetro conectado a la línea eléctrica que alimentaba el motor, haciendo la conversión de unidades para poder expresar la potencia en función del volumen de material en verde (pencas) procesadas.

REQUERIMIENTOS DE MANO DE OBRA, (horas hombre/t). Tomando en cuenta el volumen procesado y el tiempo requerido, se obtuvo la necesidad de mano de obra de acuerdo al número de personas que participaban directamente en el proceso.

$$M_o = \frac{N_p \cdot h_t}{F_o} \quad (4)$$

Donde:

$M_o$  : Cantidad de Mano de Obra requerida, (horas hombre / t).

$N_p$  : Número de personas que participan en el proceso.

$h_t$  : Horas hombre trabajadas, ( h ).

$F_o$  : Fibra obtenida, ( t ).

## 6.5.- CALIDAD DE FIBRA.

Se realizó una comparación de la calidad de fibra obtenida tanto manual como mecánicamente, con el objetivo de analizar las diferencias que presentaba el material al evaluar cada uno de los parámetros propuestos para este fin y poder determinar las deficiencias que presentaba la máquina o el proceso, de acuerdo a los resultados.

Al no encontrar procedimiento alguno de evaluación de calidad de fibra y ante la negativa de las empresas acaparadoras de fibra de lechuguilla para proporcionar los estándares de calidad utilizados en el mercado, se tomaron como referencia las propiedades físicas y mecánicas .

De acuerdo al trabajo realizado por Cazaurang M. et al. (1990) “las propiedades físicas y mecánicas de las fibras son uniformes en la sección media” asimismo menciona que “la morfología de la fibra de henequén, es similar a la de otras fibras duras naturales como el sisal, jute, abacá, etc.”

Castro y Naaman citados por Cazaurang M. et al (1990) menciona que el área de la sección transversal en la parte media de la fibra de maguey permanece constante.

Basándonos en el trabajo antes mencionado, se asumió un comportamiento similar en la planta de Agave lechuguilla al ser un miembro incluido en la misma familia de las agaváceas, es decir; las propiedades físico-mecánicas de la fibra de lechuguilla tienen un comportamiento uniforme en la sección media.

Por último, al realizar algunas determinaciones se eliminaba la punta y la cola del filamento en 5 cm de longitud ( 2 pulgadas ) que es el máximo corte que realiza la industria para poder dar un acabado de calidad al producto de exportación.

### 6.5.1.- VARIABLES CALCULADAS.

DENSIDAD LINEAL O FINEZA, ( Decitex ). Se tomaron 25 muestras (filamentos) al azar de ambos tratamientos, se eliminaron las colas y las puntas de la fibra, hasta una distancia de 5 cm, se determinaron las longitudes con una regla graduada y el peso de cada muestra con una balanza analítica marca Sartorius con precisión de 0.001 g.

El cálculo de la densidad lineal de la fibra se hizo con la siguiente expresión.

$$D = \frac{9000.P}{L} \quad (5)$$

Donde:

D: Densidad lineal, Decitex.

P: Peso de la muestra, gr.

L: Longitud de la muestra, m.

RESISTENCIA A LA TENSION, ( N ). Se eligieron 25 muestras (filamentos) al azar de cada tratamiento y se midieron segmentos de 12 cm de longitud en la parte media, se montaron en la máquina de esfuerzos previamente calibrada a una velocidad de 50 mm/min. La prueba se realizó a una temperatura de 25 ° C y con una humedad relativa del 67 % determinando la carga máxima soportada por la fibra.

ELONGACION MAXIMA, ( % ). Se eligieron 25 muestras (filamentos) al azar de cada tratamiento, midiendo tramos de 12 centímetros de longitud en la parte media. Se montaron en la máquina de esfuerzos previamente calibrada a una velocidad de 50 mm/min. La prueba se realizó a una temperatura de 25 ° C y con una humedad relativa del 67 % , registrando el desplazamiento máximo del filamento en el punto de ruptura al aplicar una carga constante.

La elongación máxima que presentaron las fibras en el punto de ruptura, se calculó con la siguiente ecuación:

$$E = \frac{Dmax.}{Li} .100 \quad ( 6 )$$

Donde:

E: Elongación máxima de la fibra, %.

Dmax: Desplazamiento máximo, mm.

Li: Longitud inicial de la fibra, mm.



a) máquina de esfuerzos instron



b) montaje de las muestras

Fig. 16 .- Determinación de la elongación máxima y resistencia a la tensión en fibras de lechuguilla.

DAÑO MECANICO. Para evaluar el daño mecánico, se tomaron 25 muestras (filamentos) al azar eliminando las puntas y las colas a una distancia de 5 cm. Se marcaron segmentos de 5 cm a lo largo de cada una, se montaron en un microscopio estereoscópico con un aumento de 2X y se cuantificó el número de microfibrillas que estaban rotas en la periferia del haz (filamento de fibra).

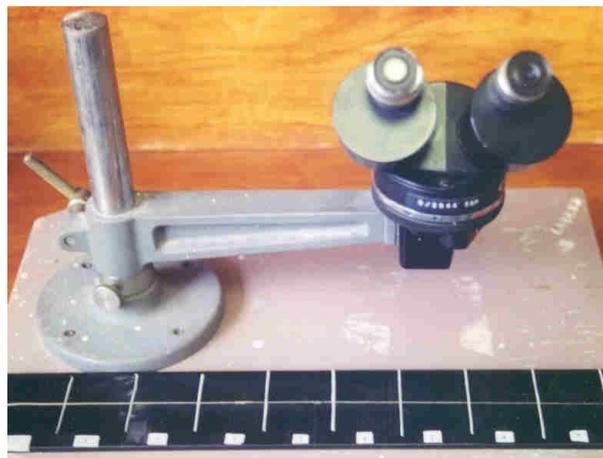


Fig.17.- Determinación del daño mecánico en la fibra

COLORACION. Para determinar la calidad en la coloración de la fibra, se tomaron una a una las pencas procesadas y se observó del total de fibra, el porcentaje que presentaba manchas y/o una tonalidad distinta a un color blanco-amarillento homogéneo, clasificándose de la siguiente manera:

- 1.- fibra con menos del 5 % del total que presenta manchado por bagazo o distinta coloración.
- 2.- fibra con menos del 10% del total que presenta manchado por bagazo o distinta coloración.
- 3.- fibra con menos del 25 % del total que presenta manchado por bagazo o distinta coloración.
- 4.- fibra con más del 25% del total que presenta manchado por bagazo o distinta coloración.

#### 6.5.2.- ANALISIS ESTADISTICO.

El análisis estadístico que se llevó a cabo fue solamente para comparar la calidad de fibra en ambos procesos. Al tener dos tratamientos por evaluar dentro de una agrupación establecida en rangos de longitudes de penca, se hizo una comparación de medias de las dos poblaciones usando una prueba de Student para muestras apareadas en cada una de las variables calculadas.

## 7.- RESULTADOS.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo se dividieron en tres tipos.

El primer tipo fue para los datos recabados que nos permitieron determinar la evaluación funcional de la máquina.

El segundo tipo de resultados sirvieron para realizar la comparación de la calidad de fibra que se obtiene en los dos procesos evaluados (proceso manual vs proceso mecánico), se llevaron a cabo las actividades necesarias para verificar si en realidad la máquina esta cumpliendo con los requerimientos de calidad que la industria maneja en la compra de fibra de *Agave lecheguilla*.

Cabe mencionar que las características optimas de calidad de fibra, están dadas por el material que es tallado manualmente, por esto las comparaciones se plantearon entre los dos tipos de procesamiento MANUAL vs. MECANICO.

Por ultimo, con las características del equipo y con los resultados obtenidos sobre la evaluación funcional y la calidad de fibra, se realizo el análisis cinemático y se propusieron alternativas para modificar el mecanismo limpiador y algunos otros elementos que a su vez permitirán el aumentar la eficiencia, reducir costos de producción y que la máquina pueda transportarse con mayor facilidad

### 7.1.- EVALUACION FUNCIONAL.

#### 7.1.1.- ESPECIFICACIONES DE LA MAQUINA.

Marca: Cardoma

Modelo: no especificado

No. de serie: s/n

Capacidad de trabajo: no se especifica

Fabricante: Centro Social de Cardonal

Bastidor: fabricado con ángulo metálico de 5 y 3.81 cm.

### DIMENSIONES

Largo máximo: 0.55 m

Ancho máximo: 0.5 m

Altura total: 1.21 m

Peso: 64.6 kg

## FUENTE DE POTENCIA

Tipo: motor eléctrico monofásico de corriente alterna (127-220 V)  
Marca: Siemens  
Modelo: no especificado  
Potencia nominal: 0.746 kW  
Velocidad nominal: 1720-1740 rev/min  
Sistema de transmisión de potencia: por medio de poleas y banda trapezoidal  
Peso: 15 kg

## SISTEMA DE ALIMENTACION

Tipo: proceso discontinuo, alimentación manual por medio de rejilla de seguridad.  
Dimensiones: abertura de rejilla. 0.04 x 0.2 m.  
Altura de alimentación: 1 m  
Tasa de alimentación: no especificada  
Ajustes: ninguno

## SISTEMA DE LIMPIEZA

Tipo: cilindro metálico con clavos periféricos intercambiables  
Diámetro del cilindro: 0.22 m.  
Largo: 0.2 m  
Número de clavos: 181  
Diámetro: 0.006 m  
Longitud: 0.0381 m  
Distancia entre filas: 0.0254 m  
Distancia entre hileras: 0.027 m  
Desfasamiento entre filas: 0.006 m  
Ajustes: ninguno  
Peso: 15.8 kg

## SISTEMA DE DESCARGA

Tipo: descarga por gravedad  
Dimensiones de la tolva: 0.43 x 0.355 m  
Angulo de descarga:  $28.95^{\circ}$   
Altura de descarga: 0.61 m  
Ajustes: ninguno



Fig. 18 .- Máquina desfibradora marca “Cardoma”.

#### 7.1.2.- CAPACIDAD DE TRABAJO

La capacidad de trabajo de la máquina es una función directa de las dimensiones del producto (peso y tamaño). El rango calculado de capacidad de trabajo al sustituir en la ecuación No. ( 1 ), para las pencas pequeñas y grandes procesadas en verde, oscila entre 0.110 y 0.155 t/h.

Suponiendo un trabajo uniforme en el tallado manual, la capacidad de trabajo de hojas verdes sería de 0.00771 a 0.00777 t/h.

El contraste es demasiado alto, por lo que se demuestra la gran necesidad de continuar con el desarrollo tecnológico en la mecanización del proceso de tallado.

#### 7.1.3.- PRODUCCION DE FIBRA.

La capacidad de producción de fibra húmeda y seca es proporcional a la capacidad de trabajo, de ahí que se tenga una gran diferencia entre ambos procesos. La comparación de resultados se da en las Tablas siguientes:

Tabla No. 2.- Producción de fibra procesada mecánicamente

TIPO DE FIBRA	PENCAS DE 35 A 40 cm	PENCAS DE 55 A 60 cm
Fibra húmeda	161 kg/h	155 kg/h
Fibra seca	18 kg/h	15 kg/h

La producción de fibra seca oscila entre los 15 y 18 kg/h dependiendo de las dimensiones del material procesado. La disminución en cantidad de fibra al aumentar el tamaño de penca se debe al mayor tiempo requerido para su limpieza.

Tabla No. 3.- Producción de fibra procesada manualmente

TIPO DE FIBRA	PENCAS DE 35 A 40 cm	PENCAS DE 55 A 60 cm
Fibra húmeda	7.8 kg/h	7.7kg/h
Fibra seca	0.7kg/h	0.7kg/h

El aumento en cantidad de fibra y pencas procesadas de acuerdo a los datos anteriores es muy marcado en el proceso mecánico, sin embargo, la calidad es muy deficiente como se podrá ver mas adelante.

#### 7.1.4.- PORCENTAJE DE DESPULPADO.

Al sustituir datos en la ecuación No. ( 2 ), se observó una gran deficiencia en el órgano de trabajo encargado de separar el bagazo, ya que hay una diferencia del 20 al 30 % de descarte con base al peso del material despulpado como se puede observar en la Tabla No. 4.

Existe una variación en la separación del bagazo de hasta el trece porciento en el proceso mecánico, mientras que en el desfibrado manual el descarte es uniforme, por lo que se merma la calidad de la fibra por contenido de impurezas en diferentes cantidades; esta

variación se debe principalmente a que el tiempo que permanecen las pencas dentro de la máquina no es el mismo por la diferencia en dimensiones ( peso, longitud y grosor ).

Tabla No. 4.- Porcentaje de despulpado manual y mecánico en pencas de lechuguilla.

PROCESAMIENTO	PENCAS DE 35 A 40 cm	PENCAS DE 55 A 60 cm
Manual	78.37 %	79.97 %
Mecánico	46.70 %	59.74 %

#### 7.1.5.- EFICIENCIA DE LIMPIEZA

El calculo de la cantidad de fibra obtenida en ambos procesos se puede comparar en la Tabla No. 5 Estos datos sirvieron para calcular la eficiencia de limpieza .

Tabla No. 5 .- Cantidad de fibra húmeda obtenida por tonelada de material verde procesado.

PROCESAMIENTO	PENCAS DE 35 A 40 cm	PENCAS DE 55 A 60 cm
Manual	154.58 kg/t	156.438 kg/t
Mecánico	368.88 kg/t	295.270 kg/t

Se puede observar que mientras en el proceso manual la variación entre pencas grandes y chicas es de solamente 2 kg lo que apoya una mínima variación en la población muestreada y uniformidad en el proceso; mientras que en el proceso mecánico se deduce que hay un exceso de impurezas adheridas a la fibra, aunado a el procesamiento desuniforme de las pencas.

Sustituyendo en la ecuación No. ( 3 ), la eficiencia máxima y mínima obtenida por la máquina fue de:

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{156.438}{295.270} \cdot 100 = 52.98 \% \qquad \mathcal{E}_{\min} = \frac{154.58}{368.88} \cdot 100 = 41.9 \%$$

De lo anterior se puede determinar que la eficiencia de limpieza en la fibra utilizando la máquina, se encuentra en el rango del 42 al 53 por ciento, con respecto a la fibra tallada a mano, porcentaje demasiado bajo para ofrecer un producto de buena calidad.

#### 7.1.6.- REQUERIMIENTO DE POTENCIA, ( kW / t ).

La potencia requerida por la máquina estuvo entre los 4.53 y 3.23 kW / t de material verde procesado.

#### 7.1.7.- REQUERIMIENTO DE MANO DE OBRA.

En el requerimiento de mano de obra para poder obtener la productividad calculada, es de tres personas en el proceso mecánico. Una persona se encarga de seleccionar las pencas de acuerdo al tamaño en grupos de tres, otra persona opera la máquina desfibrando las pencas seleccionadas; un tercero recibe los manojos de fibra clasificándolos de acuerdo a su tamaño y colocándolos en hileras al sol para que pierdan la humedad.

En el proceso manual únicamente se requiere del tallador quien al terminar el descarte de pencas, coloca al sol toda la fibra procesada.

Sustituyendo datos en la ecuación No. ( 4 ) se tiene que con la máquina se necesitan 509 horas hombre para poder obtener una tonelada de fibra seca, mientras que tallando a mano se requiere de 1429 horas hombre para obtener la misma cantidad de fibra.

El requerimiento aumenta casi en un 200 % cifra demasiado alta considerando la escasa mano de obra dedicada a esta actividad.

## 7.2.- CALIDAD DE FIBRA.

### 7.2.1.- DENSIDAD LINEAL , ( Decitex ).

Al sustituir datos en la ecuación No. 4 y realizar la prueba de medias, se encontró una diferencia significativa con  $\alpha = 0.05$  lo que demuestra que la fibra tallada con la máquina presenta una mayor densidad lineal. Interpretando este resultado se puede decir que la fibra es mas burda, dada la gran cantidad de residuo que se encuentra adherido.

Asimismo, se observa que el trabajo con la máquina no es homogéneo al presentarse una mayor desviación estándar, este resultado muestra la variación en contenido de impurezas en la fibra por la diferencia de tiempo de limpieza de acuerdo a las dimensiones de las hojas y a la experiencia del productor operando la maquina.

Tabla No. 6 .- Comparación de fineza en fibra de lechuguilla

TRATAMIENTO	DENSIDAD LINEAL (decitex)	
	Media	Desviación estándar
Manual	949.53	277.49
Mecánico	1352.54	453.95

### 7.2.2.- RESISTENCIA A LA TENSION, ( N ).

El análisis estadístico, reveló que no existen diferencias significativas en la comparación de medias de ambos tratamientos, con  $\alpha = 0.05$  lo cual demuestra que el órgano de trabajo, no modifica la resistencia a la tensión del material procesado.

Este resultado se relaciona con el daño mecánico, al tener las puntas de los clavos un diámetro mayor al diámetro de los haces de filamentos ( fibras ) al contacto entre punta-fibra no hay penetración y como consecuencia desgarramiento. El daño mecánico en el proceso se reduce a la periferia de la fibra, manteniendo básicamente el mismo diámetro de fibra.

Tabla No. 7 .- Comparación de la carga máxima soportada en fibras de lechuguilla

TRATAMIENTO	CARGA MAXIMA , (N)	
	Media	Desviación estándar
Manual	18.91	6.79
Mecánico	21.04	8.14

#### 7.2.3.- ELONGACION MAXIMA ( % ).

Sustituyendo datos en la ecuación No. 5 y comparando por medio de una prueba de medias, se demuestra que no hay diferencias significativas en ambos tratamientos con  $\alpha = 0.05$  esto es; el tambor con clavos, no infiere en la elasticidad del material desfibrado.

Tabla No. 8 .- Elongación a la ruptura en fibras de lechuguilla

TRATAMIENTO	ELONGACION A LA RUPTURA, (%)	
	Media	Desviación estándar
Manual	6.42	1.744
Mecánico	7.17	3.21

#### 7.2.4.- DAÑO MECANICO.

Al comparar las medias de los tratamientos, se observó que no hay diferencias significativas en ambos tratamientos con  $\alpha = 0.05$  lo cual se contrapone con la idea aceptada hasta hoy de que el proceso mecánico causa demasiado daño en la fibra, la hipótesis es que las puntas de los clavos tienen un diámetro mayor al diámetro máximo de la fibra y si llegasen a coincidir ambos durante el tallado, solamente habrá un deslizamiento clavo-fibra evitando el desgarramiento de los microfilamentos que componen las fibras.

Tabla No. 9 .- Comparación del daño mecánico observado en fibras de lechuguilla

TRATAMIENTO	DAÑO MECANICO (No. de microfibrillas rotas por cada 5 cm de longitud de fibra)	
	Media	Desviación estándar
Manual	0.4467	0.3846
Mecánico	0.7117	0.4754

#### 7.2.5.- COLORACION.

Al realizar la prueba de medias, se encontraron diferencias significativas con  $\alpha = 0.05$  evidenciando la mala calidad que presenta la fibra tallada con la máquina, debido a la deficiente separación tanto del bagazo, como del jugo de la penca, esta característica es principalmente la causante del bajo precio de venta que se paga por la fibra tallada con máquinas.

#### 7.3.- DETERMINACION DE PROPIEDADES FISICO-MECANICAS ADICIONALES EN LA PLANTA DE LECHUGUILLA.

En la mayoría de las ramas que constituyen la producción agrícola, la mecanización se ha ido generalizando cada vez más, sin embargo; ésta tiene implicaciones indeseables en varias situaciones. Pueden ocurrir grandes pérdidas en la cosecha, los productos podrían dañarse durante las operaciones mecanizadas; ante lo cual la calidad se reduce repercutiendo en una pérdida de valor.

La reducción de pérdidas debido a los daños y la preservación de la calidad solo es posible tomando en cuenta las leyes, principios y propiedades relevantes en los productos agrícolas. El conocimiento de dichas propiedades nos permite el diseño de máquinas más modernas así como de procesos tecnológicos con características de calidad perfeccionadas incluyendo pérdidas mucho menores y operaciones más eficientes.

Dentro de la fase del diseño de equipo agrícola, existen algunas propiedades intrínsecamente ligadas al material biológico que se procesa, las cuales influyen en el cálculo de los mecanismos y herramientas que constituirán a la máquina y que en la mayoría de las veces se hace necesaria su determinación al carecer de referencias en trabajos anteriores relacionados con el tema.

### 7.3.1.- DENSIDAD DE LAS HOJAS, (kg/m<sup>3</sup>).

La densidad de un cuerpo está dada por la masa que éste presenta por unidad de volumen en el mismo.

Se seleccionaron 25 pencas las cuales se pesaron en una balanza. Se introdujeron en un recipiente graduado conteniendo agua y se observó el volumen desplazado por cada muestra. La densidad se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (7)$$

donde:

$\rho$ : Densidad, kg/m<sup>3</sup>.

m: Masa de la muestra, kg.

v: Volumen de la muestra (volumen desplazado), m<sup>3</sup>.

Los resultados arrojaron una densidad promedio de 1 051.09 kg/m<sup>3</sup>.

### 7.3.2.- ANGULO DE REPOSO, (grados).

Se denomina así al ángulo comprendido entre la línea horizontal a la superficie terrestre y el plano inclinado de la superficie que soporta al material que se está evaluando; en el momento en que este comienza a deslizarse, (fig.19). La determinación del ángulo de reposo se llevó a cabo sobre una superficie de lámina metálica sin pintar, debido a que tanto en la tolva de descarga, como en los clavos; la pintura se elimina por la abrasión que provoca el contacto bagazo-metal.

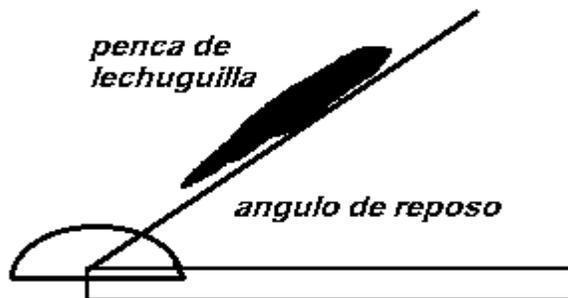


Fig. 19 .- Determinación del ángulo de reposo.

Para obtener el ángulo de reposo o de fricción, se hicieron 25 determinaciones tanto para pencas como para fibra seca obteniendo la media en cada caso.

Angulo de reposo de las pencas de lechuguilla:  $\varphi = 22.28^{\circ}$

Angulo de reposo de la fibra seca de lechuguilla:  $\varphi = 32.82^{\circ}$

### 7.3.3.- COEFICIENTE DE FRICCIÓN.

La determinación del coeficiente de fricción estático y dinámico se llevo a cabo tomando en cuenta el ángulo de reposo obtenido con anterioridad.

La relación entre el ángulo de reposo y el coeficiente de fricción se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\mu = \tan \varphi \quad (8)$$

donde:

$\mu$ : Coeficiente de fricción.

$\varphi$ : Angulo de reposo del material, grados.

Dentro de la gama de velocidades practicas de deslizamiento, los coeficientes de fricción dinámica son ligeramente menores que los coeficientes de fricción estática, mas aun; con velocidades pequeñas de deslizamiento y superficies muy limpias estos dos coeficientes no difieren mucho entre si (Baumeister 1990)

Para efectos prácticos, el cálculo del coeficiente de fricción dinámico se obtuvo de la siguiente manera.

$$\mu_d = 0.8\mu. \quad (9)$$

donde:

$\mu_d$ : Coeficiente de fricción dinámico.

$\mu$ : Coeficiente de fricción estático.

Tabla No. 10 .- Coeficientes de fricción de fibra y hojas de lechuguilla.

MATERIAL	$\varphi$	$\mu$	$\mu_d$
hojas	22.28	0.4203	0.3362
fibra	32.82	0.6449	0.5159

#### 7.3.4.- RESISTENCIA A LA TENSION Y PORCENTAJE DE ELONGACION EN LA FIBRA.

Durante la realización de los distintos procesos llevados a cabo por máquinas agrícolas, los materiales biológicos son sometidos a cargas de esfuerzo-deformación. Infinidad de veces es necesario conocer la fuerza que pueden soportar hasta la cedencia del material, así como la elasticidad que se presenta durante el proceso para poder calcular y/o diseñar mecanismos en máquinas agrícolas.

Investigaciones llevadas a cabo por Nutman ( Lock 1969 ) mostraron que la fibra de sisal es dúctil y que esta puede alargarse permanentemente mostrando claramente un comportamiento concordante con las leyes de Hooke, esto es; la tensión es proporcional a la deformación. Era de esperarse que las fibras de lechuguilla durante las pruebas realizadas, tuvieran un comportamiento similar al sisal por tratarse de un ejemplar de la misma familia como lo muestran los resultados (fig. 20).

El cálculo de esta propiedad se llevo a cabo en 30 fibras humedecidas durante 24 horas a una temperatura entre los 14 y 20 grados centígrados. Las muestras se montaron en la máquina de esfuerzos calibrada a una velocidad de 50 mm/min

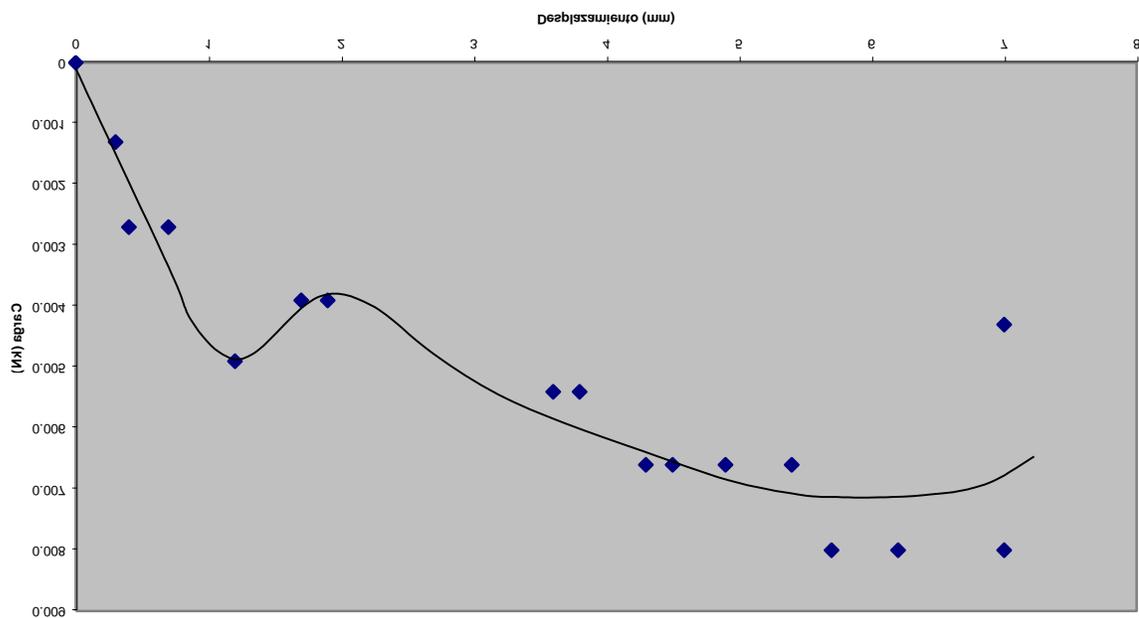


Fig.20.- Curva Esfuerzo-Deformación en fibras de lechuguilla

Tabla No. 11 .- Valores promedio de elasticidad y resistencia a tensión en fibras húmedas de Agave lechuguilla.

	CARGA, (N).	ELONGACION,(mm)	ELONGACION,(%)
MEDIA	12.1	10.8	9.0
DESVIACION STD.	5.7	4.5	3.7

## 7.4.- MODIFICACIONES A LA MAQUINA.

### 7.4.1.- ANALISIS CINEMATICO.

Como ya se mencionó anteriormente, la única deficiencia que se detectó en la máquina con base en los resultados fue la limpieza de las fibras; pues las demás características y propiedades físico-mecánicas de la fibra no sufrieron cambios.

De acuerdo a el alcance planteado en esta investigación; y a la determinación de los distintos parámetros tanto en la evaluación, como en el diseño, el énfasis se enfocará en modificar la herramienta encargada de la limpieza de la fibra y a eficientar al máximo el trabajo realizado por la máquina.

La modelación de fuerzas que actúan en el tambor limpiador se presentan en la Figura No. 21.

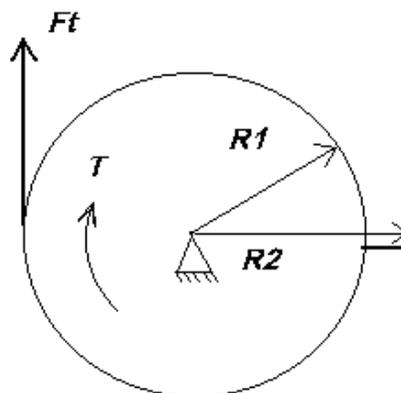


Fig. No. 21.- Modelación de fuerzas en el tambor limpiador.

Donde:

$F_t$  : Fuerza tangencial producida por el cilindro, ( N ).

$T$  : Momento torsor, ( N m ).

$R_1$  : Radio del centro del cilindro a la base de los clavos, ( m ).

$R_2$  : Radio del centro del cilindro a la punta de los clavos, ( m ).

**a).- Velocidad angular del tambor ( rev/min ).**

Con un tacómetro óptico, se hicieron 10 determinaciones de la velocidad angular del tambor, obteniendo un promedio de 761 rev/min ( 80 rad/s ).

**b).- Velocidad lineal del tambor ( m/s ).**

La velocidad lineal del tambor se determinó con la siguiente fórmula:

$$V_L = \frac{2\pi r n}{60} \quad (10)$$

Donde:

$V_L$  = Velocidad lineal del tambor, ( m/s ).

$r$  = Radio del tambor, ( m ).

$n$  = Velocidad angular del tambor, ( rev/min ).

Para efectos de cálculo, se tienen 2 radios en el tambor:  $r_1$  de la base de los clavos al centro y  $r_2$  de la punta de los clavos al centro del tambor.

Sustituyendo datos en la ecuación No.10 tenemos:

$$V_{L1} = \frac{2\pi(0.108)(761)}{60} = 8.61 \text{ m/s.}$$

$$V_{L2} = \frac{2\pi(0.146)(761)}{60} = 11.63 \text{ m/s}$$

**c).- Cálculo del torque, ( N m ).**

El cálculo del torque producido por el cilindro, se realizó con la fórmula:

$$T = \frac{P}{n} \quad (11)$$

Donde:

- T: Torque o momento torsionante, ( N m ).
- P: Potencia transmitida al tambor giratorio, ( W ).
- n: Velocidad angular en el tambor, ( rad/s ).

Estimando una perdida por deslizamiento banda-polea del 3 %, (Hall et al, 1993) se tiene una potencia transmitida de 724 W.

Sustituyendo datos en la ec. 11:

$$T = \frac{724}{80} = 9.05 \text{ N m}$$

**d).- Cálculo de la fuerza tangencial, ( N ).**

$T = F_t \cdot r$  ; despejando F.

$$F_t = \frac{T}{r} \quad (12)$$

Donde:

- $F_t$ : Fuerza tangencial aplicada , ( N ).
- T: Momento Torsionante producido por el tambor, ( N m ).
- r: Radio del tambor, ( m ).

Sustituyendo en la fórmula y utilizando ambos radios se tiene:

$$F_{t1} = \frac{9.05}{0.108} \quad ; \quad F_{t2} = \frac{9.05}{0.146}$$

$$F_{t1} = 84 \text{ N.} \quad ; \quad F_{t2} = 62 \text{ N.}$$

La fuerza desarrollada es de 62 N en la punta y 84 N en la base de los clavos. Asumiendo esta fuerza como una carga concentrada, se calcula la fuerza tangencial nominal producida por el cilindro.

Al momento de introducir las penca solamente una fila de clavos esta en contacto con el material debido a que el grosor máximo encontrado fue de 4 cm.

El ancho máximo de penca encontrado en las muestras fue de 7 cm con lo que se determinó que el numero de clavos que esta en contacto con la penca es de 3.

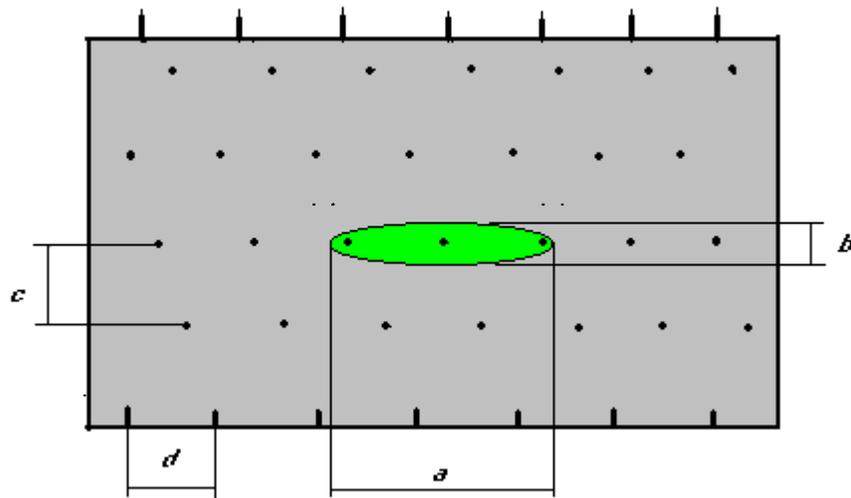


Fig. 22 .- Disposición de los clavos que procesan la penca.

a : Ancho máximo de penca, ( 7 cm ).

b : Grosor máximo, ( 4 cm ).

c : Distancia entre hileras, ( 2.7 cm ).

d : Distancia entre filas, ( 2.5 cm ).

**e).- Cantidad efectiva de clavos trabajando.**

$$C_{ec} = \frac{A_{max}}{D_c} Np \quad (13)$$

Donde:

$C_{ec}$ : Cantidad efectiva de clavos trabajando.

$A_{max}$ : Ancho máximo de penca, ( cm).

$D_c$ : Distancia entre hileras de clavos, ( cm ).

$N_p$ : Número de pencas procesadas en un ciclo de limpieza.

Sustituyendo:  $C_{ec} = \frac{7}{2.54} 3 = 9$  Clavos

**f).- Fuerza real aplicada por el cilindro, ( N ).**

El ancho del cilindro no es utilizado por completo, calculando la fuerza ejercida únicamente sobre el material procesado se tiene:

$$F_{tcil} = \frac{F_t}{C_{ec}} \quad (14)$$

Donde:

$F_{tcil}$ : Fuerza tangencial aplicada por clavo, ( N ).

$F_t$ : Fuerza tangencial, ( N ).

$C_{ec}$ : Cantidad efectiva de clavos trabajando.

Sustituyendo:

$$F_{t1cil} = \frac{84}{9} = 9 \text{ N/clavo} \quad ; \quad F_{t2cil} = \frac{62}{9} = 7 \text{ N/clavo.}$$

Dividiendo la fuerza tangencial entre la cantidad de pencas procesadas, se obtiene la fuerza aplicada en cada penca:

$$F_{t1cil} = \frac{84}{3} \quad ; \quad F_{t2cil} = \frac{62}{3}$$

$$F_{t1cil} = 28 \text{ N / Penca} \quad ; \quad F_{t2cil} = 21 \text{ N / Penca}$$

Multiplicando por el coeficiente de fricción dinámico encontramos la fuerza real aplicada tanto en el bagazo como en la fibra cuando se descarna la penca.

$$F_{tr} = F_{tcil} \mu_d \quad ( 15 )$$

Donde:

$F_{tr}$  : Fuerza tangencial real aplicada , ( N ).

$F_{tcil}$  : Fuerza tangencial aplicada por el cilindro, ( N ).

$\mu_d$  : Coeficiente de fricción dinámico.

Sustituyendo en la ec 15:

**g).- Fuerza tangencial real aplicada en la fibra, ( N ).**

$$F_{trf1} = 28 ( 1.1905 ) = 33 \text{ N / penca}$$

$$F_{trf2} = 21 ( 1.1905 ) = 25 \text{ N / penca}$$

Dividiendo entre el numero total de clavos que actúan por penca (3 clavos) se tiene:

$$F_{\text{trf1}} = 11 \text{ N / clavo}$$

$$F_{\text{trf2}} = 8 \text{ N / clavo}$$

**h).- Fuerza tangencial real aplicada en la pulpa (bagazo)de la penca, ( N ).**

$$F_{\text{trb1}} = 28 ( 0.8169 ) = 23 \text{ N / penca}$$

$$F_{\text{trb2}} = 21 (0.8169) = 17 \text{ N / penca}$$

Dividiendo entre el numero total de clavos que actúan por penca se tiene:

$$F_{\text{trb1}} = 8 \text{ N / clavo}$$

$$F_{\text{trb2}} = 7 \text{ N / clavo}$$

**i).- Cálculo de la fuerza de descarné en las hojas, ( N ).**

Se realizaron pruebas para calcular la fuerza requerida de descarné o despulpado en hojas de lechuguilla, probando distintas combinaciones de materiales, además de evaluar otras variables tales como el porcentaje de descarné, numero de pasadas o raspadas, daño mecánico, fuerza de tracción y fuerza normal aplicada; se obtuvieron las combinaciones en donde se presentaron los mejores resultados.

Las pruebas realizadas consistieron en colocar hojas de lechuguilla en forma longitudinal en un dispositivo previamente diseñado para poder simular el tallado manual (fig 23). Este aditamento constaba de una sección superior, en donde se colocó una parte de la combinación de los materiales a evaluar; y una sección inferior, en donde se colocaba la otra parte de la combinación y sobre de ésta la hoja de lechuguilla. Ambos elementos se unían aprisionando la hoja y en la parte superior se colocaban gradualmente distintos pesos. En cada adición de carga normal, se tiraba de la penca la cual estaba sujeta a un dinamómetro de resorte, registrando los parámetros que presenta la Tabla No. 12

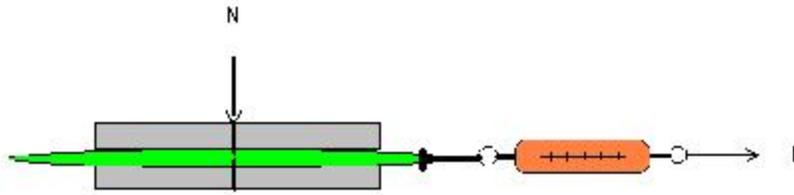


Fig. 23 .- Dispositivo para calcular la fuerza de descarne requerida en hojas de Agave lecheguilla.

Tabla No. 12 .- Fuerza requerida de descarne en hojas de lechuguilla.

VARIANTE	DESCARNE EN UNA PASADA,(%)	FZA. DE TRACCION,(N).	FZA. NORMAL, (N)	No. PASADAS
A	9.39	113	39	18
B	4.54	143	20	25
C	10.61	78	59	12
D	7.39	75	0	22
E	8.34	108	20	45
F	13.12	101	20	26

Clasificación de variantes:

- A.- Cuchilla - Cuchilla
- B.- Clavos – Cuchilla
- C.- Madera – Cuchilla
- D.- Madera – Sierra
- E.- Cuchilla – Clavos
- F.- Cuchilla – Madera

Una vez realizada la combinación de las variantes anteriores en el dispositivo utilizado para calcular la fuerza de descarne, se observó que a medida que aumentaba la fuerza normal, aumentaba el porcentaje de descarne, reduciendo el número de pasadas y como consecuencia el tiempo de limpieza.

De la Tabla No. 12 se identificó que la combinación óptima de materiales era la correspondiente a madera-cuchilla, pero se pone en duda la durabilidad del material, facilidad de mantenimiento, fabricación y/o venta de partes elaboradas con madera en el mercado; así que se desechó esta propuesta al no considerarla como viable.

Las siguientes variantes incluyen las cuchillas y los clavos ya sea en forma activa o pasiva como herramientas de trabajo. Como ya se mostró anteriormente en el diagrama de flujo de los procesos de desfibrado, en el proceso manual la cuchilla se usa como elemento de limpieza al rasparse la penca, mientras que en el procedimiento mecánico, los clavos se usan primero para poder deformar a la penca y después como herramienta de limpieza al peinar la penca repetidas veces.

#### 7.4.2.- ANALISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis cinemático de la máquina, se puede resumir lo siguiente.

\_ La fuerza aplicada por cada uno de los clavos en la penca, deformando y separando el bagazo de la fibra; varía de 8 a 11 N en cada uno de ellos.

\_ Se determinó que la máquina deberá de aplicar mayormente fuerzas de tensión y evitar a máximo las cargas normales sobre la penca, la combinación de herramientas de trabajo a utilizar estará formada por cuchillas y clavos. Asimismo, se deberá aplicar una fuerza de descarte máxima equivalente a 120 N en las cuchillas y 145 N en los clavos.

\_ Se demuestra nuevamente que el rompimiento de fibras por esfuerzos de tensión, es mínimo comparando la resistencia promedio y máxima de las pruebas realizadas en húmedo, con la fuerza máxima ejercida por el cilindro sobre las fibras.

Resistencia a la tensión de fibras húmedas:

promedio = 12.48 N

máxima = 28.00 N

fuerza tangencial aplicada por la máquina sobre las fibras:

promedio = 14 N

máxima = 11 N

\_ El diámetro en la punta de los clavos, es mayor que el diámetro de los filamentos (haces fibrosos), lo que origina un deslizamiento fibra-clavo, evitando el desgarre por penetración de las puntas y como consecuencia, solamente hay un ligero daño mecánico por rompimiento de microfibrillas en la periferia del filamento.

## TRABAJO.

Las herramientas de trabajo propuestas en la modificación del rodillo limpiador, deberán de cumplir su función en correspondencia a los parámetros de calidad de fibra que en el proceso manual fueron superiores y satisfacer o cuando menos igualar los parámetros de funcionalidad observados en la máquina.

### a).- Parámetros de calidad de fibra a mejorar con las modificaciones

Densidad lineal: 943.53 ± 277.00 Decitex  
Coloración: Manchado de fibra menor al 5 % del total obtenido por penca.

### b).- Parámetros de funcionalidad requeridos.

Capacidad de trabajo	≥	0.155	t/h de pencas procesadas.
Producción de fibra húmeda	≥	161.00	kg/h
Producción de fibra seca	≥	18.00	kg/h
Despulpado de la penca	78 al 80		% en base a la masa total.
Eficiencia de limpieza	≥	90.00	%
Requerimiento de potencia	≤	4.5	kW/t de pencas procesadas
Requerimiento de mano de obra	≤	509.00	horas hombre/t de fibra seca.

### d).- Parámetros de diseño.

Fuerza de descarné por penca	20 a 28	N
Fuerza de tracción máxima	140	N
Fuerza normal máxima	4	N

## 7.4.4.- SELECCION DE ALTERNATIVAS.

De acuerdo a los resultados del experimento realizado, se determinó que las herramientas de trabajo, estarían conformadas por clavos para deformar las pencas, cuchillas rectas para limpiar la fibra y transportar el bagazo, y cuchillas en forma de sierra para deformar, transportar y limpiar al mismo tiempo.

Las fuerzas aplicadas por las herramientas serán:

Fuerzas normales máximas permisibles: 4 N/penca.

Fuerzas de tensión máximas permisibles: 140 N/penca.

El tiempo calculado de limpieza fue de 8 segundos, sin embargo; se espera un sistema de limpieza más eficiente, además de que se busca no modificar las propiedades del material.

Györgi (1980) menciona que la fuerzas que actúan en un material causan deformación y desplazamiento en éste, y la naturaleza de la fuerza es el primer factor decisivo en la respuesta dada de los materiales. Sin embargo, para la mayoría de los materiales el desplazamiento y la deformación no solo depende de la naturaleza de la fuerza, sino también del tiempo.

Al aplicar una carga constante a un material biológico, este sufre una deformación continua con tres etapas. En la primera etapa, la tasa de deformación es decreciente en un periodo de tiempo corto; en la segunda etapa, la tasa de deformación es casi constante mientras que en la tercera etapa la tasa de deformación es creciente y el proceso termina con la ruptura del material.

El periodo de tiempo para cada etapa depende decisivamente de la estructura del material y de la fuerza aplicada.

En un tiempo dado durante una prueba, si la carga es removida; la deformación se recupera completamente. El decremento de la deformación está en función del tiempo, esto es; ocurre un proceso de recuperación dependiente del tiempo.

La magnitud de recuperación puede diferir para materiales individuales. Por otro lado, las propiedades estructurales del material y la carga también muestran un papel importante: para materiales agrícolas, la recuperación relativa decrece cuando se incrementa la carga.

#### 7.4.4.1.- MATRIZ DE PRUEBAS.

Se elaboró una matriz de pruebas, en función de la velocidad del tambor (diámetro de la polea impulsada), cantidad de hileras de clavos y por último la cantidad y tipo de cuchillas dispuestas en la periferia del cilindro, quedando en un principio de la siguiente manera:

Tabla No. 13 .- Matriz preliminar de pruebas.

POLEA(DIAMETRO) 22.86, 15.24, 10.16, 7.62 cm	CUCHILLAS (JUEGOS DE 2 C/U)	CLAVOS (No. DE HILERAS).
	2 RECTAS	12
	2 RECTAS	8
	4 RECTAS	12
	4 RECTAS	8
	2 ASERRADAS	12
	2 ASERRADAS	8
	4 ASERRADAS	12
	4 ASERRADAS	8
	2 REC. + 2 ASERR.	12
	2 REC. +2 ASERR.	8
	2 JUEGOS DE 5 C/U SOLO ASERRADAS	0

Primeramente se utilizaron cuchillas (paletas) limpiadoras elaboradas con ángulo metálico de 2.54 cm de altura. En la variante de cuchillas aserradas, se usó un ángulo de inclinación en los picos de 45 grados con un desfase entre cuchillas de 1.4 cm.

Las cuchillas se colocaron en pares con una separación entre ellas de 1 cm y equidistantes los pares en la periferia del cilindro (Fig.24)



Fig. 24 .- Disposición de cuchillas limpiadoras en el cilindro.

Al usar cuchillas aserradas solas o bien en combinación con las cuchillas rectas, se observó que la fibra era cortada y arrastrada, principalmente en la punta de la penca por lo que se eliminaron estas variantes.

En cuanto a las cuchillas rectas, se observó que la fibra describía una trayectoria sinusoidal al contacto con la paleta, sin embargo; el extremo de la penca en donde se encontraba la fibra limpia, oscilaba golpeteando demasiado con el tambor y ocasionando pérdida de fibra, por lo que se optó por reducir la altura de las paletas con la finalidad de disminuir la cresta de las oscilaciones, además se notó la diferencia en limpieza al usar 4 cuchillas ya que en esta combinación la limpieza fue superior.

Posteriormente se usaron cuchillas elaboradas de ángulo de 1.27 cm (1/2 pulgada) de altura y se probó una nueva cuchilla aserrada, ahora con un ángulo de inclinación de 70 grados dispuestas en forma alineada.

Para todas las combinaciones se trato de mantener constante el tiempo de duración del proceso pero al aumentar las revoluciones, el material procesado atrapaba al cilindro y el motor se paraba por lo que fue necesario disminuir la velocidad de alimentación, es decir; fue necesario aumentar el tiempo del procesamiento.

De tal manera que las combinaciones herramienta-clavos-polea impulsora probadas fueron las siguientes.

Tabla No.14 .- Matriz de pruebas de las herramientas de trabajo del tambor limpiador.

TRATAMIENTO	HILERAS DE CLAVOS	CANTIDAD DE CUCHILLAS	DIAMETRO DE POLEA IMPULSADA , cm.	VELOCIDAD DEL TAMBOR, rev/min.
A	12	4	7.62 (3 “)	634.16
B	12	4	10.16 (4 “)	475.62
C	12	4	15.24 (6 “)	377.08
D	8	4	7.62 (3 “)	634.14
E	8	4	10.16 (4 “)	475.16
F	8	4	15.24 (6 “)	377.08
G	8	4	22.86 (9 “)	211.86
H	8	4 (2 aserradas)	22.86 (9 “)	211.86

Para los tratamientos con las poleas de diámetro de 7.62 y 10.16 cm, el tiempo del proceso duraba en promedio 12 seg. , con la polea de 15.24 cm duraba 8 seg. y con la polea de 22.86 la duración del despulpado oscilaba en un promedio de 10 seg.

#### 7.4.4.2.-EVALUACION DE ALTERNATIVAS

El procedimiento de evaluación de las variantes, se realizó igual que en la evaluación funcional. Primero se pesaron las pencas, se procesaron una por una, realizando 5 repeticiones en cada combinación. Se recolectaba y embolsaba el material para pesarse posteriormente (tanto la fibra como el bagazo).

Para poder determinar la calidad de trabajo realizado, se tomó en cuenta el cálculo del porcentaje de despulpado y la eficiencia mecánica de limpieza (ecuaciones 2 y 3 ), así como el tamaño y/o desmenuzamiento del bagazo, buscando que fuera lo más grandemente posible, con la finalidad de que pueda ser aprovechado para elaborar shampoo o bien se pueda vender en seco, como se hace comúnmente en los mercados locales del Valle del Mezquital.

Aplicando la ecuación No. 3, se estimó la cantidad de fibra obtenida manualmente en 5 muestras; la cual fue del 15 % en base a la masa de la penca. Esta se tomó como referencia para calcular el despulpado.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla No. 15.

Tabla No.15 .- Promedios obtenidos en la evaluación de herramientas en el tambor limpiador.

TRATAMIENTO	DESPULPADO, %		EFICIENCIA DE LIMPIEZA, %		CALIDAD DE BAGAZO
	media	desv.std.	media	desv.std.	
A	83	2.6	96	20	Mala
B	86	1.8	121	13	Regular
C	86	1.9	121	17	Regular
D	86	3.3	130	36	Regular
E	84	3.6	112	24	Regular
F	84	1.7	106	15	Buena
G	83	1.9	90	13	Buena
H	81	3.1	88	13	Regular

La calidad de bagazo se determinó comparándolo con el obtenido manualmente, observando el tamaño y/o desmenuzamiento. Cabe resaltar que ninguna variante igualó al proceso manual, sin embargo; el productor determinó que la calidad es aceptable en el caso de las variantes F y G.

Al observar los datos resulta ilógico pensar que la máquina pudiera limpiar con una eficiencia de hasta el 130 por ciento, tomando en cuenta la estimación de la cantidad de fibra en las pencas, la eficiencia superior al 100 por ciento es la fibra que esta siendo desperdiciada por la maquina durante el proceso y que se mezcla junto con el residuo de la penca.

#### 7.4.4.3.-SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA OPTIMA.

Para poder seleccionar la alternativa óptima, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones al interpretar los resultados obtenidos durante el experimento.

Se buscó que existiera un alto porcentaje de despulpado, a la vez que la desviación estándar en el tratamiento fuera mínima con la finalidad de asegurar la uniformidad en el procedimiento de descarte.

La eficiencia mecánica de limpieza, debería de ser la mas alta posible y menor al 105 por ciento evitando al máximo las perdidas de fibra. La desviación estándar también seria la mínima para asegurar uniformidad de limpieza en el proceso.

La calidad del bagazo seria la más cercana posible al bagazo obtenido manualmente (buena).

De acuerdo a lo anterior se descartaron todas las variantes a excepción de los tratamientos F y G, es decir, una combinación de ocho hileras de clavos con dos pares de cuchillas o paletas limpiadoras, dispuestas en la periferia; la única variación entre los tratamientos es la velocidad angular producida por el tamaño utilizado en la polea impulsada el cual es de 377.08 y 211.38 rev/min.

#### 7.4.5.- MODIFICACION DEL TAMBOR LIMPIADOR.

La longitud máxima encontrada en las pencas que se procesan es de 60 cm, tomando en cuenta que el proceso se divide en dos etapas en donde primeramente se limpia la mitad de la penca y posteriormente la otra mitad; tenemos que el perímetro del cilindro no deberá de ser menor a 60 cm dando un margen de seguridad de 15 cm para evitar que la fibra se enrolle y el operador sufra algún accidente.

##### 7.4.5.1.-CALCULO DEL DIÁMETRO DEL CILINDRO

Tomando como perímetro máximo del cilindro la longitud total de la penca (60 cm) con la finalidad de evitar el enrollamiento de las fibras, calculamos el diámetro del cilindro mediante la siguiente ecuación:

$$d = \frac{P}{\pi} \quad (16)$$

Donde:

d : Diámetro del tambor, (cm).

P : Perímetro del tambor, (cm).

$\pi$  : 3.1416

Sustituyendo datos:

$$d = \frac{60}{3.14}$$

$$d = 19.10 \text{ cm}$$

Estandarizando a medidas comerciales para tubo de acero, usaremos un diámetro interno de 20.32 cm (8 ").

#### 7.4.5.2.-CALCULO DE LA LONGITUD DEL CILINDRO

La longitud del cilindro será determinada con la ecuación (16)

$$L = (a)(z) \quad (17)$$

Donde:

- L : Longitud del cilindro, (cm).
- a : Ancho máximo encontrado en las pencas, (cm).
- z : Numero de pencas procesadas en un ciclo.

El ancho máximo encontrado en las pencas fue de 6.2 cm, sabemos de antemano que en cada ciclo del proceso los productores desfibran 3 pencas a la vez, sustituyendo tenemos:

$$L = (6.2)(3)$$

$$L = 18.9 \text{ cm}$$

Durante el proceso se observó que existe un traslape de pencas entre un 20 a 40 % por lo que no usaremos un margen de seguridad en la longitud del cilindro eligiendo una longitud total de 20 cm, es decir:

$$L = 20 \text{ cm}$$

#### 7.4.5.3.-CALCULO DEL ESPESOR DEL CILINDRO

Idealizando las fuerzas que actúan en el proceso de desfibrado tenemos el siguiente modelo:

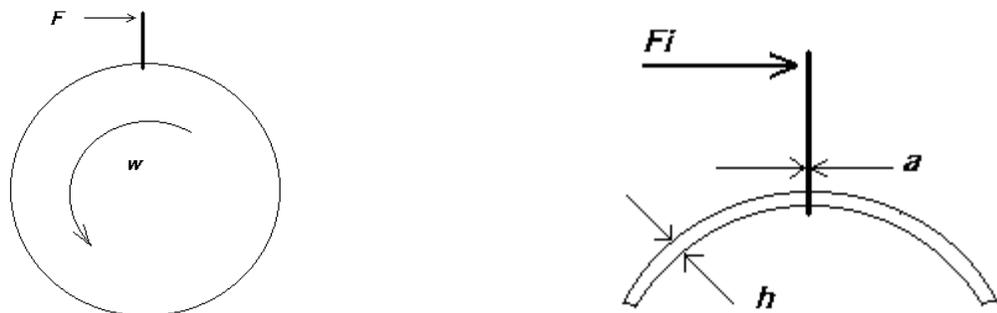


Fig.25.- Fuerzas que actúan en el proceso de desfibrado

Donde:

$F_1$ : Resistencia máxima de la penca al descarne, ( kg).

$a$  : Diámetro del tornillo,(cm).

$h$  : Espesor del cilindro,(cm).

$w$  : Velocidad angular del cilindro, (rev/min).

Primeramente determinamos el esfuerzo de calculo.

$$S_{ad} = \frac{S_u}{N} \quad ( 18 )$$

Donde:

$S_{ad}$ : Esfuerzo de calculo, (kg/cm<sup>2</sup>)

$S_u$ : Esfuerzo máximo del material, (kg/cm<sup>2</sup>)

$N$  : Coeficiente de seguridad.

$N = 1.5$ , para acero con una carga repetida en una dirección (Timoshenko 1990).

Tomando las características del acero AISI 1020 laminado simple, tenemos un esfuerzo máximo a tensión de 3374 kg/cm<sup>2</sup>

Sustituyendo en 18 tenemos:

$$S_{ad} = \frac{3374}{1.5}$$

$$S_{ad} = 2249 \text{ kg/cm}^2$$

Idealizando el sistema tenemos:

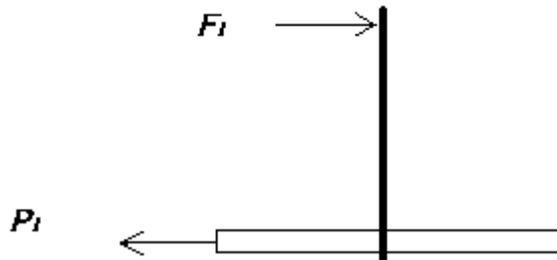


Fig. 26.- Equilibrio de fuerzas en el tambor limpiador

Para que se cumpla la condición de equilibrio,  $F_1 = P_1$

La superficie de apoyo esta dada sobre la proyección del área dada en un plano horizontal por el diámetro del clavo, esto es:

$$A = a.h \quad (19)$$

La fuerza de tensión en la placa del tubo esta dada por:

$$\sigma = \frac{P_1}{A} \quad (20)$$

Donde:

$\sigma$  : Tensión de aplastamiento = Tensión de calculo  $S_d = 2249 \text{ kg/cm}^2$   
 $P_1$  : Fuerza de tensión en la placa, 15 kg.  
 $A$  : área transversal, desconocida ( $\text{cm}^2$ ).

Despejando  $A$ ,

$$A = \frac{P_1}{\sigma} \quad \text{pero} \quad A = a . h$$

$$a . h = \frac{P_1}{\sigma}$$

Despejando  $h$ :

$$h = \frac{P_1}{\sigma.a} \quad (21)$$

sustituyendo,

$$h = \frac{15}{(2249)(0.635)}$$

$$h = 0.0105 \text{ cm}$$

Utilizando medidas comerciales, usaremos un tubo con espesor de 0.3175 cm (1/8 “)

La sección neta sometida a tensión de acuerdo al dimensionamiento (ver figura 27) es:

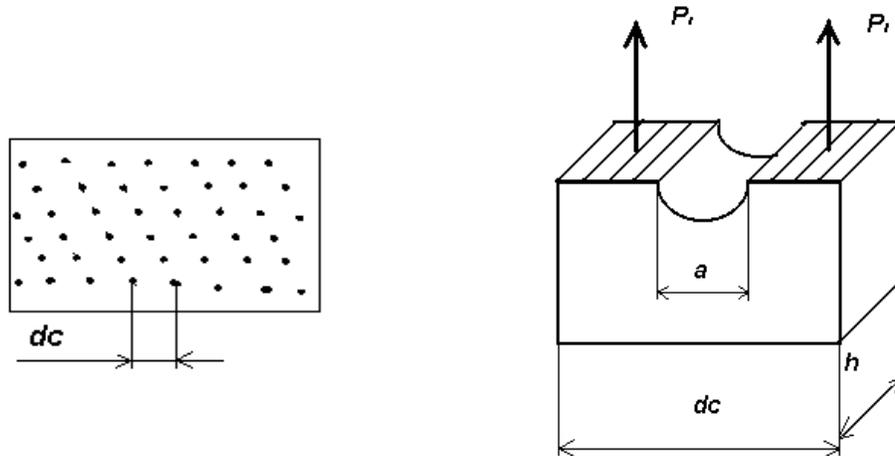


Fig. 27.- Área transversal del cilindro sometida a esfuerzos de tensión

$$A_t = (d_c - a)(h) \quad (22)$$

Donde:

$A_t$  : Área total de acción, (cm<sup>2</sup>).

$d_c$  : Distancia entre clavos, (cm).

$a$  : Diámetro del clavo, (cm).

$h$  : Espesor del cilindro, (cm).

Sustituyendo:

$$A_t = (2.54 - 0.635)(0.3175)$$

$$A_t = 0.6048 \text{ cm}^2$$

Calculando el esfuerzo de tensión con la ecuación ( 19 ).

$$\sigma_{calc.} = \frac{15}{0.6048}$$

$$\sigma_{\text{calc}} = 24.8 \text{ kg f/cm}^2$$

Entonces se debe cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{\text{calc}} < \sigma_{\text{perm. acero}}$$

$$24.8 \text{ kg f/cm}^2 < 3374 \text{ kg f/cm}^2$$

Es aceptable utilizar un espesor de 0.3175 cm ( 1/8 " ) en el cilindro.

Resumiendo: Utilizaremos una sección de tubo calibre 20 con diámetro exterior de 20.32 cm, longitud de 20 cm y espesor nominal de 0.3175 cm con características iguales o superiores al acero 1020.

El cilindro será barrenado para colocar tornillos de cuerda estándar cada 2.54 cm en forma longitudinal y transversal, con un desfaseamiento entre columnas de 0.63 cm como se muestra en las especificaciones de los planos (anexo A1).

#### 7.4.5.4.-CALCULO DE LAS DIMENSIONES DE LOS CLAVOS.

De las pruebas realizadas encontramos que el grosor máximo presente en las pencas fue de 3.3 cm por lo que se decidió usar clavos fabricados con tornillos. Idealizando el sistema tenemos el siguiente D.C.L.

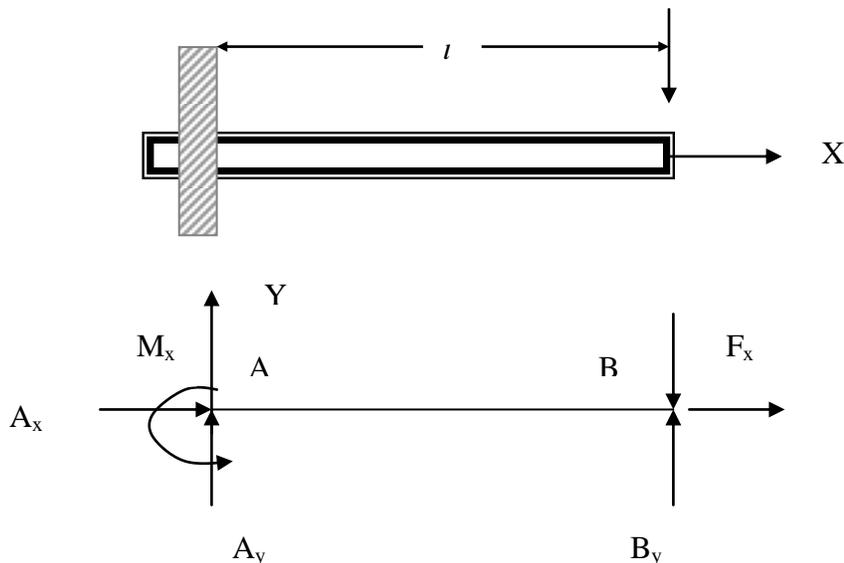


Fig.28.- Diagrama de Cuerpo Libre de las fuerzas que actúan en los clavos

$$F_{RD} = 145 \text{ N por penca}$$

La fuerza de tensión en el tornillo esta dada por el efecto de la fuerza centrífuga producida por el cilindro.

$$F_x = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad (23)$$

Donde:

$F_x$  : Fuerza de tensión (tangencial) en el clavo, (kg f).

$m$  : Masa del clavo = 0.011 kg.

$r$  : Distancia del eje de movimiento al centro de gravedad del clavo = 0.1587 m.

$\omega$  : Velocidad angular = 12.68 rev/s (761 rev/min).

Sustituyendo en ( 22 ).

$$F_x = (0.011)(0.1587)(12.68)^2$$

$$F_x = 0.286 \text{ N, (0.028 kg)}$$

Aplicando las tres condiciones de la estática.

$$\sum f_x = 0$$

$$\sum f_y = 0$$

$$\sum M_A = 0$$

$$A_x + 0.286 \text{ N} = 0$$

$$A_x = - 0.286 \text{ N ( - 0.028 kg)}$$

$$A_y = 145 \text{ N}$$

$$M_x - (A_y)(l)$$

$$M_x - (145 \text{ N})(0.0635 \text{ m}) = 0$$

$$M_x = 9.2 \text{ N m}$$

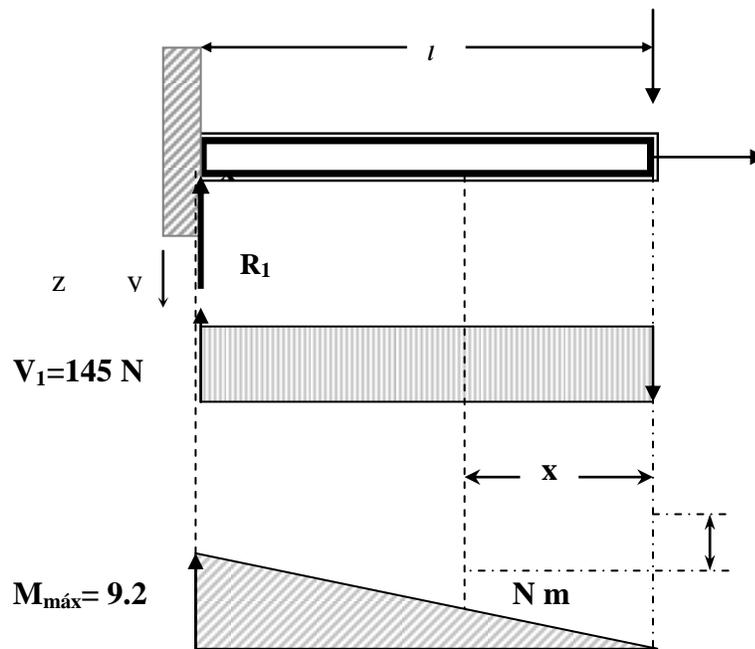


Fig. 29.- Diagrama de esfuerzo cortante y momento flexionante en los clavos

Los clavos son fabricados con tornillos de cuerda standard de 6.25 x 0.635 cm fijados al cilindro mediante tuerca y contratuerca para evitar que se aflojen.

De la teoría del esfuerzo cortante medio tenemos:

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (24)$$

donde:

- $\tau$  : Esfuerzo cortante medio, (kg f/cm<sup>2</sup>).
- P: Fuerza cortante en el elemento = 15 kg f.
- A: área de la sección transversal = 0.3167 cm<sup>2</sup>.

De acuerdo a los esfuerzos permisibles para el acero 1020 recocido con el que se cubre la necesidad de satisfacer los requisitos de tornillos grado 2 (Faires 1990) con una resistencia de fluencia  $S_y$  de 2952 kg/cm<sup>2</sup>.

Sustituyendo:

$$\tau_{\text{calc}} = \frac{15}{0.3167}$$

$$\tau_{\text{calc}} = 47.36 \text{ kg f/cm}^2$$

Para aceros tenemos que la resistencia máxima en cizalladura y torsión, es de 0.5 a 0.6 veces la resistencia de fluencia (Faires 1990), es decir;

$$\tau_{\text{perm.acero}} = (0.6)(2952)$$

$$\tau_{\text{perm.acero}} = 1771.2 \text{ kg f/cm}^2$$

esto indica que se cumple la condición:

$$\tau_{\text{calc}} < \tau_{\text{perm.acero}}$$

$$47.36 \text{ kg f/cm}^2 < 1771.2 \text{ kg f/cm}^2$$

La longitud de los tornillos se calcula con la siguiente expresión:

$$L_t = G_p + h + 2A_t \quad ( 25 )$$

Donde:

- $L_t$ : Longitud de los tornillos, (cm).
- $G_p$ : Grosor máximo de las pencas, (cm).
- $h$  : Espesor del cilindro, (cm).
- $A_t$  : Ancho de la tuerca, (cm).

$$L_t = 3.8 + 0.3175 + 2(0.635)$$

$$L_t = 5.38 \text{ cm}$$

Estandarizando, la longitud de los tornillos será de 6.25 cm

En conclusión, para fabricar los clavos se usaran tornillos grado dos de 6.25 cm de largo por 0.625 cm de diámetro, se deberá de separar la cabeza y se esmerilan hasta definir una punta en forma alargada.

#### 7.4.5.5.-CALCULO DE LAS PALETAS LIMPIADORAS

Para la fabricación de las paletas limpiadoras se usara ángulo metálico de lados iguales de 1.905 cm de lado y 0.3175 de espesor, la longitud es la misma que la del tambor (20 cm).

Cada sección de ángulo va fija al cilindro mediante tornillos de 2.54 cm de largo y 0.635 cm de diámetro.

El calculo del diámetro de los pernos se obvia así como la modelación de las fuerzas que actúan en la sección del ángulo debido a que la fuerza de resistencia al descarnar de las tres pencas que se procesan en una pasada ( 84 N ), se distribuye a lo largo de la paleta limpiadora, como ya se pudo ver en el dimensionamiento de los clavos, las especificaciones y medidas del material son demasiado seguras.

La colocación de las paletas limpiadoras es por pares, unidas al tambor limpiador con dos tornillos de 2.54 cm de largo por 0.63 cm de diámetro, como se muestra en los planos de ensamble de la máquina.

#### 7.4.5.6.-DIMENSIONAMIENTO DEL EJE DEL TAMBOR LIMPIADOR.

##### a)-POTENCIA REQUERIDA.

Al determinar la potencia necesaria para limpiar el material es necesario distinguir 2 potencias que actúan durante el funcionamiento de la máquina, estas potencias son la potencia necesaria para realizar la limpieza, y la potencia necesaria para vencer el momento de inercia durante el arranque de la máquina. Al conocer ambas, se tomara como referencia la potencia crítica para efectos de calculo.

## DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA REQUERIDA PARA REALIZAR LA LIMPIEZA.

Esta dada por la siguiente ecuación:

$$P_{lim} = M \cdot \omega \quad (26)$$

Donde:

$P_{lim}$ : Potencia requerida por el tambor, (W).

M: Momento generado en el tambor al despulpar las pencas, (N m).

$\omega$ : Velocidad angular en el cilindro, (rad/s).

Asimismo:

$$M = F \cdot d \quad (27)$$

Donde:

F : Fuerza de resistencia al desfibrado, (N).

d : Radio del centro de giro a donde se aplica la fuerza de desfibrado, (m).

La fuerza de descarte por penca es de 28 N, como se procesan 3 pencas a la vez entonces  $F = 84$  N. Asimismo sabemos que la velocidad angular del cilindro es de 80 rad/s

Sustituyendo en ( 26 ).

$$M = (84)(0.146)$$

$$M = 12.26 \text{ N m}$$

$$P_{lim} = (12.26)(80)$$

$$P_{lim} = 981.12 \text{ W , (1.3 Hp)}$$

## DETERMINACION DE LA POTENCIA NECESARIA PARA VENCER EL MOMENTO DE INERCIA.

Esta potencia se calcula mediante la ecuación:

$$P_1 = T \cdot \omega \quad (28)$$

Donde:

T: par de rotación (torsión) necesario para vencer el momento de inercia, (N m)

$\omega$ : Velocidad angular del tambor en el periodo de arranque, (rad/s).

La velocidad angular durante el arranque es de 3 rev/min (0.3142 rad/s).

Considerando que T es igual al momento angular debido a un par tenemos:

$$T = I * \alpha \quad (29)$$

Donde:

I : Momento de inercia de un cuerpo, (N m).

$\alpha$ : Aceleración angular del tambor limpiador, (rad/s<sup>2</sup>).

Calculando el momento de inercia del tambor.

$$I = \frac{1}{2} mr^2 \quad (30)$$

Donde:

m : Masa del cilindro, (kg).

r : radio de giro, (m).

Calculando la masa del cilindro:

$$M_{cil} = M_{tubo} + M_{tapas} + M_{bujes} + M_{clavos} + M_{p.limp.} \quad (31)$$

$$M_{tubo} = \pi (R^2 - r^2)(L)(\rho) \quad (32)$$

Donde:

R: Radio exterior del cilindro, (cm).

r : Radio interior del cilindro, (cm).

L: Longitud del cilindro, (cm).

$\rho$ : Densidad del acero, (gr/cm<sup>3</sup>).

Para el acero, la densidad es de 7.87 gr/cm<sup>3</sup>.

Sustituyendo.

$$M_{\text{tubo}} = (3.1416)[(10.16)^2 - (10)^2](20)(7.87)$$

$$M_{\text{tubo}} = 1.59 \text{ kg.}$$

$$M_{\text{tapas}} = \pi r^2(h)(\rho)(Z) \quad (33)$$

Donde:

h: Espesor de la placa, (cm).

Z: Cantidad de tapas, (cm).

Las dos tapas tendrán el mismo espesor del cilindro (0.3175 cm)

Sustituyendo:

$$M_{\text{tapas}} = 3.1416(10)^2(0.3175)(7.87)(2)$$

$$M_{\text{tapas}} = 1.57 \text{ kg.}$$

$$M_{\text{bujes}} = \pi(R^2 - r^2)(l)(\rho)(Z) \quad (34)$$

Donde:

l: Longitud del buje, (cm).

Sustituyendo:

$$M_{\text{bujes}} : 3.1416[(2.5)^2 - (1.25)^2](2.5)(7.87)(2)$$

$$M_{\text{bujes}} = 0.58 \text{ kg}$$

$$M_{\text{clavos}} = (M_c + M_t)(Z) \quad (35)$$

Donde:

$M_c$ : Masa del clavo, (g).

$M_t$ : Masa de la tuerca,(g).

Sustituyendo.

$$M_{\text{clavos}} : (10.8 + 3.2)(56)$$

$$M_{\text{clavos}} = 1.93 \text{ kg.}$$

$$M_{\text{paletas}} = h (2a-h)(L)(Z_1)(\rho) + M_p(Z_p) \quad (36)$$

Donde:

a: Ancho del ángulo metálico, (cm).

$Z_1$ :Cantidad de paletas limpiadoras.

$M_p$ : masa de los tornillos de sujeción de las paletas, (gr).

$Z_p$  : Cantidad de tornillos de sujeción.

Sustituyendo;

$$M_{\text{paletas}} = 0.3175[ 2(1.905) - 0.3175](20)(4)(7.87) + 10.6(8)$$

$$M_{\text{paletas}} = 0.72 \text{ kg.}$$

Sumando tenemos:

$$M_{\text{cilindro}} = 1.59 + 1.57 + 0.58 + 1.93 + 0.72$$

$$M_{\text{cilindro}} = 6.4 \text{ kg.}$$

Sustituyendo en ( 29 )

$$I = \frac{1}{2} (6.4)(0.146)$$

$$I = 0.4672 \text{ kg m}^2$$

El periodo de arranque  $\alpha$  esta dado por:

$$\alpha = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t} \quad (37)$$

donde:

$\alpha$  : aceleración angular, ( $\text{rad/s}^2$ )

$\omega_2$  : Velocidad angular, ( $\text{rad/s}$ ).

$\omega_1$  : Velocidad angular inicial, ( $\text{rad/s}$ ).

Considerando una velocidad angular inicial de cero y 3 rev/min (0.3142 rad/s) para la velocidad angular en un tiempo de un segundo tenemos:

$$\alpha = \frac{0.3142 - 0}{1}$$

$$\alpha = 0.3142 \text{ rad/s}^2$$

Sustituyendo en la ecuación 29

$$T = (0.4672)(0.3142)$$

$$T = 0.1468 \text{ Nm.}$$

Sustituyendo en (28)

$$P_1 = (0.1468)(0.3142)$$

$$P_1 = 0.04612 \text{ W} \cong (0.00062 \text{ Hp})$$

Se observa que la potencia de desfibrado (despulpado) es mayor que la potencia necesaria para vencer el momento de inercia, por lo tanto; esta se usara para cálculos posteriores.

## b)-CALCULO DEL DIÁMETRO DEL EJE

### **Diseño por resistencia.**

El diseño de ejes por resistencia del material esta dado por la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{Tc}{J} \quad (38)$$

$\tau$  : Esfuerzo cortante causado por el momento torsionante, (kg/cm<sup>2</sup>).

T : Momento torsionante, (kg/cm).

c : Radio del eje,  $= \frac{d}{2}$ , (cm).

J : Momento polar de inercia  $= \frac{1}{2}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^4$ , (cm<sup>4</sup>).

d : Diámetro del eje, (cm).

Despejando d :

$$d = \sqrt[3]{\frac{16T}{\pi\tau}} \quad (39)$$

Usando un acero 1020 normalizado para fabricar el eje, tenemos las siguientes características.

$$S_u = 4499 \text{ kg f/cm}^2.$$

$$S_s = 3797 \text{ kg f/cm}^2$$

$$S_y = 3515 \text{ kg f/cm}^2$$

La resistencia de fluencia en torsión (cizalladura) esta comprendida entre 0.5 y 0.6  $S_y$ . (Faires 1990).

Empleando 0.6  $S_y$  tenemos:

$$\tau = (0.6)(3515)$$

$$\tau = 2109 \text{ kg f/cm}^2.$$

De la teoría del esfuerzo cortante máximo

$$\tau_{adm} = \frac{S_y}{2N} \quad (40)$$

$\tau_{adm}$  : Esfuerzo admisible, (kg/cm<sup>2</sup>)

N : Factor de seguridad.

Usando un factor de seguridad de 4 , tenemos:

$$\tau_{adm} = \frac{2109}{2(4)}$$

$$\tau_{adm} = 264 \text{ kg f/cm}^2$$

el torque producido por el árbol se calcula con:

$$T = \frac{71600.cv}{n} \quad (41)$$

Donde:

T: Torque, (kg f/cm).

cv: Potencia en caballos métricos

n : Velocidad angular, (rev/min).

Sustituyendo,

$$T = \frac{71600(1.520)}{761}$$

$$T = 143 \text{ kg f/cm}$$

Calculando el diámetro del eje:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16(143)}{3.1416(264)}}$$

$$d = 1.4 \text{ cm}$$

Sin embargo, como ya se menciona anteriormente por cuestiones practicas y sobre todo económicas muchos productores utilizan motores de combustión interna (gasolina) con potencias que fluctúan entre 2 y 4 Hp.

Calculando con 4 Hp.

$$T = \frac{71600(4.05)}{761}$$

$$T = 382 \text{ kg f/cm}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{16(381)}{3.1416(264)}}$$

$$d = 1.95 \text{ cm.}$$

**Comprobando el calculo con la teoría de Von Misses.**

$$d = \sqrt[3]{\frac{32n}{s_y \pi} \sqrt{M^2 + \frac{3}{4}T^2}} \quad (42)$$

Donde:

M : Momento generado por el tambor limpiador = 12 (N m).

$$d = \sqrt[3]{\frac{32(4)}{345(3.1416)} \sqrt{(12.26)^2 + \frac{3}{4}(14)^2}}$$

$$d = 1.3 \text{ cm.}$$

Se usara un diámetro de 2.22 cm (7/8 “) para fabricar el eje del tambor.

Por ultimo comprobamos el calculo del eje mediante la rigidez torsional, para esto se sabe que el ángulo de giro permisible depende de la aplicación particular, sin embargo; en ejes y árboles de maquinaria varia entre 0.25 ° y 3.2 ° por metro.

$$\theta_{adm} = \frac{TL}{GJ} \quad (43)$$

Donde:

$\theta_{adm}$ : Angulo de giro permisible en el eje, (°).

G : Limite de elasticidad al corte para el acero =  $8 \times 10^4$  (kg f/cm<sup>2</sup>).

Sustituyendo valores:

$$\theta_{adm} = \frac{(381.6)(45)}{(808500)\left(\frac{3.1416}{2}\right)(2.22)^2}$$

$$\theta_{adm} = 0.004446 \cong (0.0166^\circ)$$

Esto implica que se cumple la condición.

$$\theta_{adm} \leq 0.02^\circ$$

Resumiendo, utilizaremos acero 1020 normalizado (o un acero con características superiores) para fabricar el eje del tambor limpiador. El diámetro nominal del eje es de 2.22 cm ( 7/8 “) y una longitud de 45 cm de largo como se muestra en los planos del anexo A-1

#### 7.4.6.- MODIFICACIONES AL BASTIDOR.

Tomando en cuenta que la máquina se ha fabricado durante años en la región, de acuerdo a la experiencia de los productores y a la característica del material con que ha sido fabricado, se da por hecho que el calculo de los elementos del bastidor han sido efectivos al no existir fallas de ningun tipo por fatiga.

En el diseño del bastidor, únicamente se adicionaron un par de ruedas de hule macizo de 25 cm de diámetro y dos agarraderas de tubular unidas a las patas de la parte frontal como se

puede observar en los planos del anexo A-1, lo anterior se fundamenta debido a que con las modificaciones en el diseño del tambor y de la máquina en general, no se redujo en gran medida el peso de la misma teniendo que buscar un mecanismo para facilitar su transporte y desplazamiento tanto en el campo (laderas, lomeríos, etc.) como en la casa de los productores de fibra de lechuguilla. Aunado a lo anterior, el alcance de la presente investigación se avoca primordialmente al cumplimiento de la función del órgano limpiador, es decir; el descarte y limpieza de la fibra de lechuguilla.

Todas las especificaciones del diseño con las modificaciones propuestas, se muestran en los planos de ensamble de las piezas que conforman la máquina (anexo A-1)

## 8.-CONCLUSIONES

Al termino del presente trabajo pudimos concluir lo siguiente:

- El tallado de fibra de lechuguilla es una actividad complementaria en zonas áridas y semiáridas, que permite el aprovechamiento de una especie vegetal a bajo costo de inversión y cuyo producto puede ser susceptible de exportación.

- Al desfibrar las pencas de lechuguilla con el proceso mecánico, existe una eficiencia de despulpado muy baja ( 42 % al 53 %), esta eficiencia aumenta hasta el 90 % con las modificaciones realizadas.
- La fibra de *Agave lecheguilla Torr.* desfibrada mecánicamente no sufre daño alguno causado por los clavos, esto es debido a que la punta de los clavos al ser mas grande que el diámetro del haz de filamentos fibrosos solamente se desliza sin alcanzar a penetrarlo.
- La resistencia a tensión soportada por la fibra no varía reforzando la aseveración de que no existe daño mecánico.
- La calidad de la fibra en el proceso mecánico es mala en su limpieza debido al alto contenido de residuos como.
- La evaluación de la coloración muestra fibra de baja calidad debido al alto contenido de bagazo que no alcanza a ser limpiado, su coloración tiene una tonalidad manchada por causa del jugo de la planta que no es lavado por completo.
- La productividad de la máquina es bastante elevada por lo que su uso es muy indispensable.
- Las fibras de lechuguilla tienen un comportamiento en sus propiedades físico-mecánicas similar a las fibras de sisal y maguey, ya que pertenecen a la misma familia (Agavaceas).
- Con las modificaciones propuestas al órgano limpiador, se obtiene fibra de mayor calidad debido a que aumenta el porcentaje de despulpado.
- La máquina desfibradora de lechuguilla, no deteriora el medio ambiente y no pone en riesgo las poblaciones de *Agave lecheguilla*, además de ayudar a elevar el nivel de vida del productor, ya que su capacidad de trabajo es acorde con las necesidades económicas que presentan en promedio las familias que se dedican a esta actividad, sin llegar a depredar esta especie vegetal.

## 9.-RECOMENDACIONES

Se recomienda remojar en agua durante 30 a 60 minutos la fibra despulpada con la máquina para posteriormente separar con la mano los residuos de bagazo que aun quedan adheridos a ella, esto con la finalidad de elevar aun mas la calidad de la fibra, disminuyendo la mala coloración y manchado por el excedente de jugo de la planta.

Se debe de construir la máquina de acuerdo a las especificaciones señaladas para obtener resultados satisfactorios.

Se debe de realizar el mantenimiento de post-temporada separando los residuos de bagazo adheridos a la máquina lavándola perfectamente con agua para disminuir la corrosión asimismo se deben de engrasar los puntos de lubricación.

Se recomienda en lo sucesivo realizar pruebas para determinar el tratamiento térmico adecuado en las cuchillas y así poder aumentar su durabilidad y eficiencia; asimismo se deben de buscar alternativas para eficientar aun mas el proceso de limpieza y detallado de la fibra además de buscar mejores canales de comercialización

## 10.-LITERATURA CITADA

Aten A. et al. 1954. Maquinaria Para la Manipulación de Fibras Vegetales Largas. FAO-ONU. Roma Italia. 60 p.

Baumeister T., E. Avallone., T. Baumeister III. 1990. Marks, Manual del Ingeniero Mecánico. Mc Graw Hill. México. pp 3-53, 4-49.

Belmares H., J. E. Castillo., A. Barrera. 1979. Natural Hard Fibers of the North American Continent. Statistical Correlations of Physical and Mechanical Properties of Lechuguilla (Agave lechuguilla) Fibers. Textile Research Journal. 49: pp 619-622.

Berlanga R. C. et al. 1992. Metodología para la Evaluación y Manejo de Lechuguilla en Condiciones Naturales. SARH-INIFAP. Saltillo Coah. México. pp 2-20.

Cazaurang M. M., P. J. Herrera., P. I. González. 1991. Physical and Mechanical Properties of Henequen Fibers. Journal of Applied Polymer Science. 43: pp 749-756.

De la Garza D. F. 1987. Comercialización y Costos de Producción del Ixtle de Lechuguilla. SARH-INIFAP. Saltillo Coah. pp 5-9.

Faires M. V. 1990. Diseño de Elementos de Maquinas. Ed. UTEHA. México. 802 p.

Fuentes R. F. 1958. Estudio de la Lechuguilla en el Estado de Coahuila. Escuela Superior de Agricultura. Tesis. Saltillo Coah. México.

Granados S. D. 1999. Los Agaves en México. UACH. México. pp 121-130.

György S. 1986. Mechanics of Agricultural Materials. Elsevier. New York USA. pp 121-125.

Hall. S. A., A.R. Hollowenko., H.G. Laughlin. 1993. Diseño de Maquinas. Ed. Mc Graw Hill. México. 344 p.

Iglesias C. C., P. Paneque.,L. Shkiliova. 1999. Evaluación y prueba de Tractores y Maquinas Agrícolas. Universidad Autónoma Chapingo-Universidad Agraria de La Habana. México. pp 15-24.

Infante G. S. y Zarate De L. G. 1990. Métodos Estadísticos. Un Enfoque Interdisciplinario. Ed. Trillas. México. pp 370-374.

Lock G.W. 1969. Sisal, Thirty years' Sisal Research in Tanzania. Longmans. London, England. pp 279-280.

Maiti M. R. 1995. Fibras vegetales. Ed. trillas. México. pp 117-123.

Marroquín J. S. et al. 1981. Estudio Ecológico Dasonómico de las Zonas Áridas del Norte de México. SARH-INIF. México. 166 p.

Nash A. W. 1994. Resistencia de Materiales. Ed. Mc Graw Hill. México. pp 1-67.

Perales G. J. 1987. Plagas Asociadas a la Lechuguilla (Agave lechuguilla Torrey) y su Impacto Económico en los Principales Ejidos Ixtleros del Sur de Coahuila. Tesis. UAAAN. Saltillo Coah. México. pp 4-62.

Ramírez G. E. 1985. El Ixtle Un Sistema Socioeconómico. CIQA. México. pp 1-72.

Rzedowski P.J. 1983. Flora Fanerogamica del Valle de México. Ed. CECSA. México.  
Ribeiro F. S. O. y De Macedo B. N. O. 1999. Agronegocio do Sisal no Brasil. Embrapa-Ministerio da Agricultura e do Abastecimento. Brasilia, Brasil. 205 p.

Sánchez F. V. 1991. La producción de Lechuguilla en el Alto Mezquital. Tesis de Ingeniería Agrícola. FES-UNAM. Cuautitlan Izcalli Méx. 91 p.

Singer F. L. 1982. Resistencia de Materiales. Ed. Harla. USA. 560 p.

Smith D. W. et al. 1994. Principios y Practicas de Prueba y Evaluación de Maquinas y Equipo Agrícola. FAO. Roma Italia. pp 225-235.

Timoshenko S., D.H. Young. 1975. Elementos de Resistencia de Materiales. Ed. Montaner y Simón. Barcelona España. pp-347-356.

Zamora L. R. 1980. Determinación de la Producción de Fibra a partir de las Poblaciones Naturales de Agave lecheguilla (Torrey) en la parte Norte de Zacatecas. Tesis. UAAAN. Saltillo Coah. pp 4-30.

Zapien B. M. 1980. Evaluación de la Producción de Ixtle de Lechuguilla en cuatro sitios diferentes. In Memorias de la primera Reunión Nacional sobre Ecología y Domesticación de Plantas Útiles del Desierto. Monterrey Nvo. León México. pp 385-389.

## 11.- GLOSARIO

**Ixtle:** Fibra textil que proporcionan las plantas pertenecientes a la familia de las Agavaceas.

**Arpillera:** Tejido de cordeles de ixtle (costales).

**Cordelería:** Fabricación de lazos (cordeles) de ixtle

**Guishe:** Jugo proveniente de la pulpa de los Agaves.

**Xerófita:** Planta que crece en climas secos (desérticos)

**Matorral rosetofo:** Plantas cuyas hojas crecen en forma de roseta.

**Crasiosulifolia:** Planta dicotiledónea carnosa.

**Pivotante:** Con una raíz principal.

**Bracteas:** Hojas que emergen del pedúnculo floral.

**Monocarpica:** Con un carpelo.

**Somero:** Poco profundo

**Ápice:** Punta.

**Coriáceo:** Que tiene aspecto de cuero (hojas duras)

**Cogollera:** Herramienta utilizada para separar cogollos de la planta.

**Huajaca:** Morral tejido de ixtle y madera, utilizado para transportar cogollos.

**Tajadera:** Herramienta utilizada para cortar hojas de lechuguilla.

**Cares y Colas:** Presentación comercial de la fibra de exportación.

**Maraña:** Residuos de la fibra procesada industrialmente.

**Bagazo:** Residuo de la pulpa de lechuguilla al separarse de la fibra.

**Macerar:** Ablandar a base de golpes.

**Tallador:** Persona que se dedica a tallar el ixtle.

**Tallador:** Banco de madera que sirve para tallar el ixtle.

**Tallar:** Separar el bagazo o pulpa de la fibra de ixtle.

**Desfibrar:** Separar la fibra del bagazo

**Despulpar (descarnar):** Separación de la pulpa y la fibra de las pencas.

**Decitex:** Unidad de medición de la fineza (densidad lineal) utilizada en la industria textil consiste en calcular el peso en gramos de una cuerda de 10 000 metros. Esta unidad de medición se aplica en los países que utilizan el Sistema Internacional de Unidades

**Densidad:** Relación que existe entre la masa y el volumen que ocupan los cuerpos.

**Haz de filamentos:** Conjunto de filamentos fibrosos que conforman una fibra.

## 12.- ANEXOS

Anexo 1.- Planos de despiece de la Máquina Desfibradora de lechuguilla con las modificaciones propuestas para el órgano limpiador.