



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO.

FACULTAD DE INGENIERÍA

QUÍMICA.

“ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE
PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE
AGAVE MEZCALERO (*AGAVE CUPREATA*)”

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO.

PRESENTA:

NOÉ SALVADOR CASTILLO BUCIO.

ASESOR

DOCTOR EN INGENIERÍA QUÍMICA AGUSTÍN JAIME
CASTRO MONTOYA.

MORELIA, MICH., NOVIEMBRE 2014.





ÍNDICE.

ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.2 HIPÓTESIS	6
1.3 OBJETIVOS	6
1.3.1 GENERAL.....	6
1.3.2 ESPECÍFICOS	6
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 ANTECEDENTES	8
2.2 BALANCE ECOLÓGICO	12
2.3 ETANOL	15
2.4 BIOETANOL COMO COMBUSTIBLE VEHICULAR	16
2.5 BIOMASA.	21
2.5.1 COMPOSICIÓN DEL MATERIAL LIGNOCELULÓSICO.	27
2.5.2 COMPONENTES ESTRUCTURALES	31





I. Celulosa	31
II. Hemicelulosa.....	35
III. Tipos de Hemicelulosa.....	35
• Xilanos.	36
• Mananos.	36
• Galactanos.	37
• Galactoglucomanos.....	37
• Glucomananos.....	37
• Glucoroxilanos.	37
• Xiloglucanos.	38
• Glucanos.....	39
• Sustancias pécticas.....	39
IV. Lignina.....	40
V. Tipos de lignina.....	43
• Gimnoespermas (Ligninas G)	43
• Angioespermas leñosas (Ligninas G/S).	43
• Angioespermas Herbáceas (Ligninas HGS).....	43
2.5.3 COMPONENTES NO ESTRUCTURALES DE LOS MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS.....	44
• Agua.	44
• Cenizas.	44
• Extractos.....	44
• Proteínas.....	44
 3. AGAVE (MAGUEY).....	45
 3.1 DESCRIPCIÓN BOTÁNICA	48
3.2 AGAVE CUPREATA.....	49
3.3 DENOMINACIÓN DE ORIGEN EN MÉXICO PARA EL MEZCAL.....	50
3.4 ESTADÍSTICOS DEL AGAVE MEZCALERO.	52
3.5 MORFOLOGÍA, FISIOLOGÍA Y ENTORNO.	56
3.5.1 REGIÓN SEMIÁRIDA	60





I. Distribución de las zonas semiáridas.....	60
II. Tipo de suelos de las regiones semiáridas.....	61
III. Recursos Hídricos	64
I. Vertiente Pacífica	65
• Corrientes de la Región de la península de Baja California.....	65
• Región Alto Noroeste.....	65
• Región Noroeste Bajo.	66
• Región Lerma-Santiago.	66
• Región del Pacífico Centro.	66
II. Vertiente del Golfo de México.....	67
• Región Frontera Norte.....	67
• Región Golfo Norte.....	67
• Noreste de la Península de Yucatán.	67
III. Cuencas Cerradas.....	68
3.1.2 REGIÓN SUB-HÚMEDA	69
I. Distribución de la Región Sub-húmeda.....	69
• Tipos de Suelos en la Región Sub-húmeda.....	72
• Recursos Hídricos.	72
• Descripción de los ríos más importantes de la región sub-humedad.	73
3.6 SUELO.....	77
3.7 REQUERIMIENTOS AGROECOLÓGICOS DEL <i>AGAVE CUPREATA</i>.....	78
• Altitud	78
• Temperatura	79
• Precipitación.....	80
• Pendiente y acidez del suelo	80
3.8 ¿ES EL <i>A. CUPREATA</i> UNA BUENA MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL?	82
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	84
4.1 MATERIA PRIMA.....	84





4.2 REACTIVOS.....	84
4.3 EQUIPO	85
4.4 MÉTODOS.	86
• Pasos para la obtención de etanol a partir de <i>Agave cupreata</i>	86
I. Proceso de Caracterización.....	88
• Caracterización Física.	89
• Caracterización Química.	89
• Determinación de humedad.....	90
• Balance de Masa.	92
• Cuantificación de Azúcares Totales Reductores.	94
• Determinación individual de azúcares	96
• Caracterización Química de las fibras de las hojas y piña del <i>Agave cupreata</i>	98
• Determinación de las Regiones Óptimas para el Cultivo y Estimación de Producción de Bioetanol.....	102
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	104
5.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA PLANTA AGAVE CUPREATA.	104
• Determinación de las dimensiones de la planta.	104
• Determinación de las dimensiones y peso de las pencas.	106
• Porcentaje de Humedad.....	107
5.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA PLANTA.	109
• Cuantificación de Azúcares Totales reductores.	109
• Determinación Individual de Azúcares.	111
• Determinación de los Componente Estructurales en la Fibra del A. cupreata (Celulosa, Hemicelulosa y Lignina).....	113
• Estados de la Republica Mexicana con Potencial para la plantación de <i>Agave cupreata</i>	114
• Balance de Masa de la Piña de Agave Cupreata.	119
• Balance de Masa de las Pencas de Agave Cupreata.....	120
5.3 PROYECCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL.	121





6. CONCLUSIONES.....	122
7. RECOMENDACIONES.....	125
BIBLIOGRAFÍA.....	126
GLOSARIO.	134
ANEXO 1. HOJA DE SEGURIDAD DEL ETANOL.	139
ANEXO 2 TIPOS DE CLIMA EN MÉXICO.....	150





ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Consumo de energía Primaria a nivel mundial en 2008 según la Agencia Internacional de Energía (IEA).	10
Figura 2 Consumo de energía primaria en México.....	11
Figura 3 Ciclo del Bioetanol	12
Figura 4 Materias primas (biomasa) para la producción de etanol (FAO, 2008).	21
Figura 5 Producción mundial de etanol por materia prima utilizada (OCDE-FAO, 2011).	24
Figura 6 Estructura de la lignocelulosa. La celulosa, la hemicelulosa y la lignina forman estructuras llamadas microfibrillas, organizadas en macrofibras que regulan la estabilidad de la pared celular de las plantas (Tomada de Rubin 2008).	29
Figura 7 Clasificación de los componentes de los materiales lignocelulósicos.....	30
Figura 8 Representación de la estructura de la celulosa (proyección de Haworth).	31
Figura 9 Estructura base de la celulosa (Forma de silla).	32
Figura 10 Celulosa (polímero 1,4-O- β -D-glucopiranosido) forma de silla.	33
Figura 11 Representación de la estructura de microfibrillas.....	34
Figura 12 Lignina y Alcoholes cinamílicos.	42
Figura 13 Inflorescencia del <i>A. cupreata</i>	47
Figura 14 Diversidad Biológica <i>A. cupreata</i> . (CONABIO, 2006).	49
Figura 15. Estados con la Denominación de Origen del Mezcal (DOM).	52
Figura 17 Superficie cosechada (Ha.) vs Período (años) de los principales estados productores de agave mezcalero (SIAP, 2014).	53
Figura 16 Superficie sembrada de los principales estados para la producción de agave mezcalero (SIAP, 2014).	53
Figura 18 Porcentaje de Superficie cosechada de Agave Mezcalero.....	54





Figura 19 Gráfico del rendimiento de agave mezcalero para el 2011 de los diferentes estados productores.	56
Figura 20 Partes del <i>Agave</i> . (SEMARNAT).....	58
Figura 21. Regiones Hidrológicas Administrativas de México.	68
Figura 22. Tipos de suelos en México.	77
Figura 23 Diagrama de bloques para el aprovechamiento integral del <i>Agave cupreata</i> .87	
Figura 24 Proceso de prensado para separar la fibra y el jugo.	88
Figura 25 Interior de la presa tornillo (proceso de separación del jugo)	88
Figura 26 Secado de las muestras	91
Figura 27 Diagrama del proceso de extracción de los jugos de <i>A. cupreata</i>	92
Figura 28 Reacción que se lleva a cabo entre el azúcar reductor y el DNS.....	94
Figura 29 Soluciones obtenidas de la aplicación del método DNS.	95
Figura 30 Proceso de la Hidrólisis Ácida Cuantitativa (HAC).....	100
Figura 31 Conformación de la Planta	104
Figura 32 Penca de <i>A. cupreata</i>	104
Figura 33 Dimensiones de la Planta de <i>A. Cupreata</i>	105
Figura 34 Cromatograma del extracto de la Piña Cruda del <i>A. cupreata</i>	111
Figura 35 Cromatograma del extracto de las pencas de <i>A. cupreata</i>	112
Figura 36 Climas y disponibilidad de Tierras de la República Mexicana (García-García, 2014).	116
Figura 37 Vegetación y uso del Suelo en México (SEMARNAT, 2006).....	117
Figura 38 Potencial para la plantación de <i>A. cupreata</i> en orden descendente (clasificados en: Óptimo, Subóptimo y Marginal).	118
Figura 39 Diagrama del proceso de extracción de los jugos de la piña de <i>A. cupreata</i>	119
Figura 40 Diagrama del proceso de extracción de los jugos de las pencas de <i>A. cupreata</i>	120





ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1 Clasificación de la biomasa con base en sus diferentes generaciones tecnológicas para obtener biocombustibles. (REMBIO, 2011).	14
Tabla 2 Características del etanol frente a la gasolina (García-García, 2014).	18
Tabla 3 Rendimientos de materia prima para la producción de etanol.	22
Tabla 4 Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en fuentes de biomasa residual (%p/p seco) (Triana Caraton, 2010).	26
Tabla 5 Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en cultivos destinados a la producción de energía (%p/p peso seco) (Triana Caraton, 2010).	27
Tabla 6 Principales constituyentes de las hemicelulosas en materiales alternativos.	40
Tabla 7 Características de algunas especies del género <i>Agave</i>	46
Tabla 8 Porcentaje de Superficie cosechada de <i>Agave Mezcalero</i>	55
Tabla 9 Superficie y Precipitación media anual por región hidrológica administrativa 1941-2004 (CNA, 2005).	64
Tabla 10 Resumen Climático por Estado.	74
Tabla 11 Requerimientos del cultivo del <i>A. cupreata</i> según nivel de potencial agroclimático.	81
Tabla 12 Concentración de las soluciones para la curva patrón	96
Tabla 13 Dimensiones de la Planta de <i>A. cupreata</i> , correspondientes a la Figura 31...105	
Tabla 14 Dimensión de la penca correspondientes a la Figura 32.	106





Tabla 15 Porcentaje de humedad en la piña del <i>A. cupreata</i>	107
Tabla 16 Porcentaje de humedad en las pencas del <i>A. cupreata</i>	107
Tabla 17 Porcentaje de Humedad en el Bagazo de la Piña de <i>A. cupreata</i>	108
Tabla 18 Porcentaje de Humedad en el Bagazo de las Pencas de <i>A. cupreata</i>	108
Tabla 19 Contenido de ART en las fracciones del <i>A. cupreata</i>	109
Tabla 20 Identificación y cuantificación de azúcares presentes en la piña cruda del <i>A. cupreata</i>	111
Tabla 21 Identificación y cuantificación de azúcares presentes en las pencas del <i>A. cupreata</i>	113
Tabla 22 Rango del porcentaje en peso de materia seca para las fracciones del <i>A. cupreata</i>	114
Tabla 23 Datos para el análisis de la zonas con potencial para la distribución del <i>A. cupreata</i>	115





Resumen

Este documento pretende contribuir a la discusión en torno a la viabilidad de producir “bioetanol” en el país como alternativa energética, utilizando *Agave cupreata* como materia prima.

Se hizo la caracterización física y química del *Agave cupreata*, por diversos métodos para analizar el porcentaje de humedad, las dimensiones de la planta y sus fracciones por separado (piña y hojas), así como la cuantificación de azúcares reductores totales y cuantificación de azúcares individuales de los jugos de dichas fracciones. También se determinó la cantidad de materiales lignocelulósicos de las fibras de las fracciones.

Respecto al potencial de producción de bioetanol se aborda esencialmente:

1. El porcentaje de mezcla actual de bioetanol
2. La superficie con potencial para cultivar el *A. cupreata* en el país para satisfacer la demanda de biomasa para la producción del bioetanol, tomando en cuenta las características agro-ecológicas y climáticas donde se desarrolla la planta en el país sin afectar ni competir por el uso de suelo para otros cultivos agrícolas o forestales.

Palabras clave: Factibilidad, producción, bioetanol, *Agave Cupreata*.





Abstract

This paper aims to contribute to the discussion on the feasibility of producing "bioethanol" in the country as an energy alternative, using *Agave cupreata* as feedstock.

Physical and chemical characterization was done on the *Agave cupreata* plant, through miscellaneous methods to analyze the moisture content, the dimensions of the plant and its fractions separately (piña and leaves), as well as quantification of total reducing sugars and quantification of individual sugars from juices of such fractions.

The amount of lignocellulosic materials of the fibers of the fractions was also determined.

Regarding the potential for bioethanol production is addressed essentially:

1. The percentage of current bioethanol mixture
2. The surface potential to cultivate *A. cupreata* in the country to satisfy the demand of biomass for bioethanol production, bearing in mind the agro-ecological and climatic conditions where the plant is grown in the country and compete without affecting the use of land for other agricultural or forestry crops.

Keywords: feasibility, production, bioethanol, *Agave cupreata*.





1 Introducción

Hoy en día el bioetanol se produce a partir de diferentes sustratos (biomasa) como los granos de maíz en Estados Unidos y como la caña de azúcar en Brasil; dado que en México el azúcar y el maíz representan productos alimenticios de uso diario (canasta básica) al ser usados como biomasa, podría provocarse un posible aumento en el valor tanto del etanol como el de estos alimentos y el de sus productos derivados. Por lo que se han desarrollado otros procesos biotecnológicos con diversas fuentes de biomasa, a saber, residuos forestales, agroindustriales o pecuarios; una rotación rápida de plantaciones forestales; cultivos energéticos; componentes orgánicos de residuos sólidos urbanos, y otras fuentes de desechos orgánicos, con altos contenidos de celulosa y lignina.

Los biocombustibles representan un conjunto de amplias y diversas opciones para disminuir la creciente dependencia hacia los combustibles fósiles. Existen diferentes tipos de sistemas para la producción de dichos biocombustibles que no implican necesariamente el uso de alimentos como materia prima (biomasa). Por esto, vale la pena incluirlos para cubrir necesidades específicas dentro de las diversas alternativas para el transporte, particularmente en el periodo de la transición energética hacia las energías renovables. La bioenergía puede ser un complemento importante en esa transición, con la búsqueda de fuentes alternas de energía renovable para la generación de biocombustibles en gran cantidad y que se genere menos emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.





Al promover e incentivar el uso sustentable e integral de la bioenergía, México será capaz de hacer frente tanto a la seguridad de suministro energético como al cambio climático, fomentando simultáneamente una economía sostenible orientada al futuro con empleos verdes de alta calidad.

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad dos de las preocupaciones a nivel mundial son: satisfacer la demanda energética y disminuir las emisiones de gas de efecto invernadero generado por el uso de combustibles fósiles; para disminuir tanto la dependencia de estos combustibles (fósiles) y las emisiones de gases contaminantes, ha surgido la necesidad de crear fuentes de energía alterna a partir de biomasa (bioenergía).

En México el uso de materiales lignocelulósicos como lo es el *Agave cupreata* como materia prima para la elaboración de bioenergía, resulta atractivo debido a su bajo costo y su capacidad para adaptarse a climas extremos facilitando así la reproducibilidad de dicho agave en el territorio nacional, ya que es su mayoría son terrenos no aptos para cualquier otro cultivo de productos agropecuarios o forestales.

La rentabilidad del proceso de producción de etanol a partir de *Agave cupreata*, a nivel nacional, está comprometida por la falta de aprovechamiento integral del material lignocelulósico.





La cadena productiva del agave en el municipio de Villa Madero Michoacán, es importante por la superficie sembrada, niveles de producción y empleos generados localmente para la producción de Mezcal, sin embargo presenta diversas problemáticas ya que no se aprovecha todo el agave sembrado teniendo mermas en la materia prima del mezcal que pudieran ser utilizadas como materia prima para la producción del etanol, también se desechan todas las pencas (representan el mayor porcentaje en masa de la planta de *Agave cupreata*) las cuales no sirven para la producción del Mezcal.

Con el objetivo de ofrecer una alternativa a dicha problemática y con ello contribuir a la calidad de vida de la población local se propone el estudio del proceso de obtención de bioetanol a partir de la materia prima mencionada obteniendo un producto químico que le dé un valor agregado a la producción.





1.2 Hipótesis

El aprovechamiento integral del material lignocelulósico de *Agave cupreata* podría impactar favorablemente, con un alto potencial, sobre el proceso de producción de bioetanol a nivel nacional, ayudando así a incrementar el valor agregado de esta materia prima abundante en México.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Estudiar el potencial de producción de bioetanol a partir del uso integral de *Agave cupreata* (*A. cupreata*), utilizando como estudio especímenes de la región de Etúcuaro, localidad del municipio de Madero, Michoacán México.

1.3.2 Específicos

- A. Realizar un análisis de factibilidad de producción de etanol, así como la posible distribución del agave en el País (México), esto sin afectar ni competir con la producción de mezcal.
- B. Realizar la búsqueda de fuentes para la adquisición de la materia prima para su estudio dentro de la región de Etúcuaro.





C. Caracterización Física y Química de la planta de agave (piñas y pencas), para su empleo como materia prima en la obtención de bioetanol.

- Determinar las dimensiones y el peso tanto de la piña como el de las pencas del *A. cupreata*.
- Determinar el contenido de humedad tanto de la piña como las pencas de *A. cupreata*.
- Obtención del jugo de pencas y piña del *A. cupreata* para la determinación de azúcares reductores totales (ART) presentes en estos.
- Identificar el tipo de azúcares presentes tanto en la piña como en las pencas del *A. cupreata*
- Determinar el contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina presente en las fibras del *A. cupreata*.

D. Realizar la proyección, de la producción de biocombustible considerando las zonas potenciales para la plantación del *A. cupreata*.





2. Marco teórico

2.1 Antecedentes

La bioenergía puede obtenerse mediante diversas fuentes de biomasa, a saber, de residuos forestales, agrarios o pecuarios; una rotación rápida de plantaciones forestales; cultivos energéticos; componentes orgánicos de residuos sólidos urbanos, y otras fuentes de desechos orgánicos. Mediante diversos procesos, esos materiales pueden ser utilizados para producir de forma directa electricidad o calor, o para generar combustibles gaseosos, líquidos o sólidos. Las tecnologías de la bioenergía son muy diversas y su grado de madurez técnica varía considerablemente. Algunas ya comercializadas son las calderas de pequeño o gran tamaño, los sistemas de calefacción central por gránulos, o la producción del etanol a partir del azúcar y el almidón. Las centrales de energía avanzadas de ciclos combinados de gasificación integrada a partir de biomasa y los combustibles para el transporte obtenidos de la lignocelulosa y la producción de biocombustibles líquidos a partir de algas y otros métodos de conversión biológica se encuentran en la fase de investigación y desarrollo. Las tecnologías de la bioenergía tienen aplicaciones en contextos, tanto centralizados como descentralizados, y su aplicación más extendida es la utilización tradicional de la biomasa en los países en desarrollo. La producción de bioenergía suele ser constante o controlable. Los proyectos de la bioenergía dependen generalmente del combustible disponible a nivel local y





regional, aunque en los últimos tiempos parece haber indicaciones de que la biomasa sólida y los biocombustibles líquidos están cada vez más presentes en el comercio internacional.

A nivel mundial, según la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) estima que, en 2008 y tal como se muestra en la Figura 1, las energías renovables representaron un 12,9% de los 492 exajulios totales del suministro de energía primaria. La energía renovable más utilizada fue la biomásica (10,2%), en su mayor parte (aproximadamente un 60%) a partir de biomasa tradicional utilizada para cocinar y para la calefacción en los países en desarrollo, aunque con un componente creciente de técnicas biomásicas modernas. La energía hidroeléctrica representó un 2,3%, mientras que otras fuentes de energía renovables representaron un 0,4%. En 2008, las energías renovables representaron aproximadamente un 19% del suministro de electricidad mundial (un 16% de energía hidroeléctrica, y un 3% de otras energías renovables), mientras que los biocombustibles representaron un 2% del suministro de combustible mundial para el transporte en carretera. En conjunto, la biomasa tradicional (17%), las técnicas biomásicas modernas (8%) y las energías térmica solar y geotérmica (2%) cubrieron un 27% de la demanda mundial total de calor. La contribución de la energía renovable al suministro de energía primaria varía considerablemente según el país y la región.



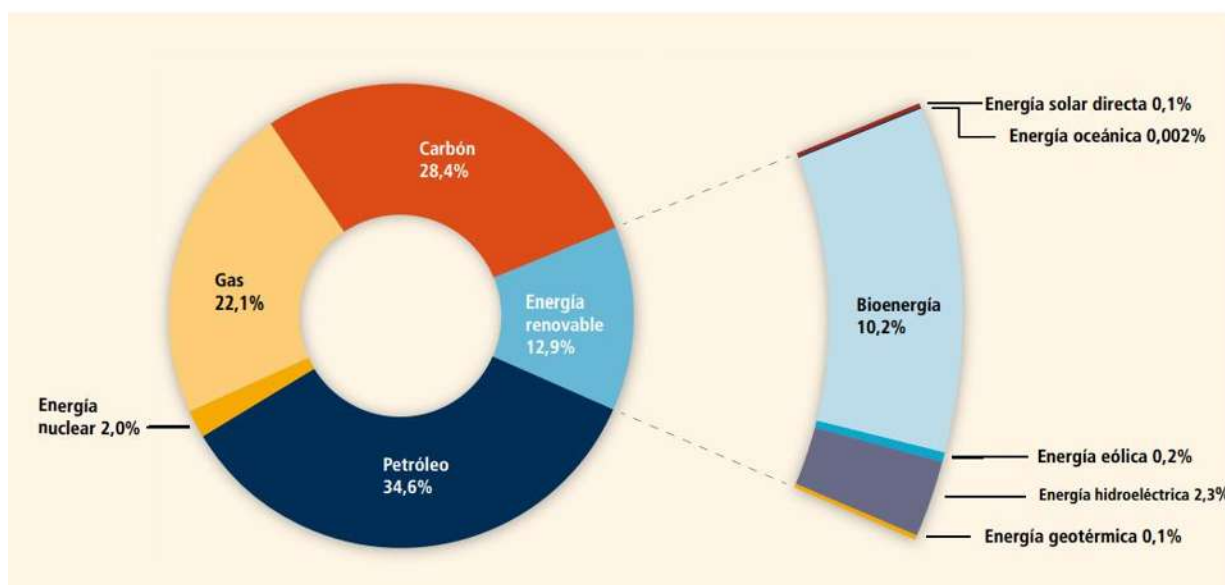


Figura 1 Consumo de energía Primaria a nivel mundial en 2008 según la Agencia Internacional de Energía (IEA).

Las tecnologías bioenergéticas modernas altamente eficientes hacen uso de sólidos, líquidos y gases, más convenientes como vectores de energía secundaria para generar calor, electricidad, cogeneración de calor y electricidad y combustibles para el transporte destinados a los diversos sectores. Los biocombustibles líquidos comprenden la cogeneración de calor y electricidad y el etanol para el transporte mundial por carretera y ciertos usos industriales. Los gases obtenidos de la biomasa (principalmente el metano) mediante la digestión anaeróbica de residuos agrícolas y el tratamiento de residuos sólidos urbanos se utilizan para generar electricidad, calor o ambos. La contribución más importante a estos servicios se obtiene del material sólido en forma de virutas, gránulos, madera recuperada de usos anteriores y otras variantes. La calefacción puede consistir en el calentamiento de interiores o del agua, como los sistemas de





calefacción central en barrios o ciudades. El suministro total estimado de la biomasa primaria mediante tecnologías bioenergéticas modernas se cifra en 11,3 EJ/año, y la energía secundaria suministrada a los consumidores de uso final, en torno a 6,6 EJ/año (Chum, et al., 2011).

En el ámbito nacional según la Secretaría de Energía (SENER), el consumo de energía primaria en México llegó a 8800.432 PJ en 2012 (SENER, 2013). La fuente principal de energía fue el petróleo, seguido del gas natural. Las energías renovables en México tienen una participación del 7%, en donde la hidroelectricidad representa el 1%

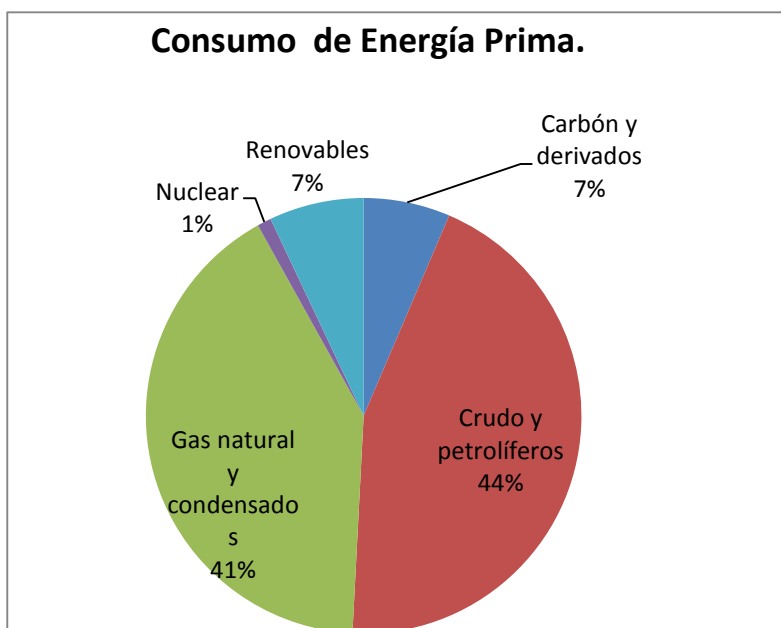


Figura 2 Consumo de energía primaria en México (SENER, 2013)

y la biomasa (leña y bagazo de caña) alcanza el 4%, mientras que la energía eólica y la geotérmica participaron con el resto según se muestra en la Figura 2.

Siendo la bioenergía la energía obtenida de la biomasa. La biomasa es la materia constitutiva de los

seres vivos, sus excretas y sus restos no vivos. Los biocombustibles son los obtenidos a partir de la biomasa y pueden ser o no transformados o procesados.





2.2 Balance Ecológico

Dado su carácter de combustibles fósiles, el petróleo y sus derivados contienen bióxido de carbono que ha estado almacenado en el subsuelo por millones de años, de tal forma que cuando se queman le suman a la atmósfera una cantidad de bióxido de carbono que no estaba presente en su equilibrio.

Actualmente es tal la cantidad de bióxido de carbono de origen fósil que se expide a la atmósfera, que se ha generado un desbalance provocando lo que se conoce como calentamiento global.

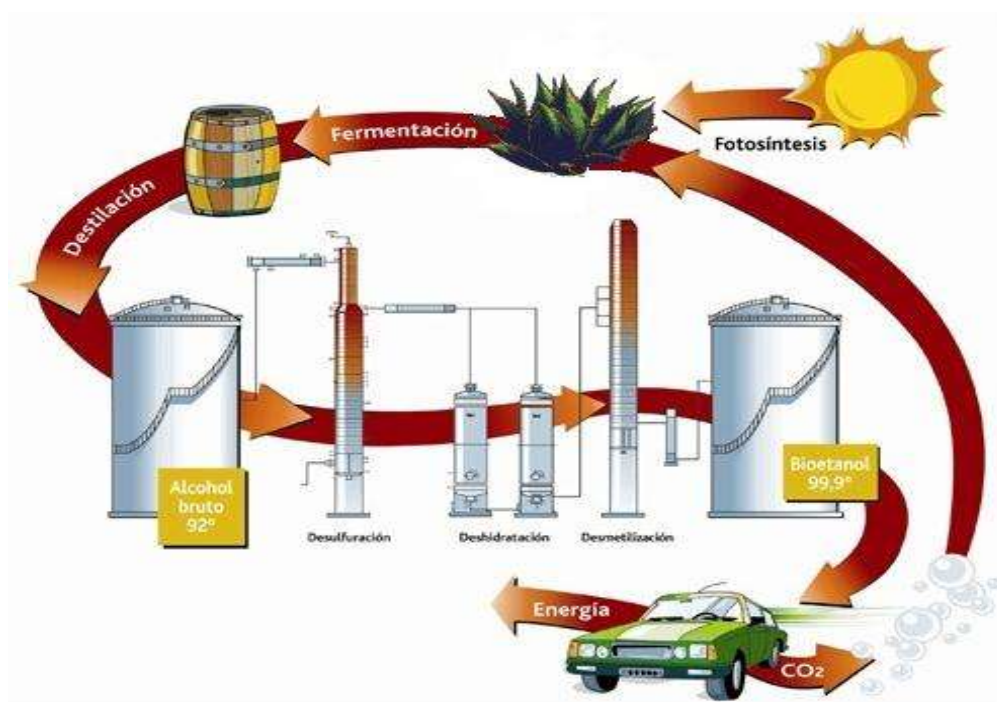


Figura 3 Ciclo del Bioetanol



En cambio, el bióxido de carbono contenido en los biocombustibles es el que capturaron los cultivos en su ciclo de vida, de tal forma que cuando quemamos el biocombustible le regresamos a la atmósfera una cantidad de bióxido de carbono que pertenece a su equilibrio y será vuelta a capturar por la materia agrícola. Así, el equilibrio, mostrado en la Figura 3, consiste en emplear la misma cantidad de bióxido de carbono que las materias primas absorben por medio de la fotosíntesis (SAGARPA).

Emplear etanol directamente (95% etanol y 5% agua) como biocombustible, podría proveer grandes beneficios ambientales debido a su baja presión de vapor y la reducción de emisiones de dióxido de carbono CO_2 , monóxido de carbono CO , y ozono O_3 en la atmosfera, si aunado a ello se emplean materiales lignocelulósicos para su elaboración se obtiene una combustión más limpia (Lynd, et al., 1991).

El uso de biocombustibles presenta las siguientes ventajas:

- Reducen la alta dependencia hacia los combustibles fósiles.
- Debido al desarrollo tecnológico en la producción de biocombustibles y a las tendencias del precio del petróleo, en un futuro cercano la conveniencia de usar biocombustibles serán todavía más alta.
- Promueven la agricultura debido a la alta demanda de cultivos energéticos.
- Crean empleos, tanto en la agricultura como en la industria de producción de biocombustibles.





- Reducen la emisión de bióxido de carbono.

La Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO A.C.) promueve desde el año 2006 el uso sustentable y eficiente de la biomasa con fines energéticos en el país. La bioenergía es una fuente de energía renovable extremadamente versátil, proveniente de material vegetal, residuos agropecuarios y forestales, entre otros, y se puede utilizar para la producción de combustibles sólidos (leña, carbón), líquidos (bioetanol, biodiesel) y gaseosos (biogás), así como para producir electricidad.

Los bioenergéticos (o biocombustibles) se clasifican según materia prima y también pueden ser clasificados de acuerdo a las tecnologías empleadas en su obtención (ver tabla 1).

Tabla 1 Clasificación de la biomasa con base en sus diferentes generaciones tecnológicas para obtener biocombustibles. (REMBIO, 2011).

BIOENERGÉTICOS	SÓLIDOS	LÍQUIDOS	GASEOSOS
1era generación	Leña, carbón vegetal, bagazo, pellets	Bioetanol, biodiésel, licor negro	Biogás, gas de síntesis
2da generación	Biochar, torrefactos	Etanol celulósico, syndiésel, aceite de pirólisis	
3era generación	—	Diésel de algas, etanol de algas	Biohidrógeno





2.3 Etanol

El etanol es un líquido incoloro derivado del alcohol, empleado en distintas concentraciones en la preparación de bebidas alcohólicas, en la medicina y en la industria.

El etanol, o alcohol etílico, es una sustancia con fórmula molecular C_2H_6O , que puede ser utilizada como combustible en motores de combustión interna con ignición a chispa (ciclo Otto) de dos maneras, básicamente:

1. Mezclas de gasolina y etanol anhidro.
2. Etanol hidratado.

Como biocombustible el etanol es más puro que el empleado para los otros fines. Por ejemplo, mientras que la pureza del etanol o alcohol etílico para la medicina y las bebidas alcohólicas es de 96% la del biocombustible debe ser del 99.5% al 99.9%.





2.4 Bioetanol como combustible vehicular

En la familia de los biocombustibles se encuentran el bioetanol, biodiesel, butanol, biogás el cual es una mezcla de metano y dióxido de carbono.

El bioetanol es un producto químico obtenido a partir de la fermentación de azúcares que se encuentran en los diferentes productos vegetales, tales como remolacha, caña de azúcar, sorgo, cereales o biomasa. La biomasa está compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina, junto con una pequeña cantidad de proteína, pectina, azúcares, clorofila, ceras y cenizas.

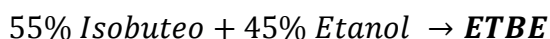
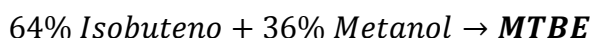
Como se observa en la Tabla 1, las materias primas de segunda generación contienen fibras celulósicas que pueden ser convertidas a bioetanol. Entre dichas materias primas se encuentra por ejemplo el bagazo de caña de azúcar, esquilmos agrícolas, residuos municipales, bagazo de agaves, etc.

Estados Unidos y Brasil utilizan una mezcla entre el 10% y 22% de etanol en gasolina, esta mezcla da como resultado un combustible que contiene 35% en masa de oxígeno lo que reduce las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y óxido de nitrógeno N_xO_y en la combustión (Wheals, et al., 1999). Además de que en comparación con la gasolina, el etanol contiene sólo una cantidad mínima de azufre; por lo tanto, su combustión ya sea pura o en una mezcla produce menos emisiones de óxido de azufre SO_2 , que es un componente carcinógeno de la lluvia ácida. (FAO, 2008).





El bioetanol puede ser empleado directamente como combustible o como un añadido a la gasolina en distintas concentraciones. La mezcla más común es para oxigenar a la gasolina, en una concentración de alrededor de 5%, remplazando a un oxigenante llamado éter metil tert-butílico (MTBE), que es altamente contaminante del suelo y del agua subterránea, el cual se usa en la actualidad como producto oxigenado sustitutivo del tetraetilo de plomo para mejorar el índice de octano. Este último tiene un índice de octano y poder calorífico ligeramente superior al MTBE, y su rendimiento de fabricación, a partir del isobuteno es más elevado. Por otra parte, en algunos países se prefiere emplear mezclas de etanol con gasolina después de transformar el etanol en etil terbutil éter (ETBE), que es el producto principal que resulta de la reacción en la que interviene una molécula de etanol y otra de isobuteno; el ETBE es una alternativa al MTBE.



En la Tabla 2 se muestran algunas características más importantes que presenta el etanol carburante frente a la gasolina.





Tabla 2 Características del etanol frente a la gasolina (García-García, 2014).

Característica	gasolina	etanol hidratado	etanol anhidro	ETBE
Densidad (Kg/l)	0.75	0.81	0.79	0.74
Volatilidad (Kg/cm2)	0.75	1.18	1.52	0.34
Auto ignición (°C)	367	560	550	570
Calor latente de vaporización (kJ/Kg)	376	1141	903	-
Poder calorífico inferior (PCI) (kJ/Kg)	42.9	24.9	26.8	36
Índice de octano (IOR)	95	110	106	118

De acuerdo a la legislación brasileña ANP 36/2005, el etanol anhidro debe contener menos del 0.06% de agua debido a que existen datos que demuestran que el agua puede ocasionar una emulsión (gasolina-alcohol-agua), que originan fallas mecánicas en los vehículos por gasificación en la bomba de gasolina (Reyes Habib, 2007), mientras que para el etanol hidratado esta concentración debe estar entre el 6.2% y 7.4%. Expresados como porción volumen a 20°C estos valores corresponden





respectivamente a una concentración máxima del 0.48 % para el etanol anhidro y una franja del 4.02% a 4.87% para el etanol hidratado. Según Pimentel, el etanol puede entregar 20 % más energía que la gasolina aumentando el cociente de compresión de 8:1 para la gasolina a 12:1 para el etanol (Pimentel, et al., 1980).

El etanol hidratado puro debe ser usado en motores fabricados o adaptados específicamente para este fin, en particular adoptando índices de compresión más elevados, buscando utilizar adecuadamente el octanaje más alto del etanol frente a la gasolina y obtener ganancias de eficiencia del 10%. En otras palabras, el mayor octanaje del etanol permite que los motores obtengan más energía útil del calor del combustible comparativamente a la gasolina. Otros cambios deben ser efectuados en el sistema de alimentación de combustible y en la ignición, para compensar las diferencias en la relación aire-combustible y otras propiedades. Además, debe haber algunos cambios de materiales en contacto con el combustible, como tratamiento anticorrosivo de las superficies metálicas de los tanques, filtros y bombas de combustible y sustitución de tuberías o adopción de materiales más compatibles con el etanol. Actualmente tras décadas de perfeccionamiento de motores especialmente fabricados para etanol, la tecnología automotriz ha evolucionado lo suficiente como para permitir que los vehículos a etanol puro hidratado tengan desempeño, maniobrabilidad, condiciones de arranque en frío y durabilidad absolutamente similares a los motores a gasolina.

Con la intensa utilización de la electrónica aplicada a sistemas avanzados de control de mezcla y de ignición, a partir del 2003 se lanzaron comercialmente en Brasil





vehículos con motores flexibles (flex-fuel), capaces de utilizar, sin cualquier interferencia del conductor, gasolina (con 20% a 25% de etanol), etanol hidratado, puro o mezclas de esos dos combustibles en cualquier proporción, según exigencias de eficiencia y maniobrabilidad y atendiendo a los límites legales de emisiones de gases de escape (Joseph, 2005). Los vehículos equipados con estos motores ya representan la mayoría de los vehículos nuevos vendidos en Brasil a partir de 2005 y, desde entonces, están perfeccionándose en términos de desempeño y funcionalidad de los sistemas de arranque en frío. Actualmente, existen más de 60 modelos diferentes, fabricados por diez montadoras de origen estadounidense, europeo y japonés, instaladas en Brasil. La concepción de vehículo flexible, como la adoptada en Brasil, permite que el usuario elija, según a su conveniencia, el combustible que usará, desde 100% de etanol hidratado hasta una gasolina con 20% a 25% de etanol. En Estados Unidos, en Canadá o en Suecia también se comercializan vehículos con motores flexibles, pero bajo otro concepto, operando en franjas de concentraciones de etanol que van desde la gasolina pura, sin etanol, hasta una mezcla con el 85% de etanol anhidro y el 15% de gasolina, producto que está disponible en cantidad creciente, pero todavía limitada.





2.5 Biomasa.

La biomasa tradicional ha sido definida por la IEA como el consumo de biomasa del sector residencial de los países en desarrollo, y hace referencia a la utilización, frecuentemente insostenible, de madera, carbón vegetal, residuos agrarios y estiércol para la cocina y la calefacción. Todos los demás usos de la biomasa son definidos como modernos.

La biomasa para obtener el bioetanol, reportada en la Figura 4, pueden ser madera, pastos, plantas maderables y herbáceas perennes de rápido crecimiento, bagazo, desperdicios de madera, aserrín, desperdicios agrícolas, papel de desperdicio, desperdicios sólidos municipales, desperdicios de las industrias procesadoras de alimentos, plantas acuáticas, algas, desperdicios de animales y demás materiales similares con valor energético.

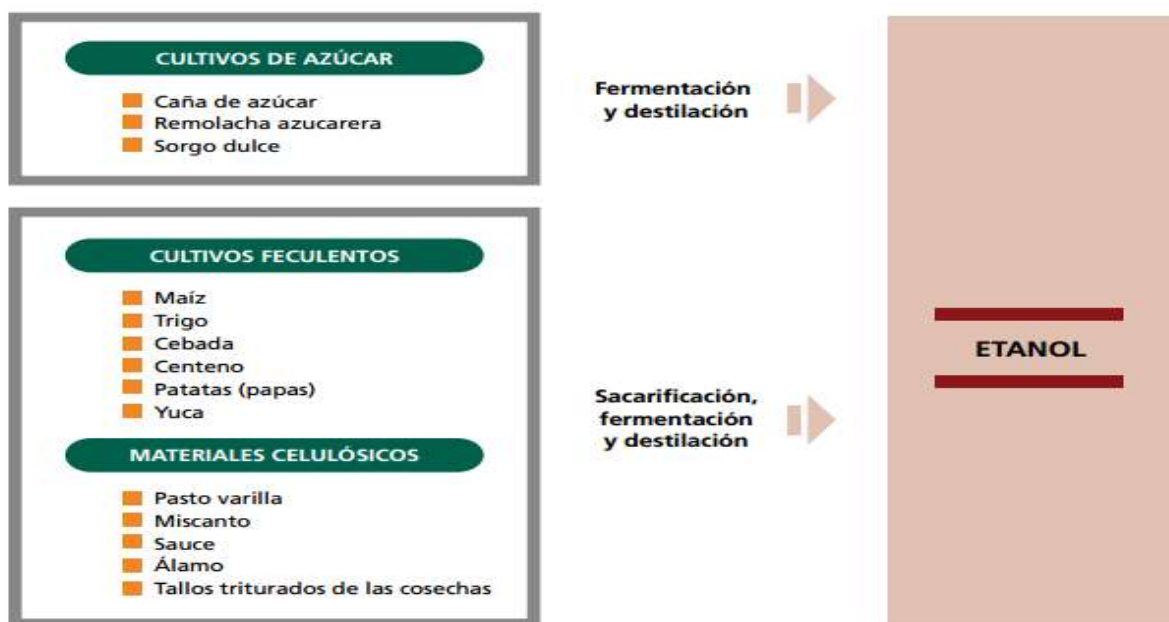


Figura 4 Materias primas (biomasa) para la producción de etanol (FAO, 2008).





Estas materias primas para la producción de etanol presentan diferentes rendimientos, debido al método de producción y a los países en los cuales son cultivados. Actualmente, la materia prima que presenta mejores rendimientos corresponde a la caña de azúcar y la remolacha azucarera.

La Tabla 3 indica los rendimientos por hectárea que se obtienen a partir de diferentes materias primas para la producción de etanol, y la estimación de los países que lo producen a nivel mundial (García-García, 2014).

Tabla 3 Rendimientos de materia prima para la producción de etanol.

CULTIVO	ESTIMACIÓN	RENDIMIENTO DEL CULTIVO (toneladas/ha)	EFICIENCIA DE LA CONVERSIÓN (litros/tonelada)	RENDIMIENTO DE BIOCOMBUSTIBLE (Litros/ha)
Remolacha Azucarera	Mundial	46	110	5060
Caña de Azúcar	Mundial	65	70	4550
Yuca	Mundial	12	180	2070
Maíz	Mundial	4.9	400	1960
Arroz	Mundial	4.2	430	1806
Trigo	Mundial	2.8	340	952
Sorgo	Mundial	1.3	380	494
Caña de Azúcar	Brasil	73.5	74.5	5476





Caña de Azúcar	India	60.7	74.5	4522
Maíz	Estados Unidos	9.4	399	3751
Maíz	China	5	399	1995
Yuca	Brasil	13.6	137	1863
Yuca	Nigeria	10.8	137	1480

Según la OCDE-FAO el maíz y la caña de azúcar deberán continuar siendo las principales materias primas para el etanol durante la próxima década. Mientras que para el 2020, se anticipa que 44% del etanol mundial se producirá a partir de cereales secundarios y 36% de la caña de azúcar. La producción de etanol celuloso deberá representar sólo 5% de la producción mundial. En los países desarrollados la proporción del etanol basado en maíz en el etanol total producido deberá bajar del 89% en promedio durante el periodo 2008-2010 hasta el 78% en 2020. El etanol basado en trigo deberá representar 6% de la producción de etanol en los países desarrollados, en comparación con el 3% representado en el 2011. El etanol basado en la remolacha deberá equivaler a casi 4% de la producción de etanol durante todo el periodo de proyección. Así mismo se prevé que la producción de etanol celuloso será cada vez más importante en los países desarrollados a partir de 2017, para representar alrededor de 8% de la producción total de etanol para 2020 (OCDE-FAO, 2011) tal como se aprecia en la Figura 5.





Bajo el término biomasa se incluye toda la materia orgánica que tiene su origen inmediato en un proceso biológico (Fernández, 1995). La formación de biomasa vegetal a partir de luz solar se lleva a cabo mediante la fotosíntesis, gracias a la cual se forman moléculas de alto contenido energético en forma de energía química. La producción de biomasa a escala global en el planeta es muy alta, estimándose que la fotosíntesis fija anualmente $2,2 \times 10^{11}$ toneladas de peso seco de biomasa, lo que supone unas diez veces la demanda energética mundial.

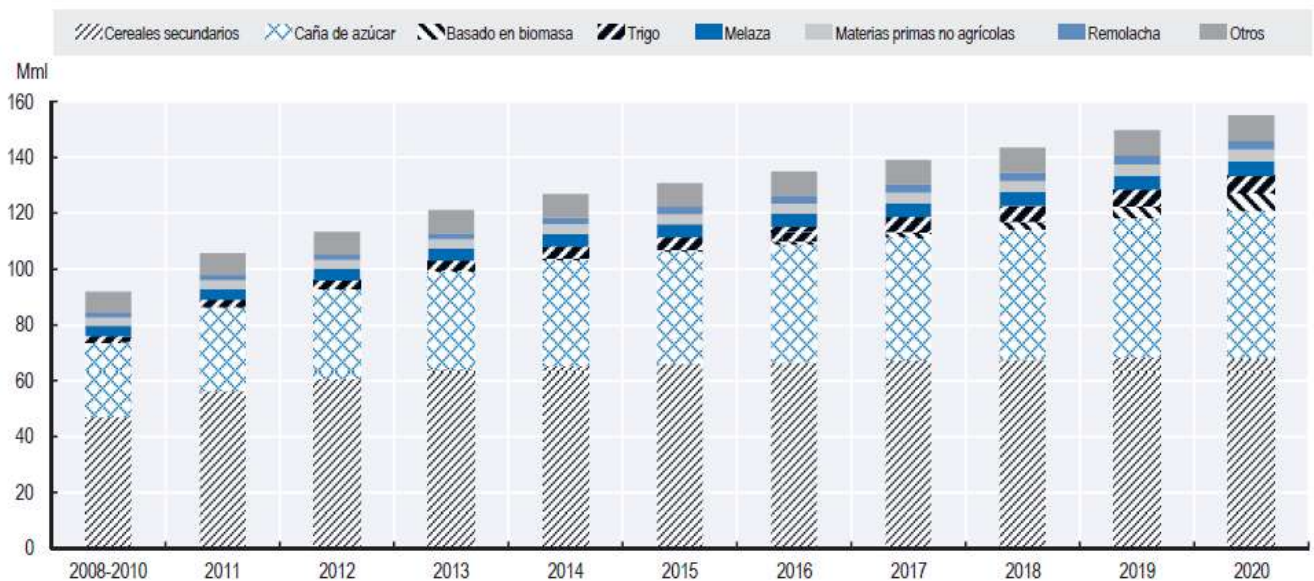


Figura 5 Producción mundial de etanol por materia prima utilizada (OCDE-FAO, 2011).





Atendiendo a su origen, la biomasa se puede clasificar en (Ballesteros, et al., 2001):

- Biomasa natural, producida en los ecosistemas naturales. Aunque es una de las principales fuentes energéticas en los países en vías de desarrollo, no es la más adecuada para un aprovechamiento energético masivo, ya que podría originar una rápida degradación de los ecosistemas.
- Biomasa residual, generada como residuo en los procesos productivos de los sectores agrícola, forestal e industrial. Los residuos agrícolas proceden de los cultivos leñosos y herbáceos, destacando los producidos en los cultivos de cereal. Los de origen forestal proceden de los tratamientos silvícolas, de mejora y mantenimiento de los montes y masas forestales. También se pueden considerar incluidos en este grupo los residuos de la industria papelera y la fracción orgánica de los residuos domésticos e industriales, los cuales no sólo no tienen valor económico en el contexto en que se generan, sino que suelen provocar problemas ambientales en su eliminación. En las Tablas 4 y 5 se muestran algunas fuentes de biomasa residual indicando su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina.





Tabla 4 Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en fuentes de biomasa residual (%p/p seco) (Triana Caraton, 2010).

Material	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
Paja de Cebada	36.8	17.2	12.3
Restos de Maíz	36-39	21-22	19-20
Paja de Arroz	32-47	19-27	5-24
Paja de Trigo	15-40	25-35	<8
Bagazo C. de Azúcar	40-45	30-35	20-30
Fibras de Maíz	13-18	35-40	7-8
Cascara de Arroz	15-36	12-35	8-16
Cascara de Soya	20-51	10-20	1-4

- Cultivos energéticos, son aquellos dedicados a la producción de biomasa para su utilización energética con fines no alimentarios. Se diferencian dos tipos: los orientados a la producción de materiales leñosos con especies de crecimiento rápido y los orientados a la producción de especies vegetales anuales en la siguiente tabla se muestran los más comunes y su composición.





Tabla 5 Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en cultivos destinados a la producción de energía (%p/p peso seco) (Triana Caraton, 2010).

Material	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
Álamo Híbrido	39-43	15-18.	27-28
Sauce	32-43	19-22	16-27
Heno	32-33	18-19	21-22

2.5.1 Composición del material lignocelulósico.

La lignocelulosa es el principal componente de la pared celular de las plantas, la cual se constituye de polisacáridos, compuestos fenólicos y compuestos minoritarios como lo son los minerales, lípidos, proteínas entre otros. Sin embargo, la composición y porcentajes de estos constituyentes en los materiales lignocelulósicos varían dependiendo de la especie de la planta, así como el tejido anatómico y fisiológico del organismo vegetal e incluso entre la edad y la etapa de crecimiento (ver Figura 6).

Dichos componentes reportados en la Figura 7, se clasifican como *estructurales* y *secundarios*. En los *estructurales* se encuentra tres polímeros, los cuales son la celulosa, lignina y hemicelulosa. Donde a celulosa forma cerca de un 50% del tejido de los materiales lignocelulósicos formado estructuras más complejas que las que se encuentran en las paredes pectocelulósicas. Su pared celular es constituida por un





entramado de microfibrillas de celulosa formando capas recubiertas de hemicelulosa y sobre las cuales se deposita lignina que representa un 30% del tejido. Dicha distribución permite crear y sostener la estructura de las plantas. Así, los tejidos con células lignificadas dotan a sus órganos principalmente a los tallos de mayor resistencia mecánica, además de mejorar su regulación hídrica y su resistencia a patógenos. En este sentido el aprovechamiento global del material requiere métodos de pretratamiento o fraccionamiento. Mientras que los componentes *secundarios* se encuentran en menor proporción y son de dos tipos: Componentes de bajo peso molecular, hidrosolubles o extraíbles en solventes orgánicos que son denominados extractos y por otro lado materias minerales que en los análisis químicos se estiman cenizas.



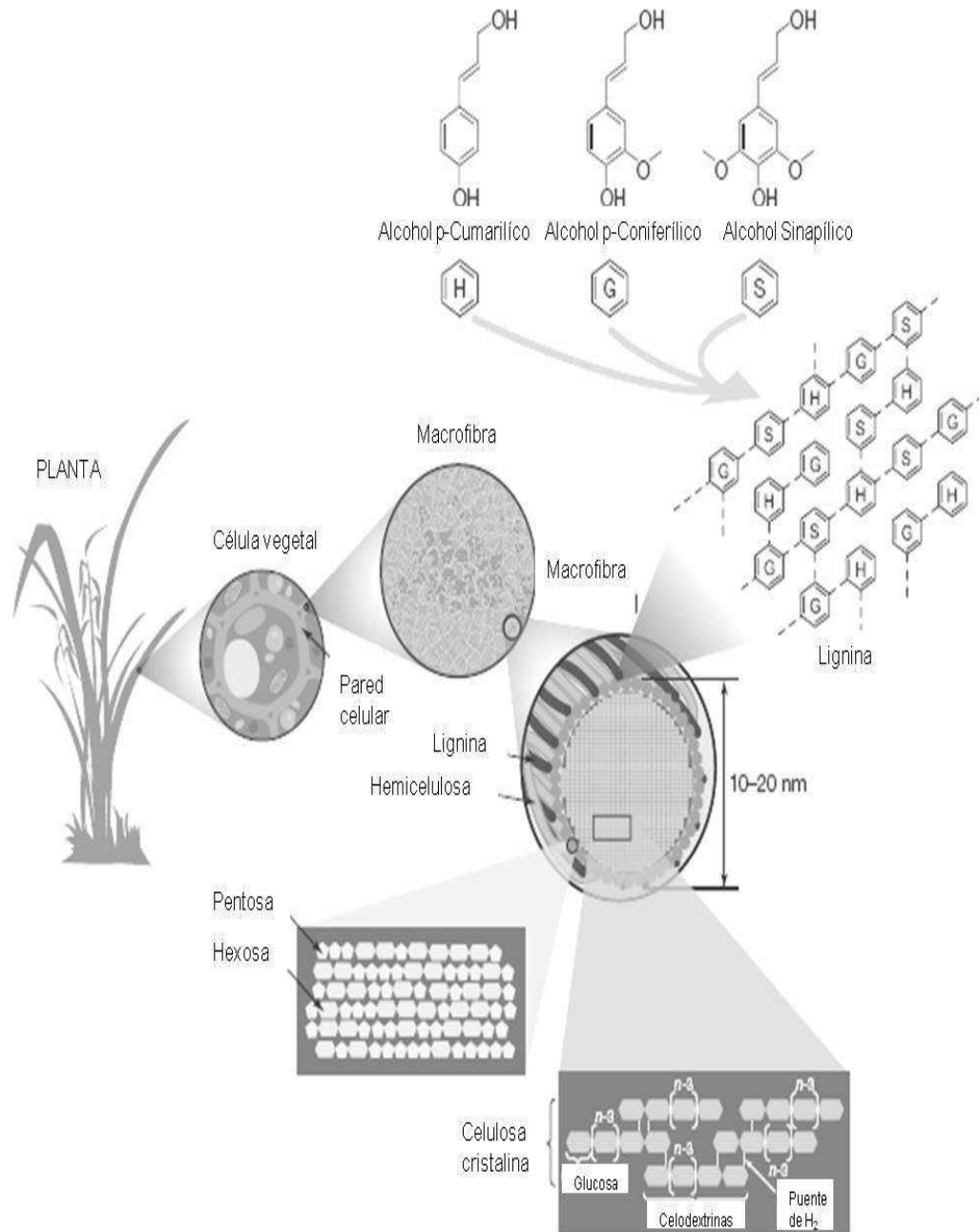


Figura 6 Estructura de la lignocelulosa. La celulosa, la hemicelulosa y la lignina forman estructuras llamadas microfibrillas, organizadas en macrofibras que regulan la estabilidad de la pared celular de las plantas (Tomada de Rubin 2008).



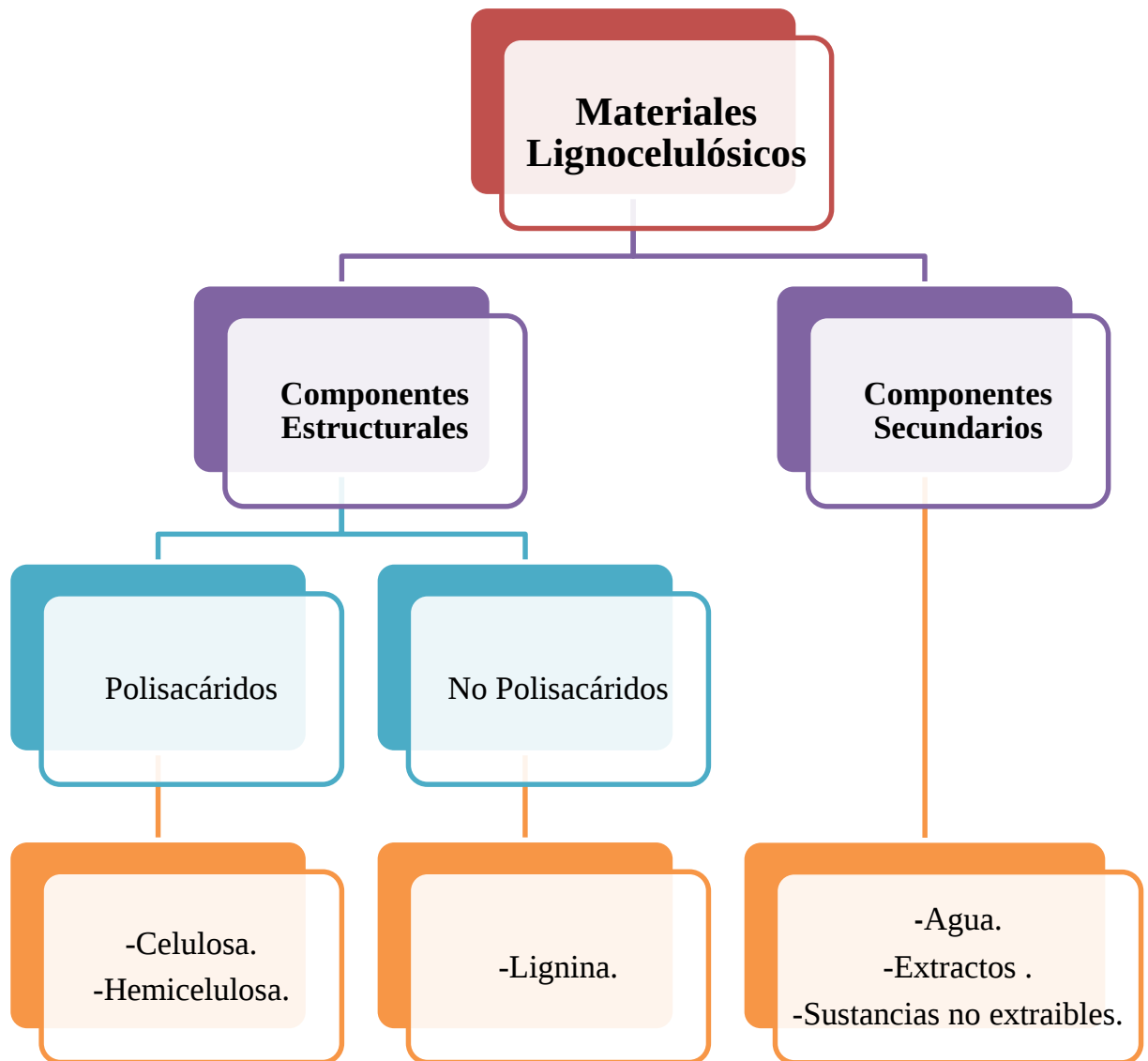


Figura 7 Clasificación de los componentes de los materiales lignocelulósicos.





2.5.2 Componentes Estructurales

I. Celulosa

La celulosa. Figuras 8,9 y 10, es un homopolisacárido lineal de elevado pesos molecular cuyo grado de polimerización va desde 200 hasta 10 000 unidades de D-glucopiranosido unidas por medio de enlaces glucosídicos (β -1,4). El enlace glucosídico, es formado por medio de la reacción del grupo -OH hemiacetalico del carbono anomérico (C_1) de la β -D glucopiranososa, en donde uno de los extremos de cada cadena presenta en el carbono anomérico un grupo aldehído de carácter reductor.

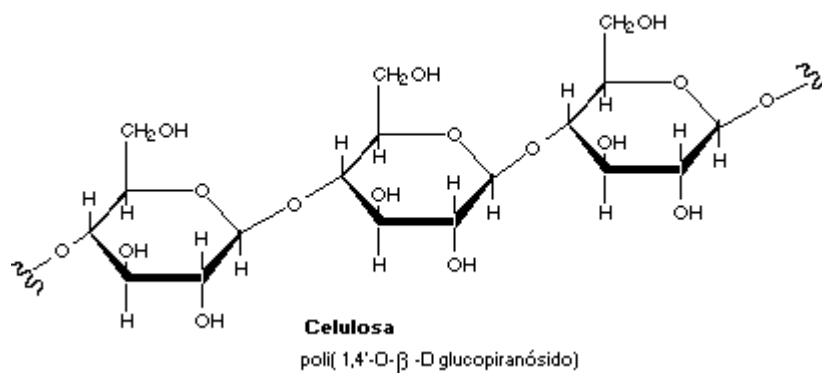


Figura 8 Representación de la estructura de la celulosa (proyección de Haworth).

La conformación de la piranosa, donde los carbonos y oxígenos son tetraédricos y la forma más estable es la de silla, presenta los grupos $\text{-CH}_2\text{OH}$, -OH y los enlaces





glucosídicos en posición ecuatorial, mientras que los hidrógenos se encuentran en posición axial. Lo anterior ocasiona que los grupos -OH salgan lateralmente permitiendo con ellos a la celulosa formar uniones inter e intramoleculares por puentes de hidrogeno dando lugar a las fibrillas elementales, las cuales se encuentra formadas por entre 40 y 100 cadenas de celulosa en donde se presentan zonas con una estructura cristalina, que le confieren a la celulosa gran resistencia, mientras que otras regiones son amorfas y se le otorgan elasticidad, la presencia de dichas regiones en la fibrilla elemental permite una mayor reactividad ya que gracias a ellas existe una mejor penetración de reactivos en el material con lo cual las enzimas del tipo de las celulasas pueden trabajar mejor si se aumenta la proporción en estas zonas.

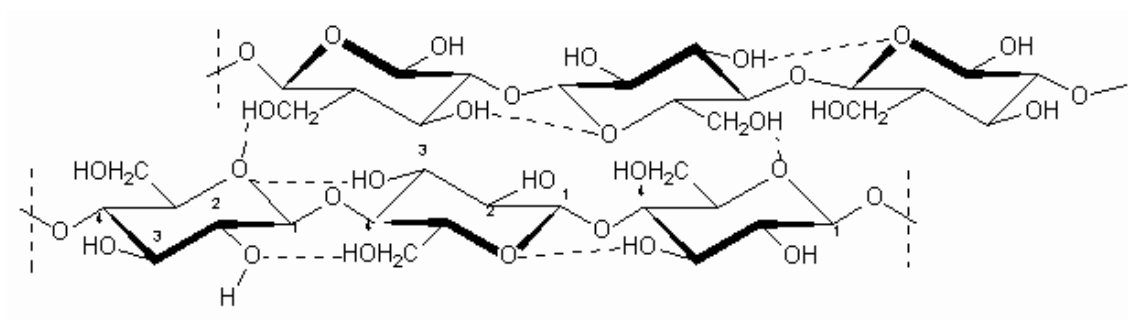


Figura 9 Estructura base de la celulosa (Forma de silla).



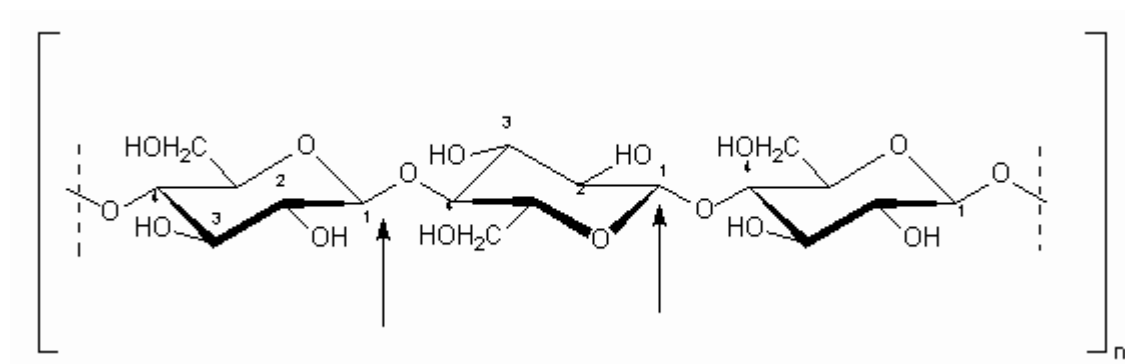


Figura 10 Celulosa (polímero 1,4-O-β-D-glucopiranosido) forma de silla.

Las microfibrillas, Figura 11, dan lugar a las paredes celulares de los vegetales, éstas pueden ser orientadas en diversas formas de acuerdo a la cantidad de capas de fibras elementales que posean. Este tipo de estructuras presentan grupos –OH formando puentes de hidrógeno en una estructura similar a una cinta que se encuentra cubierta en su superficie por hidrógenos de lo cual resulta una molécula hidrofóbica.



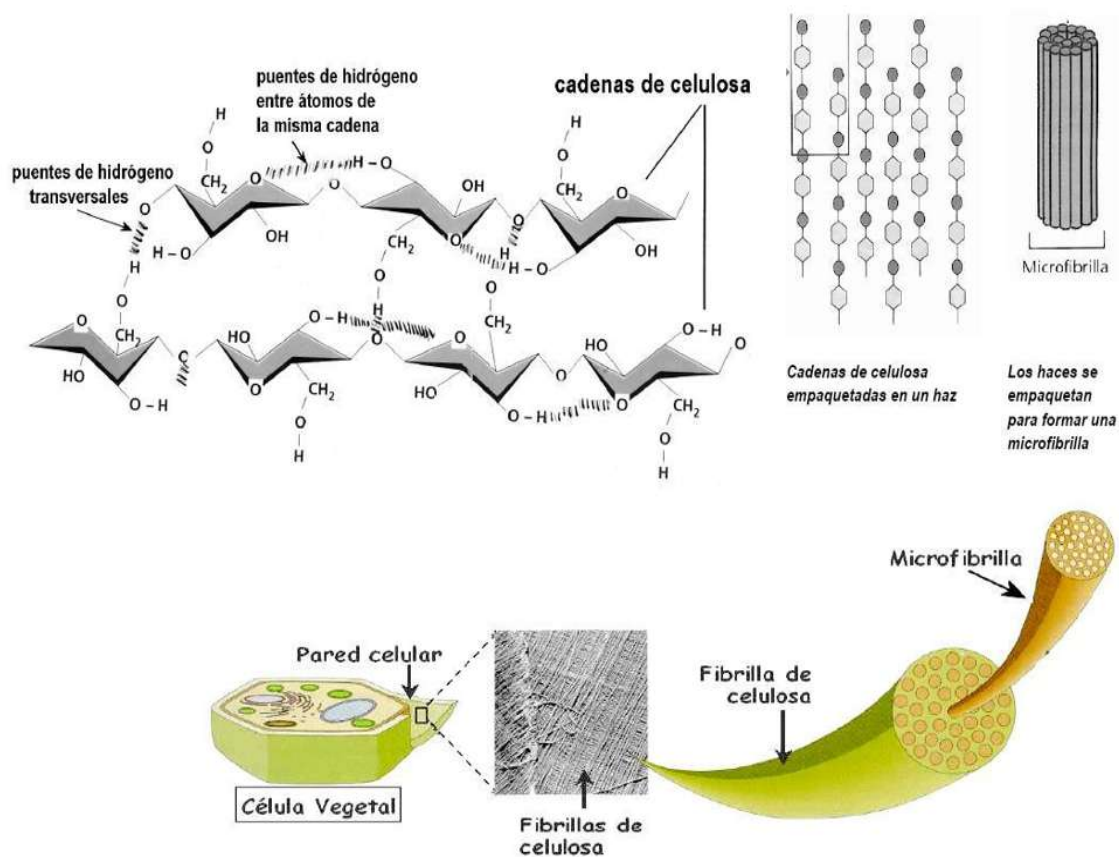


Figura 11 Representación de la estructura de microfibrillas.





II. Hemicelulosa

La hemicelulosa es un heteropolisacárido de bajo peso molecular. Su función en la pared celular es servir de puente de unión entre la celulosa y la lignina. Estas se encuentran en proporciones del 15 al 40%, variando mucho de un material a otro, siendo mayor en los materiales no madereros o alternativos a las maderas tradicionales que en los materiales madereros, que presentan mayores contenidos en celulosa y lignina.

Las hemicelulosas también se denominan poliosas, se encuentran constituidas principalmente por cinco monosacáridos dos de ellas son pentosas, la D-xilosa y la L-arabinosa y tres de ellas hexosas la D-glucosa, D-manosa y D-galactosa. También se les puede encontrar constituidas por algunas osas y derivados de éstas como ácidos urónicos (α D-glucurónico, α D-4-O-metilgalacturónico y ácidos galacturónicos α D-), y en muy raras ocasiones por la L-ramnosa, L-fucosa y algunos azúcares metilados neutros, por lo que la hidrólisis de éstas origina relativamente pocas unidades de azúcares.

III. Tipos de Hemicelulosa

A continuación se describen los diferentes polímeros que forman las hemicelulosas. La denominación que reciben varía mucho, siendo habitual que el nombre derive del monómero mayoritario (García-García, 2014):





- **Xilanos.**

Son los polímeros más largos y son el componente mayoritario de las hemicelulosas, se encuentran constituidos por la unión de residuos de β -D-xilopiranosas mediante enlaces (β -1,-4) con alrededor de unas 190 unidades de D-xilosa. Con frecuencia contienen monosacáridos derivados que se unen a la xilosa mediante enlaces (1α -2) ó (1α -3), las cuales son características para cada material lignocelulósico, algunos con grados de polimerización que van desde 90 a 130 pero con más cantidad de arabinosa, con algunas excepciones como la paja de trigo donde el 7.7% de las unidades de xilosa presentan ramificaciones de arabinosa, el 65% en el salvado de trigo, mientras que el maíz presenta enlace (β , 1-4) con sustituyentes de xilosa y galactosa.

- **Mananos.**

Son heteropolímeros con un grado de polimerización entre 100 y 150, su estructura está formada por un esqueleto de glucosa y manosa con los carbonos 2 y 3 parcialmente acetilados y unidos por enlace (β , 1-4). Presentan ramificaciones de galactosa, en las cuales se distinguen dos fracciones una mayoritaria que es pobre en arabinosa y otra rica en ella.





- **Galactanos.**

Son heteropolímeros minoritarios en todos los materiales lignocelulósicos en comparación con los de xilosa o manosa. Son muy solubles en agua y presentan una estructura muy ramificada con presencia de arabinosa, xilosa y ácidos urónicos.

- **Galactoglucomanos.**

Es una estructura formada por unidades de glucosa y manosa que se encuentran unidas por enlaces (β , 1-4) en una proporción de 3:1. Las unidades de galactosa se unen a la posición 6 de las unidades de manosa, mientras que en las posiciones 2 y 3, tanto de manosa como de glucosa, se pueden encontrar grupos acetilo. Cuando el contenido de unidades de galactosa es reducido, se da lugar a los glucomananos.

- **Glucomananos.**

Son polímeros lineales de glucosa y manosa unidos por enlaces (β , 1-4), con predominio de las manosas y que no representan ramificaciones ni grupos sustituyentes laterales.

- **Glucoroxilanos.**

(O-acetil-4-O-metilglucuronoxilano) son el tipo de hemicelulosa principal de maderas duras representan del 15-30% de su masa seca, y también puede contener pequeñas cantidades de glucomananos.





Los glucoroxilanos se componen de una cadena principal lineal de unidades β -D-xilopiranosil unidos por enlaces (β , 1-4) glicosídicos. Algunas unidades de xilosa son acetiladas en los C₂ y C₃ y una de diez moléculas tiene un grupo ácido urónico (4-O β -ácido- metilglucurónico) unido por enlace – (1,2). El porcentaje de grupos acetilo oscila entre el 8% y el 17% de xilano total, correspondiente, en promedio, a 3.5-7 grupos acetilo por 10 unidades de xilosa (Alén, 2000). El grupo 4-O-metilglucurónico lateral es más resistente a los ácidos que la β -D-xilanopiranosil y grupos acetilo. Además de estas unidades estructurales principales, los glucoroxilanos también pueden contener pequeñas cantidades de L-ramnosa y ácido galacturónico.

- **Xiloglucanos.**

Es un heteropolímero de glucosa y xilosa con trazas de otras cosas que presentan grupos acetilo. Consisten en β -1,4-D-glucosa ligada a la cadena principal con 75% de estos residuos sustituidos en O-6 con D-Xilosa. La L-arabinosa y residuos de D-galactosa se pueden unir a los restos de xilosa que forman cadenas laterales di- o triglicosil. Además en la L-fructosa se han detectado residuos unidos de galactosa (Maruyama, et al. 1996; Sims, et al. 1996). Estos polisacáridos predominan en las paredes celulares primarias de maderas duras (Dicotiledóneas y Monocotiledóneas) (Vries & Visser, 2001), aunque también pueden estar presentes en una proporción minoritaria gramíneas.





Los xiloglucanos interactúan con microfibrillas de celulosa, para la formación de enlaces de hidrógeno, constituyendo a la integridad estructural de la red de celulosa (Carpita y Gibeaut 1993; Vries y Visser 2001).

- **Glucanos.**

Son heteropolímeros ramificados que están constituidos principalmente por glucosa de grado de polimerización 200. Los materiales alternativos los presentan en proporciones bajas del orden 2 o 4 por 100g de materia seca.

- **Sustancias pécticas.**

Heteropolímeros que se caracterizan por presentar un esqueleto de unidades de ácido galactourónico. Se encuentran en la pared primaria y en la lámina en mayor proporción en células que no han lignificado. Forman la pectina, que es un compuesto cementante de la pared celular, por lo que se pueden considerar que los componentes que unen micelas, microfibrillas o células continuas son la lignina, la hemicelulosa, la pectina o sustancias pécticas.

En la Tabla 6 se muestran los componentes monosacáridos de algunos materiales lignocelulósicos.





Tabla 6 Principales constituyentes de las hemicelulosas en materiales alternativos.

Material	Xilosa	Manosa	Galactosa	Arabinosa	Gpos.	Ácidos
Lignocelulósico					Acetilo	Urónicos
Bagazo de Caña	21.5	0	0	2.7	-	-
Cascarilla de Arroz	12.3	2.7	0.1	2.6	-	-
Paja de cebada	15	1.3	1.7	4	-	-
Tallos de maíz	13-12.1	0-0.25	0.7-0.8	2.8-3.7	3.6	4.4
Zuros de maíz	29.1	0	0	2.8	-	-
Paja de arroz	13	1.6	0.4	4	-	-
Paja de sorgo	15	0.8	0.2	3	-	-
paja de trigo	16.9-18.5	0-0.7	0-0.7	1.6-2.1	2.4	2.2

IV. Lignina

La lignina, Figura 12, es un heteropolímero aromático, amorfo por la condensación de precursores fenólicos, de estructura tridimensional compleja y ramificada. Sus funciones principales son dar soporte estructural, rigidez, impermeabilidad y protección a los polisacáridos estructurales (celulosa y hemicelulosa) del ataque microbiano así como mantener unidas las fibras celulósicas, es por ello que resulta altamente resistente a la degradación química y biológica (Aro, et al., 2005).

Los monómeros que forman la lignina son los alcoholes cinamílicos, diferenciados entre sí, gracias a las diferentes sustituciones que presenta el anillo aromático. Así, el alcohol p-cumarílico da lugar a las unidades p-hidroxifeilo (unidades H) el cual no





presenta ningún sustituyente; el alcohol coniferílico da lugar a la formación de unidades guayacilo (unidades G) presentando un grupo metoxilo en la posición 3 del anillo aromático y el alcohol sinapílico que da lugar a las unidades siringilo (unidades S) presentados grupos metoxilo en posiciones 3 y 5 de dicho anillo (figura 12).

La polimerización de estos precursores durante la formación de la pared celular es producida por medio de la sucesión de una etapa enzimática y una etapa química. Siendo en la primera etapa oxidados los precursores por peroxidasas de la pared resultando radicales fenoxilo (Higuchi, 1990), que en seguida durante la etapa química reaccionan al azar entre ellos. En esta etapa se generan una gran variedad de formas resonantes que pueden reaccionar unas con otras, es por ello que la lignina no presenta una estructura única (Hernández, 1997).



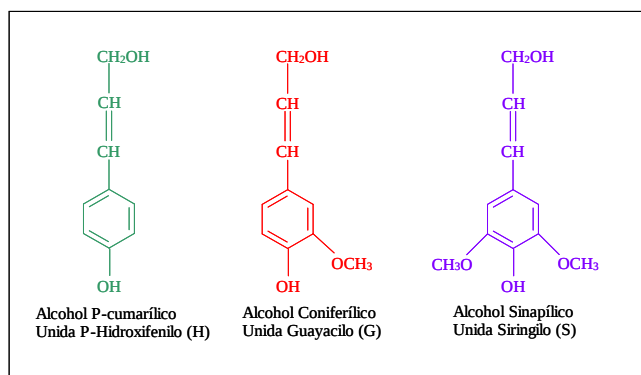
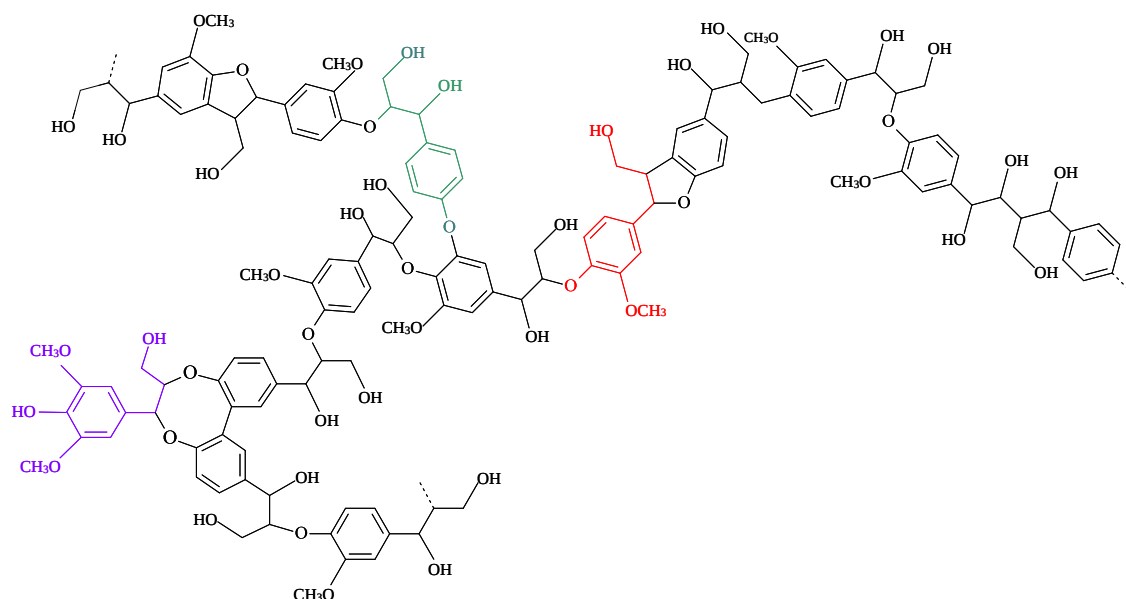


Figura 12 Lignina y Alcoholes cinamílicos.





V. Tipos de lignina.

Existen diferentes tipos de lignina según su grupo taxonómico al que pertenezcan las plantas.

- **Gimnoespermas (Ligninas G)**

Es el tipo de lignina más sencillo, se encuentran formadas por unidades del tipo G (guayacilo ó guayacilpropanos). Es posible encontrar unidades del tipo S en una proporción $S/G=1/10$ sin embargo, son menos frecuentes.

- **Angioespermas leñosas (Ligninas G/S).**

Están conformadas por unidades del tipo S y del tipo G aproximadamente en la misma proporción. Los grupos metóxilo, en posiciones 3 y 4, del anillo aromático permiten reducir la formación de los enlaces tipo éter, y sobre todo los enlaces C-C, con lo cual se reduce el grado de polimerización y en menor proporción la condensación.

- **Angioespermas Herbáceas (Ligninas HGS).**

Éste tipo de ligninas se encuentran las unidades tipo H también conocidas como tipo P Hidroxifeno ó P Hidroxifeil propanos) además de las ligninas más sencillas, es decir, las formadas por unidades de tipo G (Guayacil ó guayacilpropanos) y las de tipo S (Singiril ó Singirilpropanos). Este tipo de lignina se encuentra presente en el *Agave tequilana weber* (García-García, 2014).





2.5.3 Componentes No Estructurales de los Materiales

Lignocelulósicos.

Son aquellos componentes de los materiales lignocelulósicos que no forman parte de la estructura de la pared celular. Están presentes en cantidades que pueden llegar al 40% en peso del MLC, pero normalmente aparecen en intervalos de 5-10%.

- **Agua.**

Procede de los fluidos biológicos de la planta y del carácter higroscópico de estos materiales. Su proporción en los materiales lignocelulósicos depende de las condiciones ambientales.

- **Cenizas.**

Procedentes de sales minerales como cloruros y sulfatos y de incrustaciones (por ejemplo, sílice).

- **Extractos.**

Corresponden a restos de los fluidos biológicos de las plantas y se denominan así por ser fácilmente extraíbles con distintos disolventes sin necesidad de reacciones químicas. Su composición es muy heterogénea.

- **Proteínas**

De presencia intrínseca a la naturaleza de materiales vivos.





3. Agave (Maguey).

Los agaves, también conocidos como magueyes, han sido aprovechados por el hombre americano durante miles de años. México es el área con mayor diversidad en todo el mundo. De un total de 210 especies, México tiene 159, es decir el 75 por ciento, con 119 especies endémicas (García-Mendoza, 2012), entre los cuales, de unas quince especies se producen mezcales, fuertes bebidas alcohólicas, cada una con su propio sabor y aroma. Siendo el tequila el mezcal más famoso en el mundo. En los estados de Michoacán y Guerrero, al centro-sur del país, las comunidades campesinas aprovechan el maguey papalote (*Agave cupreata*) para la producción de mezcal. (Illsley, et al., 2005, p. 72).

Los agaves o magueyes son plantas de hojas en roseta, gruesas y carnosas, dispuestas sobre un tallo corto cuya piña inferior no sobresale de la tierra. El maguey es el nombre que se aplica a las especies del género *Agave* (*Amarilidáceas*). En la Tabla 7 se reportan características morfológicas de algunas especies de agave.

Se presentan y desarrollan mejor en ambientes áridos y semisecos aunque también, como ornamento, se adaptan a ambientes templados y húmedos. El nombre **Agave** proviene del griego y significa admirable. Este nombre fue elegido por Carl von Linneo, un naturalista sueco, para clasificar a la familia botánica de los magueyes en el año 1753. (Mezcalpedia, 2011).



Tabla 7 Características de algunas especies del género *Agave*.

Nombre Científico	Altura de planta (m)	Anchura de planta (m)	Forma de la hoja	Habito de crecimiento	espinas laterales	Longitud hoja (cm)	Ancho de hoja (cm)	Longitud de la espina terminal (cm)	Años de maduración
<i>A. angustifolia</i>	1,9	2,5	linear-lanceolada	Rosetófilia acaule	presente	136	9,2	2,7	6-7
<i>A. comvallis</i>	0,7	1	oblonga	Rosetófilia acaule	presente	45	9	2	6-7
<i>A. marmorata</i>	1,8	3,2	ampliamente lanceolada	Rosetófilia acaule	presente	148	28,3	3,3	
<i>A. karwinskii</i>	2,6	1,4	linear	Rosetófilia arborescente	presente	62	5,2	2,9	
<i>A. patatorum</i>	0,6	0,8	ovada	Rosetófilia acaule	presente	34	13,1	3,9	6-7
<i>A. seemanniana</i>	0,9	1,3	espatulada	Rosetófilia acaule	presente	50	13,6	4,9	
<i>A. sp.</i>	1	1,3	lanceolada	Rosetófilia subcaulescente	presente	143	15	1,6	

INIFAP con información de: (Arredondo & Espinosa, 2005); (Espinosa, et al., 2002).



El maguey vive entre cinco y setenta años, según la especie, antes de producir cientos de flores que ofrecen néctar a insectos, aves y murciélagos a cambio del polen de otros individuos de su especie.

La mayoría de los magueyes desarrollan sus flores en ramas; otros en una inflorescencia, Figura 13, formada por un eje principal alargado llamado espiga o quiotes o calehual (del náhuatl *quiotl* = tallo, brote). Las flores, conocidas como hualumbos, fertilizadas producen las semillas que el viento y la lluvia dispersan. Después de florecer y reproducirse sexualmente, el maguey muere.



Figura 13 Inflorescencia del *A. cupreata*. produjo, es decir, son clones.

Las semillas heredan y mezclan los genes de la planta madre y de la otra de la cual proviene el polen. Los magueyes tienen una forma alternativa de reproducirse, que es por medio de bulbillos e hijuelos. Los primeros son los que se desarrollan a partir de una yema, mientras que los segundos son los retoños más vigorosos, que nacen en el cuello de la planta. Tanto bulbillos como hijuelos son genéticamente iguales a la planta que los





3.1 Descripción Botánica

Plantas perennes, generalmente con vástagos presentes, en ocasiones bulbíferas a nivel de la inflorescencia, raíces fibrosas con desarrollo radial poco profundo, acaules o con tallos cortos y gruesos, simples o ramificados; hojas grandes dispuestas en roseta, con frecuencia suculentas, ápice con espina terminal, márgenes enteros, provistos de dientes aculeiformes, o bien, filíferos; inflorescencia espigada, racemosa o paniculada, flores protándricas, segmentos del perianto unidos en un tubo de longitud variable, iguales o dimórficos, erectos o curvados, imbricados; estambres exertos, filamentos con inserción en el tubo o en la base de los segmentos, anteras versátiles; ovario suculento, de paredes gruesas, óvulos dispuestos en dos series por lóbulo, estilo alargado, filiforme, tubular, estigma trilobado, papiloso-glandular; cápsula globosa, oblonga o suboblonga, loculicida; semillas planas negras.





3.2 Agave Cupreata

El *A. cupreata*, tal como se reporta en la Figura 14, crece exclusivamente en las laderas de la cuenca del río Balsas, en Michoacán, Puebla y Guerrero, a altitudes de 1220 y 1850 metros sobre el nivel del mar (msnm), en la transición entre bosque tropical seco a los encinares y en los bosques de pino-encino. (Gentry, 2004).



Figura 14 Diversidad Biológica *A. cupreata*. (CONABIO, 2006).

Como los demás magueyes (agaves) silvestres, el *A. cupreata*, es una especie que crece en zonas forestales y florece sólo una vez, al final de su vida, la cual puede durar entre siete y doce años. La planta justo antes de florecer, concentra sus jugos y mieles en el tallo, oculto por las hojas; es momento de cosecharla para producir mezcal.





A diferencia de otros magueyes, que se propagan por semillas e hijuelos, el *A. cupreata* se reproduce exclusivamente por medio de semillas y depende totalmente de los **polinizadores**, como murciélagos y abejas. Por ello, para asegurar la existencia de los magueyales es necesario permitir y favorecer la producción de suficientes flores, frutos y, finalmente semillas.

Las comunidades indígenas campesinas guerrerenses han establecido normas y acuerdos para regular la cosecha del maguey papalote, de modo que cada año plantas para semillero, se dispersen semillas y se formen manchones de maguey. También tienen normas que impiden el corte de plantas inmaduras y se establecen épocas de veda; se exige que se cambien cada año las áreas de aprovechamiento y haya mecanismos de distribución social de beneficios. En las comunidades donde las instituciones locales son fuertes, estas reglas se observan y las poblaciones de maguey se encuentran en buen estado.

3.3 Denominación de Origen en México para el Mezcal.

La designación de productos agroalimentarios con el nombre de su lugar de producción para su distribución y venta es una práctica que le confiere a dichos productos de un valor especial o un mérito particular al ser reconocida la fuente de unión entre el entorno natural (suelo, geografía, topografía, clima, etc.), el hombre y sus especificidades históricas y culturales es decir, cultivo, métodos de producción y transformación. Todo ello en conjunto propicia las características propias y la calidad de





los productos. De aquí surge la llamada denominación de origen, la cual es definida como aquella que utiliza el nombre de una región o lugar geográfico de un país para designar un producto originario, cuya calidad o características se deben exclusivamente a este medio geográfico resultado de factores naturales y humanos.

En 1997 se firmó el acuerdo de reconocimiento mutuo para la protección de las denominaciones de origen en el sector de bebidas espirituosas entre México y la Unión Europea, a través del cual, México reconoció 193 distintas denominaciones de origen de bebidas destiladas; le otorgaron las denominaciones relativas al tequila y mezcal. Respecto a Estados Unidos y Canadá, mediante el tratado de libre comercio, se encuentran protegidas las denominaciones “tequila” y “mezcal”, como productos únicos y distintivos de México. En nuestro país, el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) es el organismo que, entre sus facultades, puede emitir declaratorias de protección a denominaciones de origen y autorizar el uso de las mismas, haciendo notar que el estado mexicano es titular de dichas denominaciones.

Dada la diversidad de orígenes en el mezcal, la iniciativa de gobiernos estatales y productores se llevó a que en 1994 la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI) emitiera la resolución mediante la cual se da la denominación de origen del mezcal a los estados (ver Figura 15): Oaxaca, Guerrero, San Luis Potosí, Durango, Zacatecas, once municipios de Tamaulipas y un municipio de Guanajuato (Valenzuela-Zapata, 2007), a finales del 2012 mediante un Manifiesto de Impacto Regulatorio, la Comisión Federal de Mejora Regulatoria otorgó a 29 municipios del estado de Michoacán la Denominación de Origen para comercializar “Mezcal” (DOM).





Figura 15 Estados con la Denominación de Origen del Mezcal (DOM).

3.4 Estadísticos del Agave Mezcalero.

Como se puede apreciar en la Figura 16 la producción de agave mezcalero expresado en hectáreas cosechadas muestra un incremento constante, sobre todo a partir de 2007 en los principales estados productores, colocando a Michoacán como el segundo productor de agave mezcalero (Oaxaca se coloca como el primer productor de agave mezcalero pero para una mejor apreciación de los estadísticos se descartó del estudio) ,





como se podrá observar más adelante, se espera que esta variable se mantenga a la alza dado que la superficie sembrada también lo está haciendo.

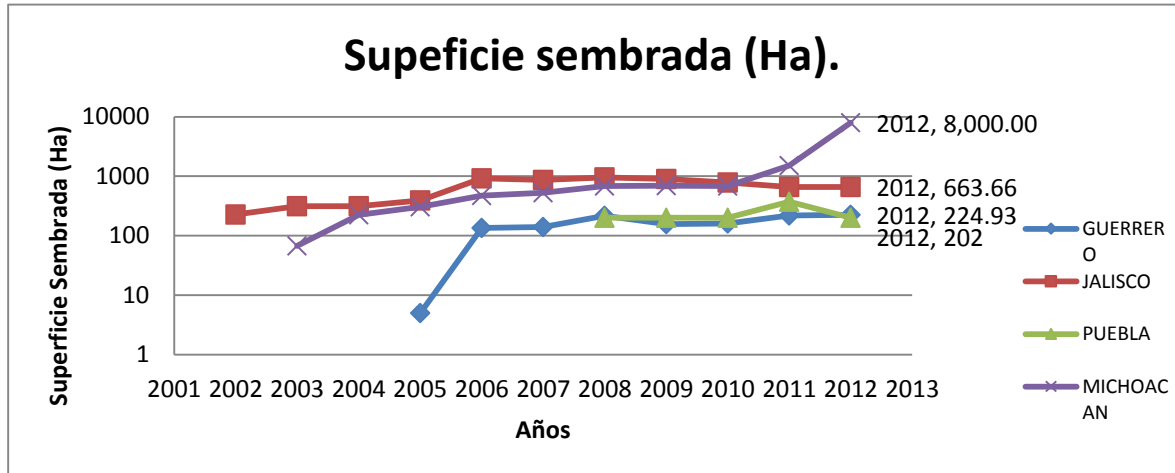


Figura 16 Superficie sembrada de los principales estados para la producción de agave mezcalero (SIAP, 2014).

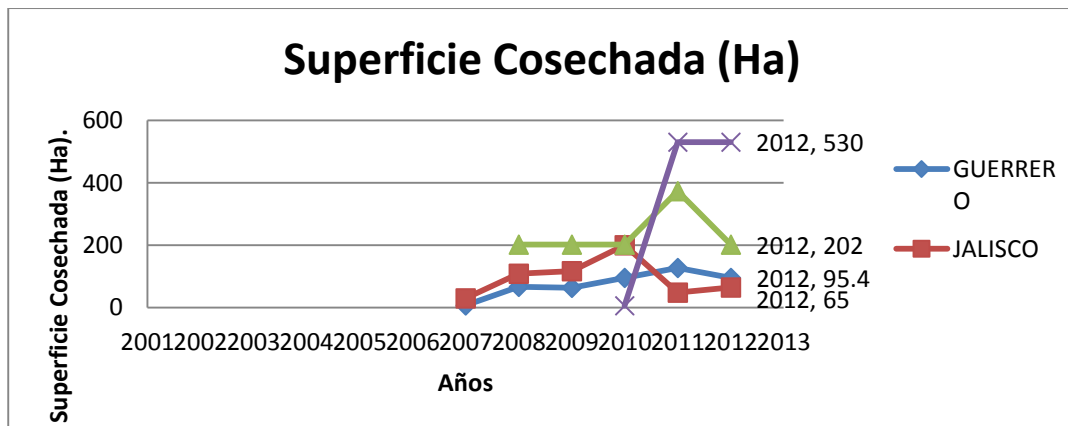


Figura 17 Superficie cosechada (Ha.) vs Período (años) de los principales estados productores de agave mezcalero (SIAP, 2014).





La producción de agave mezcalero se concentra principalmente en el estado de Oaxaca (este estado se representa en las Figuras 16 y 17 para tener una mejor apreciación de los estadísticos de los otros estados), siendo Michoacán el segundo lugar, inclusive por encima de Jalisco, como se muestra en la Figura 18 y Tabla 8, el cual podemos inferir tiene una producción más limitada dado que los cultivos están destinados principalmente a la producción de agave tequilero dada la denominación de origen que posee.

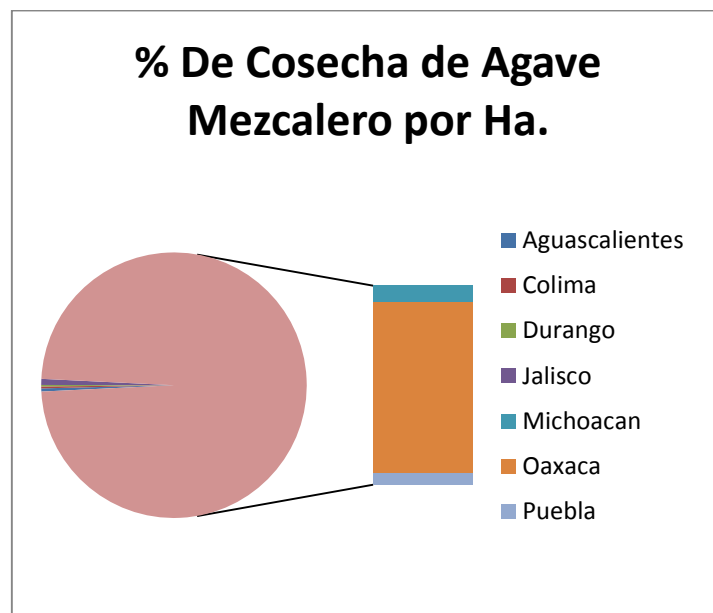


Figura 18 Porcentaje de Superficie cosechada de Agave Mezcalero.





Tabla 8 Porcentaje de Superficie cosechada de Agave Mezcalero.

Cosecha de Agave Mezcalero	
Estado	%
Aguascalientes	0.382684301
Colima	0.22961058
Durango	0.183688464
Jalisco	0.734753857
Michoacán	8.112907176
Oaxaca	84.63445996
Puebla	5.721895665

Analizando la Figura 19 observamos la superioridad en el rendimiento de agave mezcalero de Michoacán frente a los principales estados productores, es decir, comparado con el principal productor (Oaxaca) es posible obtener una producción mayor con una superficie sembrada menor. Esto se debe a que como se explicó en el apartado anterior, las características biológicas de la familia de las *agaváceas* hacen propicio su crecimiento y desarrollo en nuestro entorno (Michoacán).



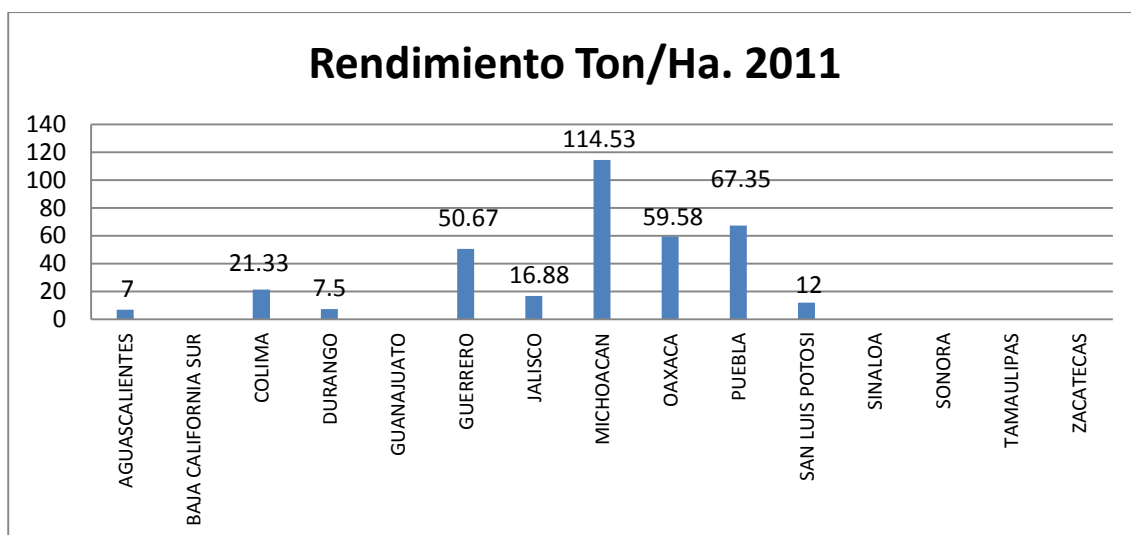


Figura 19 Gráfico del rendimiento de agave mezcalero para el 2011 de los diferentes estados productores.

3.5 Morfología, fisiología y entorno.

Los magueyes, (figura 20), son plantas xerófitas, adaptadas a vivir en condiciones climáticas desfavorables, con largos periodos de sequía y altas temperaturas. Las especializaciones morfológicas a las condiciones adversas consisten en modificaciones en la estructura básica de una planta como respuesta a las presiones del ambiente. Los agaves poseen estrategias para sobrevivir en ambientes secos o periódicamente secos, especialmente en el suelo, con fuertes fluctuaciones de temperatura entre el día y la noche, las cuales tienden a limitar la pérdida de agua por transpiración y a acumularla en tejidos especializados.





El desarrollo de succulencia en las hojas es una de sus adaptaciones más conspicuas, ya que el agua almacenada durante la época de lluvias permite que las plantas sobrevivan durante algún tiempo en ausencia de suministro de agua del exterior, lo que ocurre cuando las condiciones del suelo son tales, que la raíz ya no es capaz de extraerla de él.

El sistema de la raíz de los agaves es superficial, lo cual facilita la absorción de agua de lluvia, generalmente escasa, que sólo humedecen la superficie del suelo; de tal manera que la probabilidad de supervivencia de una roseta en sequías prolongadas depende del volumen de agua y de los carbohidratos almacenados durante la época favorable. Asimismo, en época seca el agua almacenada ayuda a mantener las reacciones bioquímicas y la apertura de estomas para la asimilación de carbono (CO_2), aun en condiciones prolongadas de sequía, que pueden durar hasta siete años. El abundante desarrollo de fibras en los tejidos de las hojas mantiene su rigidez durante los periodos de pérdida de agua, logrando con esto que no se deformen los tejidos; esta función se complementa con la presencia de dientes en el margen y una espina terminal.





Son varias las características de los agaves que les permiten evitar una excesiva transpiración; una reducción en la superficie que transpira en relación con el volumen total del órgano, la presencia de una cutícula gruesa en la epidermis de la hoja, la acumulación de cera en la superficie y la presencia de estomas de naturaleza compleja que aseguran una protección adicional contra la evaporación durante los periodos de sequía. El excesivo calentamiento de la lámina foliar disminuye con el arreglo de las hojas en el espacio (filotaxia) y la orientación favorece la sombra de unas sobre las otras. El bandeo de las hojas con segmentos alternantes claros y oscuros se debe a las variaciones en el grosor de la cutícula y, aparentemente, se origina por condiciones irregulares de crecimiento, que dependen de las condiciones climáticas.

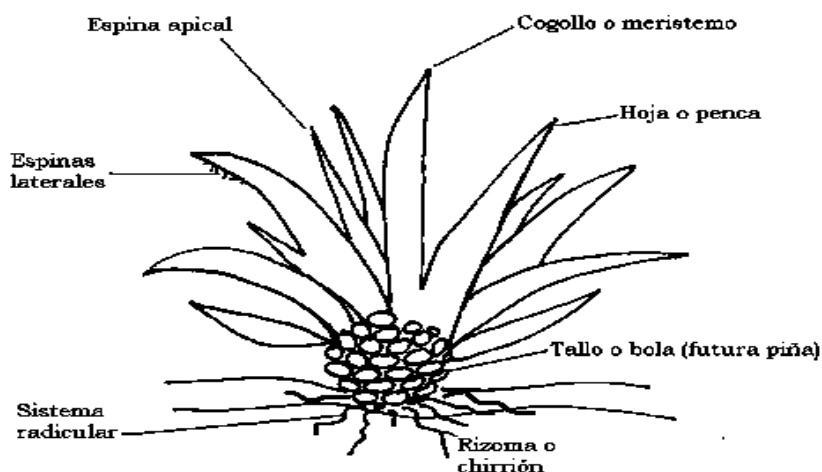


Figura 20 Partes del Agave. (SEMARNAT)





El metabolismo ácido crasuláceo (CAM), típico de algunos géneros y familias de plantas que crecen en zonas con altas temperaturas, constituye una especialización fisiológica en los agaves, a la cual se combina una alta radiación y baja humedad. Las plantas con metabolismo CAM tienen transpiración nocturna, abren sus estomas en la noche, fijan el carbono en ácidos orgánicos, principalmente ácido málico, que se acumulan en las vacuolas; durante el día el ácido málico es descarboxilado y se obtiene carbono, el cual es utilizado por la planta para la producción de carbohidratos. El metabolismo CAM permite obtener ganancias netas de carbono con una pérdida mínima de agua. Por lo menos diecisiete taxa de agaves tienen este tipo de metabolismo, entre ellos algunas especies económicamente importantes, como *Agave americana*, *A. fourcroydes*, *A. lechuguilla* y *A. tequilana*; mientras que otras son hasta cierto punto “facultativas”, ya que en condiciones de riego frecuente o en laboratorio los estomas abren de día, absorben CO₂ siguiendo probablemente la ruta fotosintética denominada C₃. Las hojas de *Agave deserti* presentan metabolismo C₃ durante un tiempo breve en la mañana, mientras que en *A. mapisaga* sucede esto tanto en la mañana como en la tarde.

Las especies de *Agave* crecen en un gran número de hábitats de México, desde el nivel del mar hasta los 3400 metros de altitud, aunque son más comunes entre los 1000 y los 2000 metros. Son abundantes en las planicies y bases de las montañas de las zonas áridas y semiáridas de la península de de Baja California, Sonora, al altiplano Mexicano (de Chihuahua y Coahuila a Guanajuato y Querétaro), la planicie Tamaulipeca, el valle de Tehuacán-Cuicatlán y la cuenca del Río Balsas.





A continuación se da una descripción de los factores principales que integran las regiones para el crecimiento del *Agave*:

3.5.1 Región Semiárida

Se considera como región semiárida aquella zona cuya precipitación pluvial vara de 350 a 600 mm anuales, presenta una temperatura media anual de 18 a 25°C, con un periodo de sequia de 6 a 8 meses y una cobertura vegetal por unidad de aérea mayor del 70%. El territorio nacional presenta extensas regiones de zonas áridas y semiáridas que cubren el 54.3% de la superficie total; donde de los 32 estados que integran el territorio nacional 25 de ellos presentan porciones áridas en mayor o menor medida.

La distrubucion de las lluvias en estas zonas obedece principalmente a la localización de la Sierra Madre Oriental así como a las Serranias Meridionales que se distribuyen de forma aislada en el norte del país; el efecto de estas elevaciones provoca lo que se conoce como “sombra orográfica” donde la precipitacion pluvial no solo es escasa y errática sino que también el vieto es secante, evaporando la poca humedad contenida en el suelo y la vegetación existente, aunado a ello la presencia de suelos con fuertes pendientes, arenosos o erosionados no permite la retención de agua, provocando que el índice de humedad que presentan las zonas semiáridas sea de mens 40 a menos 20.

I. Distribución de las zonas semiáridas

Dentro de las zonas semiáridas del país las que presentan precipitaciones pluviales iguales o superiores a la evapotranspiración potencial durante periodos de 30 a 119 días,





es decir, de 270 a 560 mm anuales son las regiones que limitan con el clima árido en el norte del altiplano, las que se encuentran en la base de la Sierra Madre Occidental en Sonora y Baja California, siendo predominante en la planicie costera del Golfo. En el sur, con la cuenca baja del río Tepalcatepec, en Michoacán; así como en algunas porciones del valle de Tehuacán-Cuicatlán, en la cuenca alta del río Tehuantepec y una franja angosta en la península de Yucatán.

Mientras que para las regiones que limitan con los climas sub-húmedo como lo son la planicie costera de Tamaulipas; laderas bajas de barlovento de la Sierra Madre Occidental en los estados de Sonora y Sinaloa; así como partes bajas de la Mesa Central (Guanajuato, Querétaro e Hidalgo); los valles de San Juan en Puebla y Perote en Veracruz, gran parte de los valles centrales de Oaxaca; la cuenca del Balsas (Guerrero, Michoacán y Puebla); pequeñas áreas costeras de Jalisco y Colima así como una pequeña franja al noroeste de la península de Yucatán, reciben entre 340 y 792 mm de precipitación con un periodo de sequía que varía entre ocho y diez meses.

II. Tipo de suelos de las regiones semiáridas

El tipo de suelos que existen en las regiones semiáridas son conocidos como *xerosoles* y *aridosoles*. Sin embargo, la presencia de la gran variedad de sustratos geológicos, característicos del relieve y condiciones climáticas locales, han propiciado la existencia de diversos tipos de suelos en esta región que varían de acuerdo a la profundidad, acidez y fertilidad. Los cuales de manera general pueden clasificarse como arenosos o arcillosos.





En la zona costera de Sonora y Baja California, así como en las lagunas costeras y terrenos bajos, sujetos a inundaciones periódicas por las aguas marinas, predominan los suelos sódico-salinos, que en tiempos de estiaje dan lugar a la formación de costras de cloruro de sodio (NaCl). En el Norte de Sonora las dunas de sílice ocupan gran extensión, mientras que en la costa del Golfo de California son frecuentes las dunas móviles (Flores & Valdés, 1988).

En los estados de Zacatecas y San Luis Potosí se encuentran capas de acumulación de carbono de calcio cuya profundidad y espesor varía de unos milímetros hasta los 40 cm, aunque los grandes valles pueden alcanzar profundidades de 230 m con espesores de 90 cm; éste horizonte corresponde a los suelos calcimórficos que son cementados con sílice por lo que reciben el nombre de *duripán*. También se tienen en ciertas regiones de los estados de Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Durango, Coahuila, Chihuahua y Tamaulipas suelos llamados *phaeozem* y *duripán*, este tipo de suelo se caracterizan por su alto nivel de fertilidad; cuando éstos son más profundos y existe tras locación de partículas se forman los *vertisoles*, que son suelos pesados arcillosos de alta productividad y manejo difícil (Flores 1974: 50-64). La geomorfología de muchas regiones semiáridas permite la creación de suelos con alto contenido de sales solubles debido a la existencia de bolsones y cuencas cerradas que proporcionan su acumulación. Ya que las sales son arrasadas por el agua a las partes bajas y, al no ser drenadas hacia el mar éstas se estancan y se acumulan. Éste fenómeno se ve agravado debido a los altos niveles de evaporación ocasionado por las altas temperaturas.





Los procesos abrasivos de los chubascos característicos de las zonas semiáridas originan arrastre de materiales aluviales que, cuando se ponen en contacto con los coluviales dan origen a los suelos conocidos como, *fluvisoles*, los cuales se constituyen por partículas estratificadas de diferentes formas y tamaños. Los cuales son fáciles encontrar en la zona carbonífera de Coahuila y en la región Lagunera puesto que abundan en esas regiones aunque también es posible encontrarlos en la cuenca del río Atoyac, así como en la del Balsas y en algunas porciones de las zonas semiáridas de Oaxaca, Puebla, Veracruz y el Bajío; en las partes altas de los lomeríos predominan los *regosoles* y en las bajas se encuentran los *litosoles*, esto debido a la acumulación de materiales aluviales y coluviales. Mientras que en los fondos de los valles gracias a que las condiciones microclimáticas y el relieve son más adecuados se encuentran suelos arcillosos profundos, de color oscuro, que presentan un alto contenido de materia orgánica este tipo de suelo pertenece a los *vertisoles*; dadas sus características este tipo de suelo es altamente productivo si se le da el manejo adecuado. Por otro lado los suelos pertenecientes a la porción noreste de la península de Yucatán son suelos calcimórficos, con una coloración que va desde café oscuro a gris oscuro, son suelos muy someros, rocosos y de baja a moderada productividad.





III. Recursos Hídricos

Los ríos de las regiones semiáridas de México drenan la mayor parte del territorio nacional es decir, más del 60%, aunque éstos aportan apenas un poco más del 21% del caudal hidrológico total del país. Sus escurrimientos medios anuales registran grandes variaciones de un año a otro y sus caudales se reducen durante varios meses del año hasta que llegan prácticamente a ser nulos durante largos periodos. Los recursos hídricos del país tal como se reportan en la Tabla 9 y en la Figura 21, se han clasificado en trece zonas hidráulicas de acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (CNA). La clasificación de las cuencas que irrigan las zonas semiáridas se organizan en tres grupos, la vertiente pacífica, vertiente del Golfo y cuencas Cerradas.

Tabla 9 Superficie y Precipitación media anual por región hidrológica administrativa 1941-2004 (CNA, 2005).

Región hidrológica administrativa		Superficie (miles de km ²)	Precipitación (mm)	(km ³)
I	Península de Baja California	145.5	202	29.4
II	Noroeste	205.3	464	95.3
III	Pacífico Norte	151.9	759	115.3
IV	Balsas	119.2	963	114.8
V	Pacífico Sur	77.1	1282	98.8
VI	Río Bravo	379.6	414	157.2
VII	Cuencas Centrales del Norte	202.4	394	79.7





VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	190.4	854	162.6
IX	Golfo Norte	127.2	816	103.8
X	Golfo Centro	104.6	1891	197.8
XI	Frontera Sur	101.8	2260	230.1
XII	Península de Yucatán	137.8	1163	160.3
XIII	Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala	16.4	737	121.1
	Nacional	1959.2	773	1514.5

I. Vertiente Pacífica

- **Corrientes de la Región de la península de Baja California.**

Tienen una reducida potencialidad de escurrimiento y régimen errático y efímero. Las aportaciones medias anuales de estos ríos registran fuertes variaciones de un año a otro llegando a permanecer secos durante períodos de varios años. La península se encuentra desvinculada del continente, a excepción del delta río Colorado que se incorpora a la región hidráulica noreste. Entre los principales ríos pueden mencionarse el río Tijuana en Baja California y el Santo Domingo, en Baja California Sur.

- **Región Alto Noroeste.**

Se extiende entre las partes altas de la Sierra Madre Occidental y el litoral del Océano Pacífico, la limita al norte de la frontera con Estados Unidos y al sur, el parte aguas entre los ríos Ameca y Santiago. A esta región le pertenecen los ríos Colorado, Yaqui y Mayo, con regímenes erráticos e intermitentes caracterizados por caudales de





estiaje muy pequeños e incluso nulos, y grandes avenidas en verano e invierno, producidas por ciclones tropicales y frentes polares.

- **Región Noroeste Bajo.**

Corresponde la cuenca del río Fuerte, que irriga parte de la Sierra Tarahumara y zona semiárida de Sinaloa, donde se desarrollan importantes actividades agrícolas y ganaderas.

- **Región Lerma-Santiago.**

Se ubica en el Altiplano Meridional y comprende gran parte del sistema Lerma-Chápal-Santiago; las cuencas cerradas de los lagos de Cuitzeo, Pátzcuaro, Zirahuén y otros; la subcuenca del río Tula, que pertenece a la cuenca del río Pánuco; la cuenca del valle del valle de México; los valles de Oriental, Libres y el Seco; y la parte alta de la cuenca del río Tecolutla. Debido a los regímenes erráticos e intermitentes de sus ríos, el caudal de esta región está regulado por medio de numerosas presas destinadas a la protección contra inundaciones, riego agrícola, abastecimiento a centros de población y generación de energía eléctrica.

- **Región del Pacífico Centro.**

Se ubica en la depresión de la gran cuenca del Balsas, entre el Sistema Volcánico Transversal, la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre del Sur. El río Balsas tiene una reducida potencialidad de escurrimiento, con régimen errático e intermitente, caracterizado por la presencia de intensas inundaciones en los meses de verano y





pequeños gastos de estiaje. Drena porciones semiáridas de Puebla, Guerrero y Michoacán.

II. Vertiente del Golfo de México

- **Región Frontera Norte.**

Corresponde a la gran cuenca del río Bravo y sus afluentes mexicanos, de régimen errático e intermitente, presenta grandes avenidas de origen ciclónico durante el verano, utilizadas para alimentar a las presas de almacenamiento que permiten optimizar al máximo el caudal hidrológico de la cuenca. Su importancia radica en ser límite fronterizo con Estados Unidos, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y la parte norte del estado de Tamaulipas.

- **Región Golfo Norte.**

Dentro de esta región destacan las cuencas de los ríos San Fernando y Soto La Marina, cuyos gastos están influenciados por los ciclones tropicales y los nortes invernales, lo cual ha permitido el desarrollo de las actividades agrícolas y ganaderas de la región.

- **Noreste de la Península de Yucatán.**

Carece de corrientes superficiales permanentes y las precipitaciones son más escasas que en el resto de la península, lo cual provoca ciertas condiciones de acidez.





III. Cuencas Cerradas

Abarca gran parte del Altiplano septentrional y parte del meridional, correspondiente a las cuencas cerradas de Chihuahua, el Bolsón de Mapini, El Salado y las cuencas cerradas de los ríos Nazas y Aguanaval, entre otras. Las corrientes de los ríos de esta región son de régimen errático, torrencial e intermitente, se caracterizan por las grandes variaciones en los volúmenes anuales que aportan; la concentración de los escurrimientos en unos cuantos meses del año, períodos secos de varios años de duración y gastos de estiaje nulos. Estos ríos están sobre explotados y representan la única fuente de abastecimiento de agua de una vasta zona árida. Sólo pueden aprovecharse por medio de presas que permiten captar, conservar y aprovechar el agua por períodos de varios años.

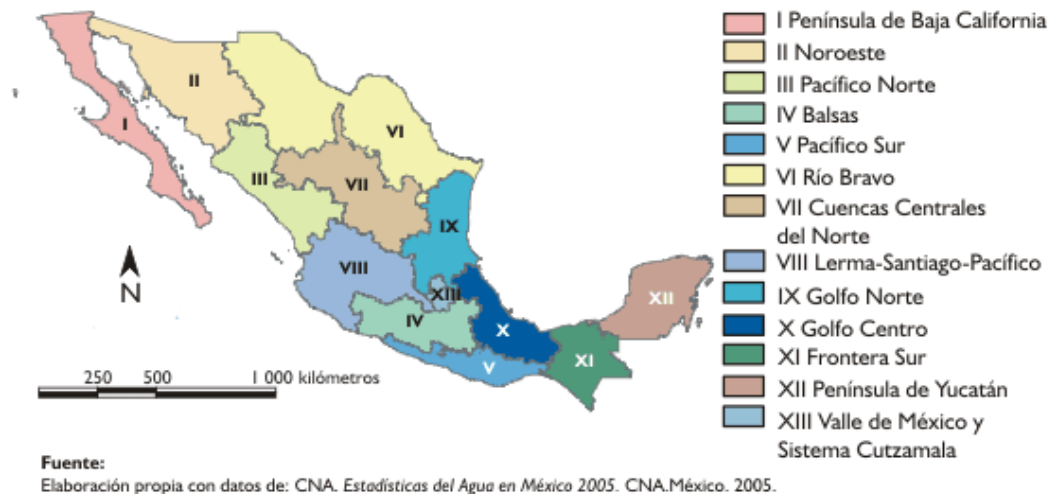


Figura 21 Regiones Hidrológicas Administrativas de México.





En estas regiones de apariencia inhóspita, subsiste una gran cantidad y variedad de especies vegetales que han pasado por diversos, complejos y fascinantes procesos de adaptación que les han permitido sobrevivir en un ambiente hostil, como es el caso de las plantas de la familia *agavácea* que se encuentran plenamente adaptadas a los ambientes semiáridos pues presentan mecanismos que les han permitido sobrevivir en ambientes con graves restricciones ecológicas, estas plantas conservan una reserva de agua que es almacenada en hojas y tallos. Aunque también se le puede encontrar en otros hábitats más benignos como en las regiones sub-húmedas.

3.1.2 Región Sub-húmeda

Se pueden encontrar dos tipos de clima en esta región, la región tropical sub-húmeda y la región templada sub-húmeda. Que cubren 73 millones de hectáreas del territorio nacional donde 40 millones de hectáreas corresponden a la zona tropical sub-húmeda mientras que los 33 millones de hectáreas restantes pertenecen a un clima templado sub-húmedo.

I. Distribución de la Región Sub-húmeda

La primera de ellas es la zona tropical sub-húmeda, cubre el 17.5% del territorio nacional cuya distribución geográfica se extiende sobre 32.5 millones de hectáreas, en un total de 578 municipios donde el 75% o más de sus territorios se encuentran en ésta; que comprende 21 de los 32 estados. La zona tropical sub-húmeda cubre importantes porciones de la Planicie Costera del Pacífico, desde el río Suchiate hasta cerca del paralelo 24° Norte, entrando al interior del país y ocupando grandes áreas de la parte





media y baja de la cuenca del río Balsas, la mayor parte de la península de Yucatán excepto la pequeña faja costera del noreste, en la vertiente del Golfo, tiene muy poca presencia únicamente a partir de la sierra de San Martín hasta las intermediaciones del paralelo que pasa por Soto la Marina; el valle centro en el centro de Veracruz en un área situada entre Nautla, Alvarado, Jalapa y Tierra Blanca, sin llegar a ninguna de estas poblaciones, pero incluyendo las inmediaciones del puerto de Veracruz, el sur de Tamaulipas, sureste de San Luis Potosí, extremo norte de Veracruz y extremo noreste de Querétaro, comprendiendo una parte de “La Huasteca”, con una porción Noroeste de la Sierra Madre de Chiapas y la vertiente marina de esta serranía así como el occidente y sur de México. En el extremo sur de Baja California existe un manchón aislado que se localiza en las partes inferiores y medias de las Sierras de La Laguna y Giganta.

Es una zona que se desarrolla en México entre los 0 y 1900 metros sobre el nivel del mar más frecuentemente por debajo de la cota de 1500 metros sobre el nivel del mar. Mientras que en los decibeles del Golfo de México excepto por la Depresión Central de Chiapas no se le ha observado por arriba de los 800 metros sobre el nivel del mar. Un factor primordial que caracteriza a estas zonas es la temperatura en especial la mínima extrema, que en general no es menor de 0°C. Siendo la temperatura media anual del orden de 20 a 29°C, donde en algunas depresiones interiores es más alta.

Se caracteriza por tener un clima cálido en algunos sitios seco, con una distribución de humedad desigual a lo largo del año, ya que se divide en dos estaciones muy definidas la lluviosa y la seca. El periodo de sequía abarca de entre 5 a 8 meses consecutivos con lo





cual se da una idea de lo acentuado de la acidez entre los meses de Diciembre y Mayo. El período de lluvias se localiza en los meses de verano, con una precipitación pluvial igual o superior a la evotranspiración potencial durante períodos de 120 a 180 días, es decir, el monto de precipitación pluvial anual varía entre 300 y 180 mm, más frecuentemente entre 600 y 1200mm.

Por otro lado la región templada sub-húmeda corresponde al 19.7% del territorio nacional, esta zona abarca más de 1000 municipios de 20 estados. Pues se distribuye a lo largo de las grandes cadenas montañosas del país, es decir, la Sierra Madre Oriental incluye el Bajío, el sureste de la Sierra de Zacatecas, el Valle de Toluca, la cuenca de México, parte del sureste de Hidalgo, suroeste de Puebla, la región Mixteca, Sierra de Oaxaca La Faja Volcánica Transmexicana, Sierra Madre del Sur, así como las Sierras de Chiapas, Oaxaca y Baja California. El clima de estas zonas presenta una temporada de lluvias bien definida de 4 a 6 meses, durante el cual se cubren completamente los requerimientos de las plantas. Durante la época seca es importante el déficit de humedad, condición por la cual las plantas perennes normalmente pierden sus hojas. La precipitación media anual en estas zonas del norte y centro de país es superior a los 700 mm y en las regiones del sur llegan a ser superiores a los 1100mm, siendo la temperatura media anual de 11 a 25°C. En este tipo de clima las heladas son una constante que se presenta cada año, donde la temperatura del mes más frío es ligeramente superior a los 0°C.





- **Tipos de Suelos en la Región Sub-húmeda.**

Generalmente esta zona se encuentra en los lomeríos y lardeas con suelos someros y pedregosos, en algunos casos suelos profundos con un drenaje deficiente. En su mayoría los suelos son pardos, con humus que se mineraliza con bastante rapidez, el nombre científico para describir a este tipo de suelos corresponde a *Molisol*, este tipo presenta un horizonte superficial blando es rico en materia orgánica y espeso. Presenta la humedad suficiente y buena aireación a la gran cantidad de gusanos se tierra que suelen contener. Por todo ello estos suelos son particularmente favorables para la vegetación; además de que durante la estación fría sólo se hielan en la capa más superficial.

En cuanto a los demás tipos de de suelo que se pueden encontrar, se tienen demasiadas características variables pues las texturas pueden variar de arcilla a arena, el pH de ácido a ligeramente alcalino, pueden ser pobre o ricos en materia orgánica e ir de colores claros a oscuros, rojizos, amarillentos, grisáceos, cafés o negros. En general este tipo de suelos son muy bien drenados y por lo común jóvenes con características derivadas de la roca madre, que pueden ser tanto ígnea, como metamórfica y en pocas ocasiones sedimentaria marina.

- **Recursos Hídricos.**

El característico relieve de las zonas templadas con grandes cadenas montañosas muy cerca de la costa y grandes cuencas endorreicas, hace que los ríos sean en general cortos. Dos de las cuencas más importantes del país debido a su humedad pasan por la región sub-húmeda las correspondientes a la cuenca del Papaloapan y la costa de Chiapas.





- **Descripción de los ríos más importantes de la región sub-humedad.**

El río Lerma o Grande de Santiago, es el segundo río más grande de México con 1270 km de longitud, nace en los manantiales de Almoloya del Río, en el estado de México, atraviesa el Valle de Toluca y desemboca en el océano Pacífico.

El río Balsas es una fuente hídrica muy importante cuya longitud es de 771 km. Este río nace tras la confluencia de los ríos San Martín y Zahuapan, en el estado de Puebla. Haciendo frontera entre los estados de Guerrero y Michoacán desembocando en el Océano Pacífico.

Una parte del río Grijalva alimenta a la zona ya que tiene una longitud aproximada de 600 km que nace en el estado de Chiapas y recorre Tabasco antes de desembocar en el Golfo de México. En la Tabla 10 se presenta un resumen climático por estado.





Tabla 10 Resumen Climático por Estado.

Grupo de Climas, Rangos de Temperatura Media Anual y de Precipitación Total Anual de las Entidades Federativas.			
Entidad Federativa	Tipo de Clima	Rango de Temperatura Media Anual (°C)	Rango de Precipitación Total Anual (mm)
Aguascalientes	Semiárido	12 a 22	400 a 800
Baja California	Semiárido, Árido	Menos de 6 a 24	Menos de 100 a 600
Baja California Sur	Semiárido, Árido	14 a 26	Menos de 100 a 700
Campeche	Cálido Subhúmedo	24 a 28	800 a 2 000
Coahuila de Zaragoza	Semiárido, Árido	10 a 26	100 a 700
Colima	Cálido Subhúmedo	10 a 28	600 a 2 000
Chiapas	Cálido húmedo, Cálido Subhúmedo, Templado húmedo, Templado Subhúmedo	10 a 30	800 a más de 4500
Chihuahua	Templado Subhúmedo, Semiárido, Árido	8 a 26	100 a 1 200
Distrito Federal	Templado Subhúmedo	6 a 18	500 a 2 000
Durango	Templado Subhúmedo, Semiárido, Árido	8 a 26	100 a 2 000
Guanajuato	Templado húmedo, Árido	10 a 22	300 a 1 000
Guerrero	Cálido Subhúmedo, Templado subhúmedo, Semiárido	12 a 30	500 a 3 000



Análisis de Factibilidad de Producción de Bioetanol.



Facultad de Ingeniería Química.

Noé Salvador Castillo Bucio.

Hidalgo	Templado Húmedo, Templado subhúmedo, Semiárido	10 a 24	300 a 3 000
Jalisco	Cálido subhúmedo, Templado subhúmedo, Semiárido	menos de 6 a 28	400 a 2 500
México	Cálido Subhúmedo, Templado subhúmedo	0 a 28	500 a 2 000
Michoacán de Ocampo	Cálido Subhúmedo, Templado subhúmedo, Semiárido	8 a mas de 30	400 a 2 000
Morelos	Cálido Subhúmedo, Templado subhúmedo	0 a 26	800 a 2 000
Nayarit	Cálido subhúmedo	14 a 28	600 a 2 500
Nuevo León	Templado subhúmedo, Semiárido	8 a 24	200 a 1 200
Oaxaca	Cálido húmedo, Cálido Subhúmedo, Templado húmedo, Templado Subhúmedo, Semiárido	8 a 30	300 a más de 4 500
Puebla	Cálido húmedo, Cálido Subhúmedo, Templado húmedo, Templado Subhúmedo, Semiárido	0 a 26	300 4 500
Querétaro de Arteaga	Templado subhúmedo, Semiárido	10 a 24	400 a 3 500
Quintana Roo	Cálido Subhúmedo	24 a 28	800 a 2 000



Análisis de Factibilidad de Producción de Bioetanol.



Facultad de Ingeniería Química.

Noé Salvador Castillo Bucio.

San Luis Potosí	Templado Húmedo, Templado subhúmedo, Semiárido	10 a 26	200 a 3 500
Sinaloa	Cálido subhúmedo, Semiárido, Árido	10 a 28	200 a 2 000
Sonora	Semiárido, Árido	8 a 28	Menos de 100 a 1 000
Tabasco	Cálido húmedo	22 a 28	1 500 a 4 5000
Tamaulipas	Cálido subhúmedo, Templado subhúmedo, Semiárido	10 a 26	300 a 2 000
Tlaxcala	Templado subhúmedo, Árido	0 a 16	400 a 1200
Veracruz-Llave	Cálido húmedo, Cálido subhúmedo, Templado húmedo	0 a 28	300 a más de 4 500
Yucatán	Cálido subhúmedo, Templado subhúmedo, Semiárido	24 a 28	400 a 2 000
Zacatecas		10 a 24	200 a 1 000

FUENTE: Anuario Estadístico y Geográfico (INEGI, 2013).





3.6 Suelo

Los agaves pueden desarrollarse en terrenos con alto grado de pendiente, con drenaje superficial muy eficiente, considerados no aptos para la agricultura tradicional. Sin embargo, bajo esas condiciones, es necesario realizar prácticas de conservación de suelo y agua para asegurar un ambiente favorable para el cultivo. Los agaves requieren de suelos con drenaje de bueno a excelente (FAO, 1994), en la actualidad, dentro de los requerimientos para cultivar agave que fijan las compañías tequileras, se establece un límite máximo de pendiente del suelo de 8%, para facilitar el manejo de este cultivo, dado que en terrenos planos (con pendiente inferior al 2%) se corre el riesgo de tener problemas de encharcamiento con lo que representaría un problema para el cultivo además de que se evitaría que el agave deslace de manera significativa otros cultivos (García-García, 2014).

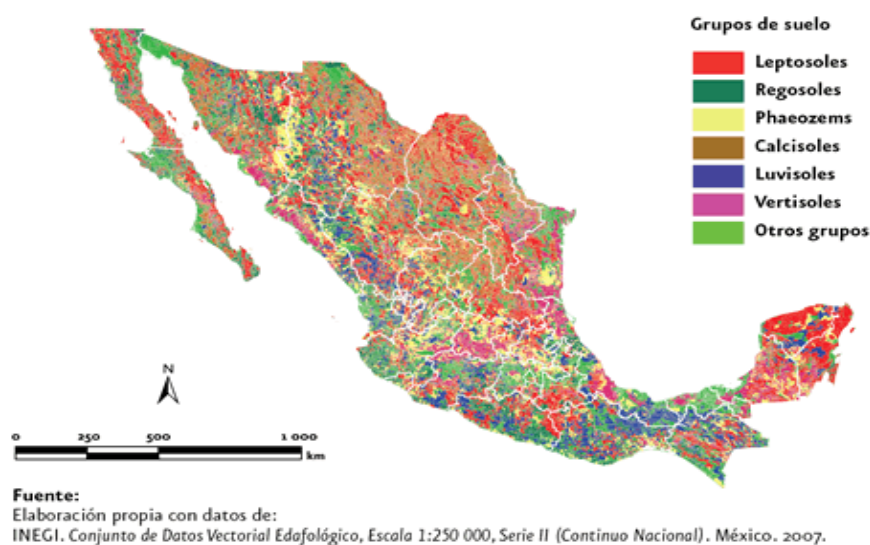


Figura 22 Tipos de suelos en México.





Los tipos de suelos que favorecen el crecimiento de los agaves son diversos y pueden ser tanto de origen ígneo como sedimentario-principalmente calizas (García Mendoza, 2007).

3.7 Requerimientos agroecológicos del *Agave cupreata*

La identificación de las áreas con potencial para el óptimo crecimiento del cultivo de plantas de agave, se debe realizar de acuerdo a las características de suelo, fisiología y clima, considerando parámetros definidos en función de los requerimientos agroecológicos bajo los cuales se desarrolla (FAO., 1996), así como considerar aquellas variables ambientales que son suma importancia, como lo son la temperatura y radiación con las cuales la planta tenga un mejor desarrollo fotosintético, la altitud y precipitación anual. A continuación se describen las variables ambientales seleccionadas como determinantes en el potencial productivo del cultivo:

- **Altitud**

Como ya mencionó el *Agave cupreata* se desarrolla a altitudes de entre 1220 y 1850 msnm sin embargo, aún no se tiene caracterizado el rango de distribución altitudinal óptimo o subóptimo de la especie *cupreata*, por lo que se tomaron en cuenta los parámetros establecidos para la especie *Agave tequilana* (Ruíz, 2007) y se adaptaron de acuerdo con las observaciones hechas en las plantaciones de *Agave cupreata*.





Basados en información de *Agave tequilana* (Ruíz, 2007), se consideró que el mejor desarrollo se ubica en altitudes de 1,000 a 2,200 msnm, con un crecimiento rápido en altitudes inferiores a los 1,000 msnm, pero con bajas concentraciones de azúcares; por otro lado, en altitudes superiores a 2,200 msnm, el crecimiento de la planta se reduce significativamente y el riesgo de daños por bajas temperaturas aumenta.

- **Temperatura**

Los agaves con temperatura promedio de 20 a 22° C, y se encuentran distribuidos entre los 5 y 25° de Latitud N y con régimen térmico templado, semicálido o cálido (Ruíz, et al., 1999). En el *A. tequilana*, se ha registrado pobre tolerancia a las bajas temperaturas (Ruíz, 2007), ya que la absorción celular se reduce a la mitad cuando las temperaturas descienden al nivel de -6°C. La asimilación del CO₂ es favorecida por temperaturas diurnas de 22 a 25 °C y nocturnas de 14 a 16 °C; y disminuye drásticamente en ambientes donde la temperatura diurna del aire sea mayor de 28 °C y nocturna mayor de 20 °C (Ruíz, et al., 1999). Debido a que entre las plantas perennes del desierto casi todo el proceso fotosintético se produce durante la noche, el efecto de la temperatura nocturna se convierte en un factor de suma importancia para la adaptación y productividad de esta especie (Ruíz, 2007) así como para la identificación de áreas con potencial para su cultivo (Vargas citado por Ruiz, 2007). En efecto, las plantas de la familia *Agavácea* tienen metabolismo ácido crasulácea (CAM) caracterizado porque durante el día cierran las estomas para evitar transpiración y los abren durante la noche para realizar fotosíntesis, lo cual las hace muy sensibles a las temperaturas nocturnas.





Estudios con *Agave tequilana* han detectado que la asimilación neta de CO₂ se favorece con temperaturas diurnas/nocturnas de bajas a moderadas y disminuye drásticamente cuando las temperaturas nocturnas son elevadas (Ruíz, 2007).

Sustentado en lo anterior, la temperatura nocturna fue considerada como una variable ambiental crítica o de suma importancia para la regionalización del potencial productivo.

- **Precipitación**

El agave se adapta en regiones semiáridas y subhúmedas, con un régimen de precipitación anual entre 600 a 1800 mm y con una atmósfera de seca a moderadamente seca la mayor parte del año (Ruíz, et al., 1999). Las regiones productoras de agave más importantes, localizadas en el Estado de Jalisco, México, presentan una precipitación anual que va de 700 a 1,100 mm (Ruíz, 2007). La humedad disponible se relaciona con la lluvia y con la capacidad del suelo para almacenar y ceder agua a la planta, siendo condiciones favorable con 600 a 800 mm de lluvia total anual. Por las características de los agaves, de ser plantas perennes del desierto adaptadas con éxito para hacer frente a las altas temperaturas y los problemas de desecación, no se requieren grandes cantidades de precipitación.

- **Pendiente y acidez del suelo**

El género *Agave* presenta tolerancia de ligera a intermedia a sales y prospera mejor en un rango de pH de 6.0 a 8.0; no son recomendables suelos con problemas de acidez o alcalinidad para su cultivo (FAO, 1994).





Los agaves requieren suelos con drenaje de bueno a excelente, de ahí que no es conveniente cultivar agave en terrenos con pendiente inferior a 2%; además, se evitaría que el agave desplace de manera significativa otros cultivos que actualmente ocupan las tierras de primera calidad en las diversas regiones agrícolas del país (Ruíz, 2007) y además que pongan en riesgo la seguridad alimentaria.

En la Tabla 11 se presentan los requerimientos del cultivo del agave para cada uno de los niveles de potencial agroecológico clasificados en: áreas óptimas o con alto potencial, áreas con sub-óptimo potencial y áreas marginales.

Tabla 11 Requerimientos del cultivo del *A. cupreata* según nivel de potencial agroclimático.

Variable	Potencial Agroecológico		
	Óptimo	Subóptimo	Marginal
Temperatura Nocturna (°C)	11 a 21	de -1 a 11 y 21 a 28	<-1 y >28
Probabilidad de Heladas	<0.10		>0.1
Altitud (msnm)	1 000 a 2 200	600 a 1 000 y 2 200 a 2 500	<600 y >2 500
Pendiente del suelo (%)	2 a 8	1 a 2 y 8 a 45	<1 y >45
Precipitación Anual (mm)	600 a 1 500	1 500 a 1 800	<600 y >1 800





3.8 ¿Es el *A. cupreata* una buena Materia Prima para la Producción de Bioetanol?

Las plantas que presentan metabolismo ácido crasulácea (CAM) han sido reconocidas recientemente como cultivos bioenergéticos potenciales (Smith, 2008; Borland, et al., 2009) debido a que tienen bajos requerimientos de agua por lo que resultan productivas en las regiones semiáridas, asimilando el carbono en la noche lo que disminuye el gradiente difusivo de agua en las hojas y mejora la eficiencia del uso del agua (Nobel, 1994).

Aunado a esto la adaptabilidad que presentan los agaves a climas extremos gracias a su fisiología, se aprovecharía gran parte del territorio en los cuales se presentan climas áridos y semiáridos, los cuales representan el 54.3% del territorio nacional, con lo cual se evitaría la competencia de tierras para cultivo de plantas de grado alimenticio y las tierras para el cultivo de *A. cupreata* dentro de la denominación de origen para la producción de mezcal (DOM).

Con lo anterior se plantea una buena predicción para el abastecimiento de materia prima. Pero, también debe considerarse que al emplear plantas con metabolismo CAM para la producción de bioetanol, se encuentran materiales lignocelulósicos, siendo la lignina el tercer componente mayoritario con hasta un 30% en peso seco (Somerville, 2007), la cual representa un impedimento para la liberación de los azúcares, proceso que permite la fermentación de la celulosa y hemicelulosa para dar origen al biocombustible, puesto que una de sus funciones es proporcionar al xilema la resistencia para soportar





tensiones impuestas durante la transpiración. Por lo que se requiere de un pre-tratamiento en el cual se rompa la estructura de la lignina, en la actualidad esta etapa representa uno de los principales costos económicos en el proceso. Incluso, se ha descrito como el segundo costo unitario más elevado de la producción de etanol lignocelulósico procedido solamente por el costo de las materias primas (Mosier, et al., 2005). Pero también, las plantas con metabolismo CAM como el *A. cupreata*, la tensión en el xilema es baja debido a que la transpiración también lo es y por lo tanto se requiere menos lignina, como resultado de esto, se tienen menores cantidades de lignina en la composición del tejido de las plantas con metabolismo CAM, por ejemplo las hojas de agave tienen entre 3-15% de lignina en peso seco y un 68% de celulosa (García-Reyes & Rangel-Mendez, 2009; Iñiguez-Covarrubias, et al., 2001; Santiago, et al., 2006). La baja cantidad de lignina y la alta solubilidad de las reservas de hidratos de carbono en estas plantas, implica un menor requerimiento de energía para su conversión a combustibles lo que lleva a tener un costo menos del proceso, además de que las plantas de agave presentan un alto contenido de inulina. Por lo anterior el *A. cupreata*, puede resultar una buena materia prima de gran calidad para la producción de bioetanol.





4. Materiales y Métodos.

4.1 Materia Prima.

Se escogió agave mezcalero (*Agave cupreata*) para su caracterización física así como química. Las plantas de *Agave cupreata* tenían entre 6 y 12 años de edad, cultivadas y cosechadas en la localidad de San Francisco de Etucuaró, perteneciente al municipio de Madero, Michoacán. Los estudios de las pencas y piñas se llevaron a cabo en el edificio de Posgrado de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

4.2 Reactivos.

- D (-) Fructosa (Catálogo F-2543, Sigma Aldrich-USA)
- D (-) Xilosa (Catálogo 7665, HYCEL-MEXICO)
- D (-) Manosa (Catálogo 104, HYCEL-MEXICO)
- D (+) Sacarosa (Catálogo 5750, Sigma Aldrich-USA)
- L (+) Arabinosa (Catálogo A-3256, Sigma Aldrich-USA)
- B D (+) Glucosa (Catálogo D-9434, Sigma Aldrich-USA)
- L (+) Tartrato doble de sodio y potasio (Catálogo 6381, Sigma Aldrich-USA)
- Hidróxido de sodio (Catálogo 1310, Sigma Aldrich-USA)
- Ácido 3-5, dinitro-salicílico (Catálogo D-0550, Sigma Aldrich-USA)





- Etanol (Catálogo 6417, Sigma Aldrich-USA)
- H_2SO_4

4.3 Equipo

- Balanza analítica, Sartorius modelo BP61S con precisión de $\pm 1\text{mg}$.
- Baño maría PolyScience modelo 20L-M; Niles, IL
- Vortex Genie2 Scientific Industries Modelo G-560 N°. Serie 2-397504
- Cromatógrafo de líquidos de alta resolución (HPLC) VARIAN.
- Estufa Felisa FE-291A
- Mufla
- Molino de 4 aspas MAGRITEP
- Prensa tornillo Inventer Duty Motor N° de serie 201082900-100
- Espectrómetro JENWAY modelo 7305 N° de serie: 39883
- Desecador
- Balanza, TORREY modelo FS 250/500 de capacidad $250\text{ kg} \pm 0.5\text{ kg}$.
- Autoclave Felisa Modelo FE-399
- Bomba Cromatográfica Cuaternaria VARIAN 350.
- Detector diferencial de índice de refracción VARIAN 800.
- Control de temperatura del HPLC VARIAN
- Automuestreador VARIAN 410.





4.4 Métodos.

- Humedad método 7.005 (AOAC, 1984)
- Azúcares reductores totales (ART). Método del ácido 3,5 DNS (Miller, 1959)
- Cromatografía HPLC. Método de (Chirino, 2005)
- Hidrólisis Ácida Cuantitativa
- Determinación de lignina.

- **Pasos para la obtención de etanol a partir de *Agave cupreata*.**

Se requieren una serie de pasos como se muestra en la siguiente figura, para la obtención de bioetanol a partir del uso integral del *Agave cupreata* como materia prima. El estudio sólo se llevó a cabo antes de la cocción de la planta, realizándose únicamente la caracterización física y química de las fracciones de la planta.



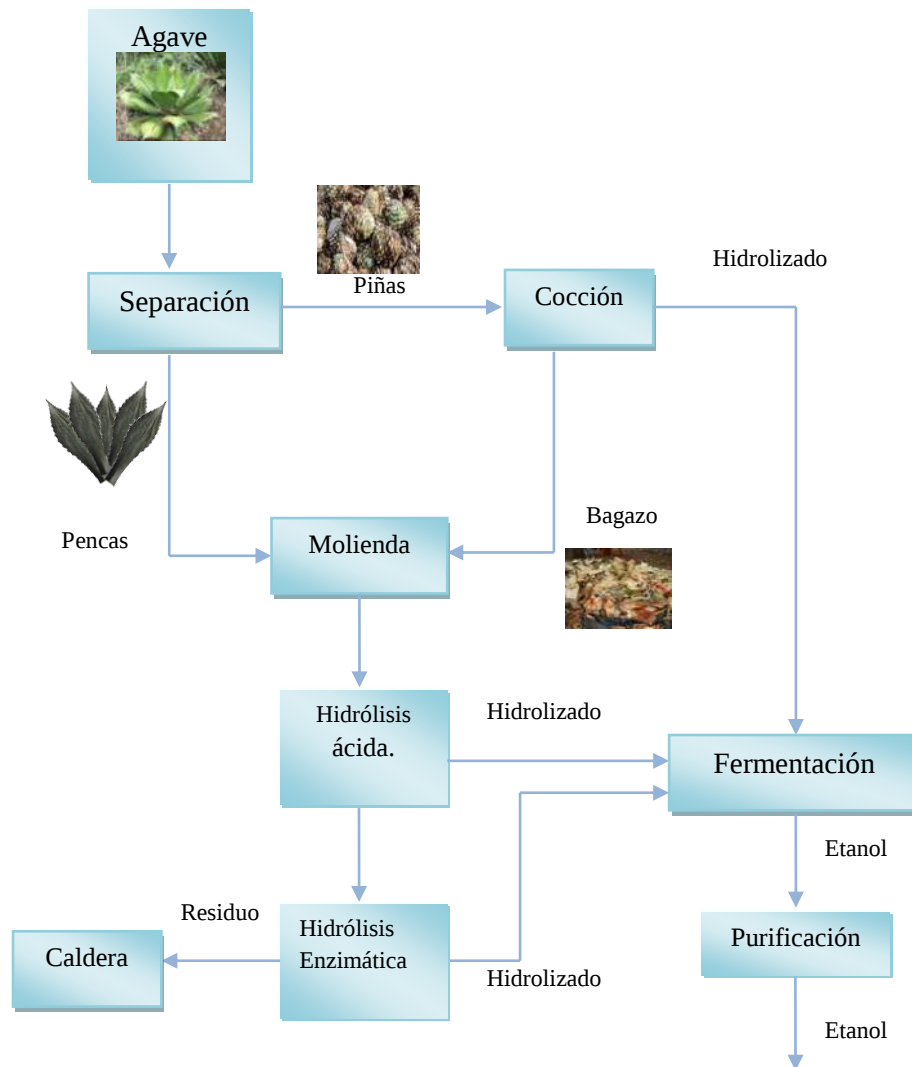


Figura 23 Diagrama de bloques para el aprovechamiento integral del *Agave cupreata*.





Puede apreciarse que el proceso global consiste de algunas etapas de pretratamiento, pero en este trabajo solo se realizara la caracterización física y química del agave antes de su cocción.

I. Proceso de Caracterización.

En la caracterización física se estimaron las dimensiones y el peso de la planta completa, posteriormente se separaron las pencas y las piñas, obteniendo las medidas correspondientes a las pencas y piña, así como el peso, tomando pequeñas muestras tanto de las pencas como de la piña; para la caracterización química se extrajeron los jugos, como se aprecia en las figuras 24 y 25 de ambas fracciones de la planta (piña y pencas) identificando el contenido de azúcares reductores totales, determinación de humedad, como se muestra en el diagrama de bloques (Figura 27).



Figura 24 Proceso de prensado para separar la fibra y el jugo.



Figura 25 Interior de la presa tornillo (proceso de separación del jugo)





- **Caracterización Física.**

Se determinaron: *altura de la planta sin raíz, diámetro máximo tomando en cuenta las pencas (hojas) extendidas, longitud y ancho de las pencas*; utilizando un fluxómetro TRUPER de 10 m $\pm$ 0.5 mm modelo 27FN-8MEB; *peso de la planta sin raíz (hojas y piña)* empleando una báscula TORREY modelo FS 250/500 con capacidad de 250 kg $\pm$ 0.5 kg, determinando el porcentaje correspondiente para las pencas (hojas) y para la piña.

- **Caracterización Química.**

Se realizaron diferentes actividades como:

- Molienda y extracción de jugo de las fracciones de la planta (hojas y piña).
- Determinación del porcentaje de azúcares reductores presentes en los jugos de las fracciones.
- Identificación de los azúcares presentes en las fracciones de la planta.

Para la obtención de los jugos de las porciones de la planta (piña y hojas por separado) se utilizó un molino y una prensa tornillo, dividiendo las piñas en cuatro partes con ayuda de hachas y un machete para proporcionar el tamaño adecuado para la banda transportadora del molino MAGRITEP de 4 aspas con navajas al alto carbón, recolectando la fibra en un contenedor móvil adaptado en la parte inferior del molino, por medio del contenedor móvil la fibra fue transportada a la prensa de tornillo horizontal para extraer los jugos de dichas fracciones. Los jugos fueron extraídos de tres





zonas de la prensa, los cuales escurrieron inmediatamente liberando la carga impuesta por 5 discos que fueron colocados como contrapeso, los discos tenían 5 kg de peso individual lo que hace un total de 25 kg de contrapeso. Los jugos obtenidos de cada fracción de la planta fueron filtrados al vacío para eliminar sólidos en suspensión, recolectándolos en recipientes de plástico cerrados herméticamente y almacenados en un refrigerador a una temperatura de 4° C.

- **Determinación de humedad.**

La determinación del porcentaje de humedad se realizó por medio del método de pérdida de peso, para la cual se utilizó una balanza analítica, Sartorius modelo BP61S con precisión de $\pm 1\text{mg}$ para obtener el peso de muestras de las pencas como de las hojas, que fueron tomadas aleatoriamente antes (w_{mh}) y después (w_{ms}) de la pérdida de humedad. Para la evaporación de las sustancias volátiles se utilizó una estufa Felisa FE-291A como se muestra en la figura 26, dejando las muestras por 3 días a una temperatura de 60°C de acuerdo al método 7.005 (AOAC, 1984). Al término de este periodo las muestras se colocaron en un desecador para evitar que tomaran humedad del medio y se pesaron en la misma balanza analítica, durante el periodo de secado se realizaron pesadas de las muestras para verificar que mantuvieran peso constante. El mismo procedimiento fue realizado para las fibras que se obtuvieron después del proceso de extracción de jugos. El cálculo del porcentaje en peso de humedad de cada una de las muestras se determinó con la siguiente ecuación:





$$\% \text{ humedad} = \frac{w_{mh} - w_{ms}}{w} * 100$$

Dónde:

w_{mh} = peso del crisol más muestra húmeda

w_{ms} = peso del crisol más la muestra seca

w = peso de la muestra



Figura 26 Secado de las muestras





- **Balance de Masa.**

El balance de masa se realizó para determinar el porcentaje de jugo y bagazo en las fracciones de la planta, para el balance de masa no se consideraron pérdidas por corte de la piña entrando 120.56 g al molino ($F=120.56$), de la corriente F se obtuvieron las corrientes de bagazo (B) y la corriente de jugo (J). Las pérdidas que se tuvieron en el proceso de molienda y de prensado fueron pequeñas por lo que tampoco se consideraron. Lo mismo se realizó para las hojas con alimentación de $F=58.9$ kg

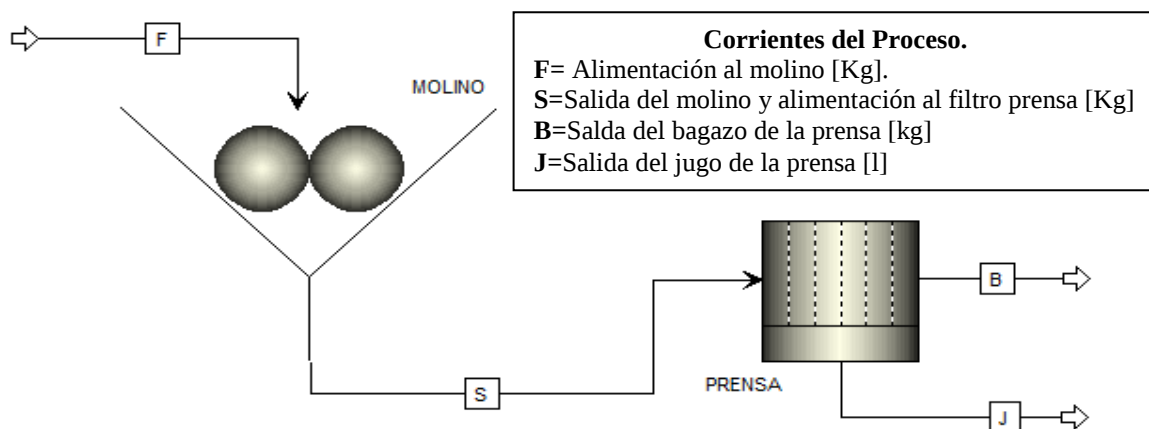


Figura 27 Diagrama del proceso de extracción de los jugos de *A. cupreata*.





Se determinó la densidad de los jugos obtenidos de las fracciones de la planta por picnometría. En la siguiente tabla se muestran las condiciones de uso del filtro prensa

Característica	Asignación
selección del tipo de motor	Asíncrono
Tensión del motor	220 v
Corriente del motor	14.4 A
Potencia del motor	
Frecuencia del motor	60 Hz
Tipo de Refrigeración	Automático
Factor de Sobrecarga	150%
Selección de consigna de frecuencia	Fija
Frecuencia Mínima	20 Hz
Frecuencia Máxima	60 Hz
Tiempo de Aceleración	20 s
Tiempo de Desaceleración	20 s
Modo de Control	Lineal





- **Cuantificación de Azúcares Totales Reductores.**

Se determinaron los azúcares reductores totales del *A. cupreata* según el método Miller (Miller, 1959), los cuales pueden reducir al ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) bajo determinadas condiciones. Cuando el ácido 3,5-dinitrosalicílico es reducido en presencia de calor, por los azúcares reductores que entran en contacto con él, se desarrolla un cambio de color parecido al café (con variaciones de amarillo hasta café) y la formación del ácido aldónico correspondiente, la reacción se muestra en la Figura 28. El cambio de coloración puede entonces determinarse por lecturas de densidad óptica, leídas por espectrofotometría a una determinada longitud de onda.

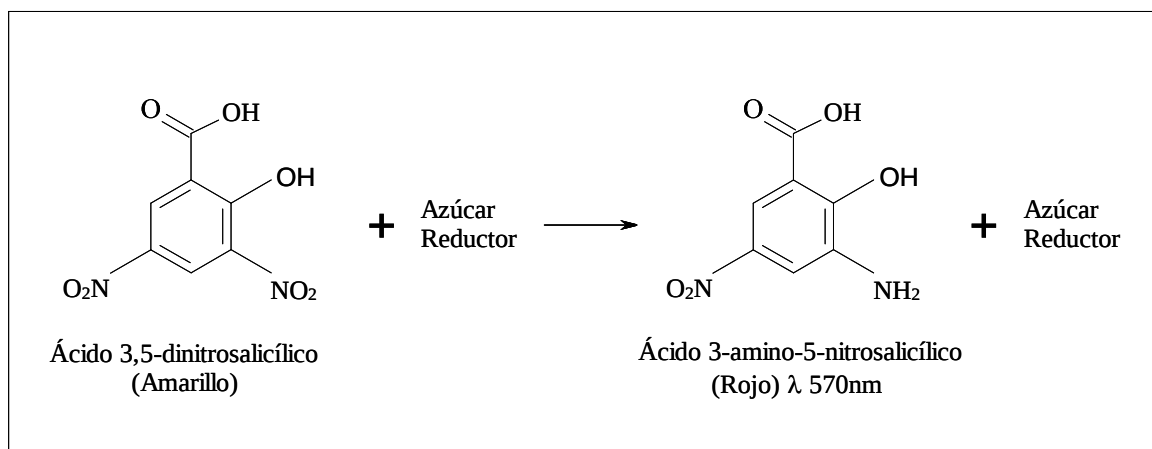


Figura 28 Reacción que se lleva a cabo entre el azúcar reductor y el DNS.

La concentración de los azúcares reductores totales liberados en la muestra se determina haciendo una interpolación en la curva patrón del azúcar utilizado, en este caso se utilizó glucosa, graficando la absorbancia en función de la concentración. Para la aplicación del método DNS de Miller se necesita preparar el reactivo DNS, disolviendo





0.8 g de NaOH en agua destilada, luego se adicionan 15 g de tartrato de sodio y potasio tetra hidratado y 0.5 g de DNS (ácido 3,5-dinitrosalisílico). Esta mezcla se afora a 50 mL con agua destilada y se almacena en un frasco ámbar a 4°C. La concentración de azúcares reductores se determina utilizando una curva de calibración absorbancia en función de concentración.



Figura 29 Soluciones obtenidas de la aplicación del método DNS.

Para obtener esta curva se prepararon soluciones, utilizando glucosa como estándar. A estas soluciones se les aplicó el método DNS y se leyó la absorbancia de cada una de ellas en un espectrofotómetro (JENWAY modelo 7305) a una longitud de onda 570 nm. Una vez construida la curva patrón se aplicó el método DNS a cada una de las muestras, del jugo del *A. cupreata* diluidas en factores de 1/100, para lo cual se mezclaron 0.3 mL de cada una con 0.3 mL del reactivo DNS, la cuales se representan en la figura 29, se colocaron a ebullición por 10 min en baño de maría e inmediatamente se detuvo la reacción con baño de agua y hielo. Se dejaron en reposo por 5 minutos, y se determinó su absorbancia. El mismo tratamiento se realizó para el blanco con agua destilada. Leyendo la absorbancia de cada una de las muestras en la curva patrón se





determinó la concentración de azúcares reductores, dichos datos están reportados en la siguiente tabla (tabla 12).

Tabla 12 Concentración de las soluciones para la curva patrón

Dilución	Sol. inicial [ml]	Agua [ml]	Concentración [g/L]
Concentración Inicial 5x10 ⁻³ g/ml			
Sol. Inicial	-	-	0.5
Sol. N° 1	5	5	0.25
Sol. N° 2	4	6	0.2
Sol. N° 3	3	7	0.15
Sol. N° 4	2	8	0.1
Sol. N° 5	1	9	0.05

- **Determinación individual de azúcares**

Se utilizó la metodología estandarizada por (Chirino, 2005), para la identificación de los azúcares presentes en las muestras por cromatografía de alta resolución,. Se consideraron seis azúcares: arabinosa, fructosa, glucosa, manosa, sacarosa y xilosa.

Se inyectaron los estándares de estos azúcares al cromatógrafo VARIAN Star 800 Modelo 410 con detector de índice de refracción encontrándose la mejor resolución para los picos presentes con la concentración al 1% utilizando como fase móvil agua





destilada grado (HPLC), un flujo de 1 ml/min y una presión aproximada de entre 170-200 atm, una temperatura de 70° C y un volumen de inyección de 20 µL. En estas condiciones el tiempo total de obtención de los cromatogramas fue de 20 min, utilizando una columna empacada MetaCarb 87C que contiene resinas de poliestireno sulfonado, una longitud de 150 mm con diámetro interno de 4.6 mm y diámetro externo de ¼ cm, recomendada para la separación de carbohidratos, capaz de resolver como picos separados, los monosacáridos bajo estudio.

Las curvas de calibración mostraron coeficientes de correlación muy cercanos a la unidad. Se prepararon soluciones patrones individuales con los azúcares para así determinar el tiempo de retención de cada azúcar, utilizando las mismas condiciones utilizadas en la mezcla e inyectando dos veces para ver la reproducibilidad del método. La comparación del tiempo de retención de cada azúcar (expresado en minutos) con los tiempos de los picos en la mezcla patrón permitió la correlación y asignación de los tiempos de retención de la siguiente manera: arabinosa: 10.0123; fructosa: 10.0305; glucosa: 7.4379; manosa: 8.7274; sacarosa: 6.1137; xilosa: 8.3346. Para la preparación de los estándares se pesaron aproximadamente 0.01 g de cada uno de los azúcares los cuales fueron diluidos posteriormente en 10 ml de agua destilada y las soluciones fueron homogeneizadas empleando el vortex; por otro lado la preparación de los extractos de la piña cruda como de las hojas, se filtraron los jugos al vacío para eliminar las partículas, así mismo, se diluyeron en una relación 1/10 con agua destilada y fueron homogeneizadas con el vortex. Se tomaron 2 ml de cada una de estas diluciones y se





filtraron nuevamente por medio de filtros más pequeños (esto para evitar que se tape la aguja de inyección del cromatógrafo) y posteriormente fueron inyectadas a un volumen de 30 µl en viales para realizar las lecturas en el cromatógrafo.

Los tiempos de retención permanecieron casi constantes en las muestras con un mínimo margen de error ya que la desviación estándar fue siempre menor al 2%.

- **Caracterización Química de las fibras de las hojas y piña del *Agave cupreata*.**

Se llevó a cabo la determinación del contenido del material lignocelulósico presente en las fibras de ambas fracciones del *A. cupreata* por medio de hidrólisis ácida Cuantitativa (HAC). Esta técnica permite hidrolizar todos los polisacáridos a monómeros de un modo cuantitativo, lo cual permite determinar tanto los azúcares presentes en la materia prima como la lignina correspondiente al residuo sólido que se obtiene. La hidrólisis ácida cuantitativa consta de dos etapas a continuación descritas.

Primera Etapa.

Durante esta primera etapa los polisacáridos son hidrolizados por medio del ácido sulfúrico concentrado a temperatura baja, obteniendo una disolución compuesta mayoritariamente por monómeros y oligómeros, así como un residuo sólido que fundamentalmente corresponde a la lignina Klason. Para ello fue necesario realizar lo siguiente:





Se pesó en una balanza analítica Sartorius modelo BP61S 0.5 g de cada una de las fibras de las cuales se conoce el contenido seco. Los 0.5 g se depositaron en tubos de ensaye en un baño de agua PolyScience modelo 20L-M, Niles IL a 30° C, y se le añadió a cada uno de ellos 5 ml de ácido sulfúrico al 72% el cual fue preparado siguiendo las normas estándar. Se mantuvieron los tubos durante 1 h con agitación, esto para lograr homogeneización de la mezcla con el material lignocelulósico.

Segunda Etapa.

En esta etapa se trató el contenido de cada uno de los tubos en medio ácido diluido a una temperatura de 120° C con el propósito de romper todos los oligómeros a monómeros. Para ello se vertió el contenido de cada tubo sobre un frasco con rosca de 250 ml. Se arrastró con agua destilada el residuo adherido y se le agregó agua adicional hasta obtener un peso total de disolución de 148.67 g, lo cual permitió llegar a una concentración del 4% de H₂SO₄. Los frascos fueron tapados y se introdujeron en una autoclave Felisa modelo FE-399 durante 1 h a 1 atm de presión. Finalizada la hidrólisis se retiraron los recipientes de la autoclave, y fueron enfriados en chorro de agua. Tras la hidrólisis realizada se obtiene una suspensión (hidrolizados), en que la fase sólida corresponde a la lignina de Klason y la fase acuosa contiene los productos de la hidrólisis de los polisacáridos (monómeros), los cuales fueron analizados por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).



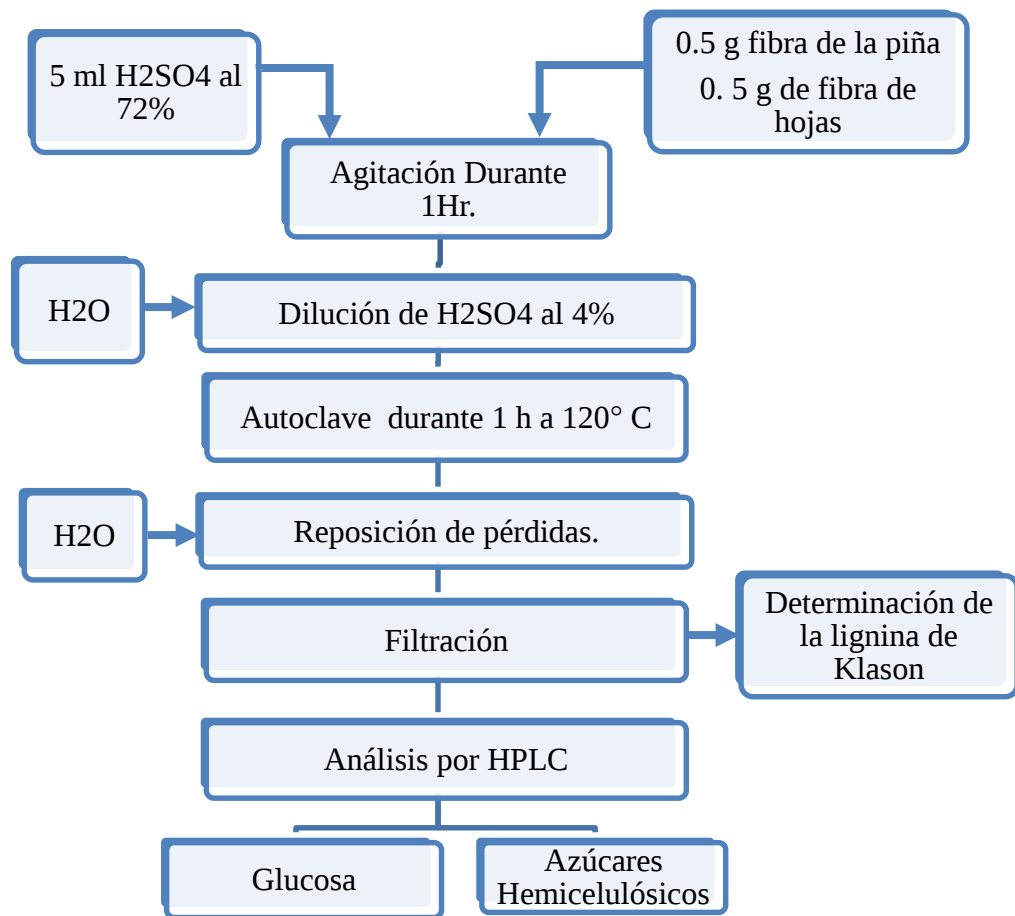


Figura 30 Proceso de la Hidrólisis Ácida Cuantitativa (HAC).





Determinación de la Lignina.

El peso del residuo insoluble que queda tras la hidrólisis ácida cuantitativa en las dos etapas se denomina lignina de Klason. Se determinó de la siguiente manera:

El precipitado fue filtrado a través de crisoles de placa filtrante con tamaño de poro n° 3 de peso seco conocido así como al vacío, fue lavado con agua destilada y se mantuvo en la estufa a 105° C durante 24 h. Transcurrido el tiempo se retiraron los precipitados y fueron enfriados en un desecador que contiene gel de sílice y posteriormente se determinó su peso.

Los cálculos realizados para la determinación del contenido porcentual de lignina de Klason en base seca se rige por la siguiente expresión:

$$LK = \frac{W_R}{W_h(1 - H)} * 100$$

Donde:

W_R = *Peso en g del residuo seco*

H = *Humedad de la muestra*

W_h = *Peso inicial total de la muestra antes de la HAC*

Determinación de Celulosa y Hemicelulosa.

Los líquidos obtenidos de la hidrólisis, fueron filtrados a través de membranas de 0.45 micras de diámetro de poro y posteriormente fueron analizados por cromatografía de alta resolución (HPLC) a las mismas condiciones empleadas para los estándares de

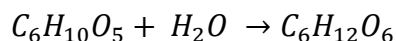




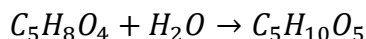
azúcares (glucosa, xilosa, arabinosa y fructosa). Para realizar la cuantificación, se consideró que los azúcares de seis carbonos fueron originados por el rompimiento de la celulosa, y por medio de la cinética y la estequiometría de la reacción se dedujo la cantidad original de celulosa en la muestra.

Reacciones de la hidrólisis:

Celulosa:



Hemicelulosa:



- **Determinación de las Regiones Óptimas para el Cultivo y Estimación de Producción de Bioetanol.**

La determinación de áreas potenciales para el cultivo del *A. cupreata* fue determinada en base a los datos de la tabla 11, para ello se analizaron los estados que están fuera del territorio de la denominación de origen (DOM).

Se tomaron las variables del potencial agroecológico descritas en la tabla 11, asignándoles un porcentaje de acuerdo a su influencia en el crecimiento del cultivo, por lo cual se le dio 50% a la temperatura nocturna, el 30% para la precipitación pluvial y el 20% restante a la altitud, este último como se ha descrito tiene gran importancia en la probabilidad de heladas y el contenido de azúcares que puede presentar la planta.





La estimación de producción de bioetanol se realizó en base a los resultados obtenidos por los balances de masa, así como, de los datos reportados por el INEGI, tomando en cuenta las hectáreas sin actividad agropecuarias o forestales estatales, las hectáreas de agostadero y aquellas que se encuentran sin vegetación. Para lo cual se consideró que por cada hectárea se siembran de 2,500 a 3,000 plantas de acuerdo a datos en manejo campesino sustentable del maguey papalote del Chilapan (Iillsley Granich, 2008).

El cálculo para la producción de bioetanol teórico se realizó empleando las fórmulas descritas en (Stuart & El-Halwagi, 2012), las cuáles se obtienen a partir de estequiometria empleando una densidad del bioetanol de 0.781 g/L.

$$\frac{\text{Litros de etanol}}{\text{tonelada de materia prima}} = 7.2715 (\% \text{Peso de celulosa})$$

$$\frac{\text{Litros de etanol}}{\text{tonelada de materia prima}} = 7.4367 (\% \text{Peso de Hemicelulosa})$$

$$\frac{\text{Litros de etanol}}{\text{tonelada de magteria prima}} = 6.5443 (\% \text{Peso de ART})$$



5. Resultados y Discusión.

5.1 Caracterización Física de la planta Agave Cupreata.

- **Determinación de las dimensiones de la planta.**

Del primer estudio realizado, se determinó el porcentaje en peso húmedo obteniéndose que aproximadamente el 40.18% del peso total de la planta, correspondiente al peso de la piña; mientras que el 59.82% restante corresponde a las pencas de la planta, como se muestra en la figura31.

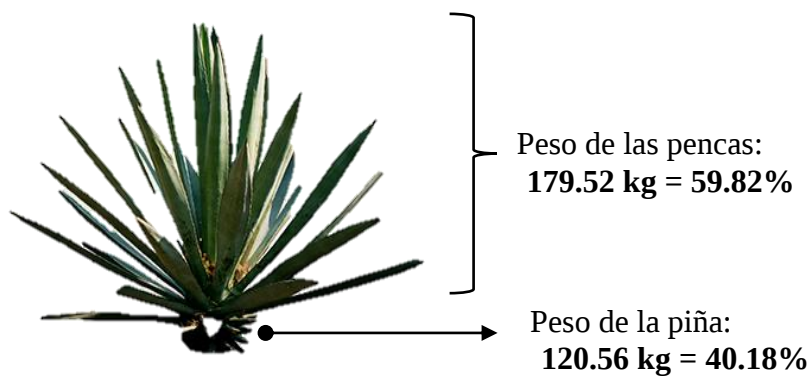


Figura 31 Conformación de la Planta

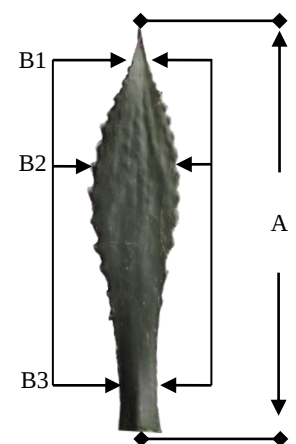


Figura 32 Penca de *A. cupreata*



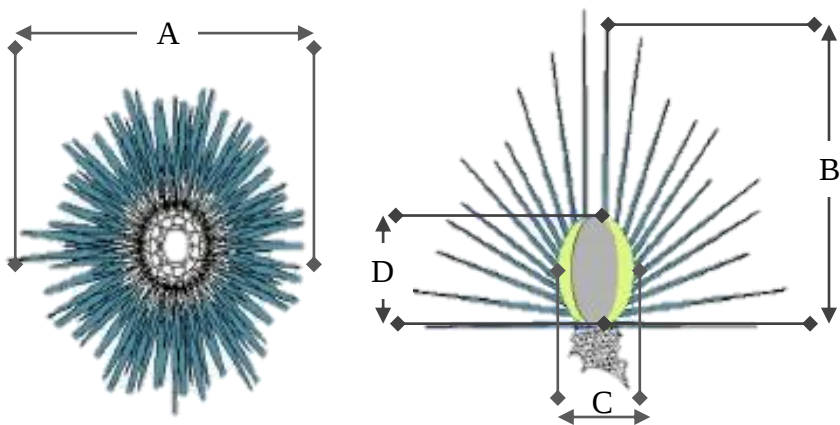


Figura 33 Dimensiones de la Planta de *A. Cupreata*

Tabla 13 Dimensiones de la Planta de *A. cupreata*, correspondientes a la Figura 31.

Propiedad Física		(m)		
		Piña ₁	Piña ₂	Valor Medio
A	Diámetro máximo de la planta	2.467	2.454	2.4605
B	Altura de la planta	1.5835	1.452	1.51775
C	Diámetro máximo de la piña	0.52	0.41	0.465
	Altura de la piña	0.61	0.43	0.52





- **Determinación de las dimensiones y peso de las pencas.**

El muestreo, para la determinación de los porcentajes de las fracciones, se realizó con cuatro pencas, dos de cada piña las cuales fueron tomadas aleatoriamente y pesadas obteniéndose un peso promedio de 1.57 ± 0.01 kg.

La tabla 14 muestra un resumen de las dimensiones de las pecas, las cuales hacen referencia a la figura 32.

Tabla 14 Dimensión de la penca correspondientes a la Figura 32.

Propiedad Física		Valor medio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
A	Largo (m)	0.99775	0.924	1.12	0.0853
B2	Ancho máximo (cm)	23.5250	20.7	26.4	3.0955
C	Espesor máximo (cm)	4.9	4.3	5.5	0.8485





- **Porcentaje de Humedad.**

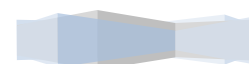
Se determinó el porcentaje de humedad antes de ser procesadas en el molino, tanto de la piña (tabla 15) como de las pencas (tabla 16), de donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 15 Porcentaje de humedad en la piña del *A. cupreata*.

Agave C.	Peso de la Muestra		%
Piña	Húmeda	Seca	Humedad
Muestra 1	4.7105	0.8662	81.6113
Muestra 2	2.2119	0.3082	86.0662
		Promedio	83.8387

Tabla 16 Porcentaje de humedad en las pencas del *A. cupreata*.

Agave C.	Peso de la Muestra		%
Pencas	Húmeda	Seca	Humedad
Muestra 1	3.3074	0.2930	91.1273
Muestra 2	0.4877	0.0732	84.9907
Muestra 3	2.721	0.3724	86.3028
		Promedio	87.1403





Posteriormente también se determinó el porcentaje de humedad del bagazo tanto de pencas como de la piña de la planta al salir de la prensa de donde se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación en las tablas 17 y 18:

Tabla 17 Porcentaje de Humedad en el Bagazo de la Piña de *A. cupreata*.

Bagazo Piña	Peso de la Muestra		%
	Húmeda	Seca	Humedad
Muestra1	2.5654	0.9254	63.9300
Muestra 2	2.6094	0.6087	76.6727
Promedio			70.3014

Tabla 18 Porcentaje de Humedad en el Bagazo de las Pencas de *A. cupreata*.

Bagazo Pencas	Peso de la Muestra		%Humedad
	Húmeda	Seca	
Muestra 1	0.2040	0.0428	79.0196
Muestra 2	3.0050	0.6170	79.4700
Promedio			79.2448





Como se puede observar en las tablas 15 y 16, la humedad es el principal constituyente de las plantas de agave, teniendo un promedio de humedad del 83.83% para la piña y 87.14% para las pencas, estos resultados pueden variar dependiendo de la edad de la planta, la cantidad de agua a la que estén expuestas así como la temporada de cosecha, siendo factores determinantes para la concentración de azúcares totales en la planta.

5.2 Caracterización Química de la Planta.

- **Cuantificación de Azúcares Totales reductores.**

Los resultados de la cuantificación de azúcares reductores en unidades de glucosa se muestran en la siguiente tabla, la curva para su determinación presentó un factor de correlación de $R^2 = 0.9978$.

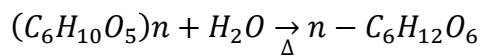
Tabla 19 Contenido de ART en las fracciones del *A. cupreata*

Muestra	Conc. [g/L]	° Brix
Extracto de Piña Cruda	29.4044	2.94044
Extracto de Hojas Cruda	6.3131	0.63131





De la tabla 19 se concluye que, como era de esperarse la fracción de la piña presenta un mayor contenido de azúcares reductores en comparación con el extracto de la fracción de las hojas. Pero en ambas fracciones el contenido de azúcares resulta demasiado bajo lo cual se le atribuye a que las plantas bajo estudio presentaban inflorescencia desarrollada (quiote) además de que ambos extractos pertenecen a la planta cruda, y la gran mayoría de los azúcares aún se encuentran en forma de polisacáridos especialmente en forma de inulinas. El efecto de la temperatura en la piña produce la hidrólisis de la inulina contenida en el agave hasta el grado de monosacáridos llevándose a cabo la siguiente reacción:





- **Determinación Individual de Azúcares.**

Para la determinación de los azúcares presentes en las muestras de los extractos se analizaron los cromatogramas que se muestran en las figuras 34 y 35

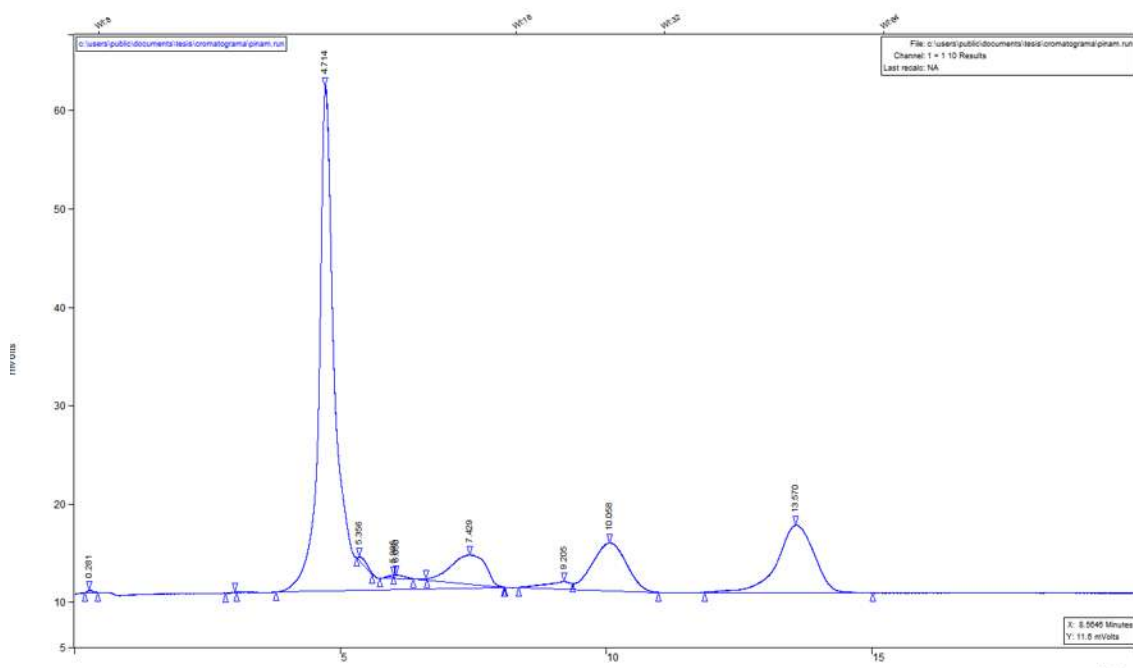


Figura 34 Cromatograma del extracto de la Piña Cruda del *A. cupreata*.

Tabla 20 Identificación y cuantificación de azúcares presentes en la piña cruda del *A. cupreata*.

Extractos de la Piña		
Tiempo de Retención	Azúcar	Cantidad de Azúcar [g/L]
4.714	----	----
7.4929	Glucosa	0.7928
10.058	Fructosa	1.395
13.57	----	----





Para el extracto de piña (figura 31) se observan 4 picos cuyos tiempos de retención corresponden a 4.714, 7.4929, 10.058, 13.57 minutos, los cuáles se pueden asignar a la inulina, glucosa y a la fructosa, el ultimo pico no se identificó. Dicha asignación se basa en estudios anteriores donde se ha observado que para la columna empleada a las mismas condiciones establecidas en este trabajo, el tiempo de retención correspondiente al pico que se encuentra a un tiempo de 4.714 minutos el cual corresponde a la inulina, sustentando esto con el resultado obtenido anteriormente con el bajo contenido de azúcares reductores en el agave crudo.

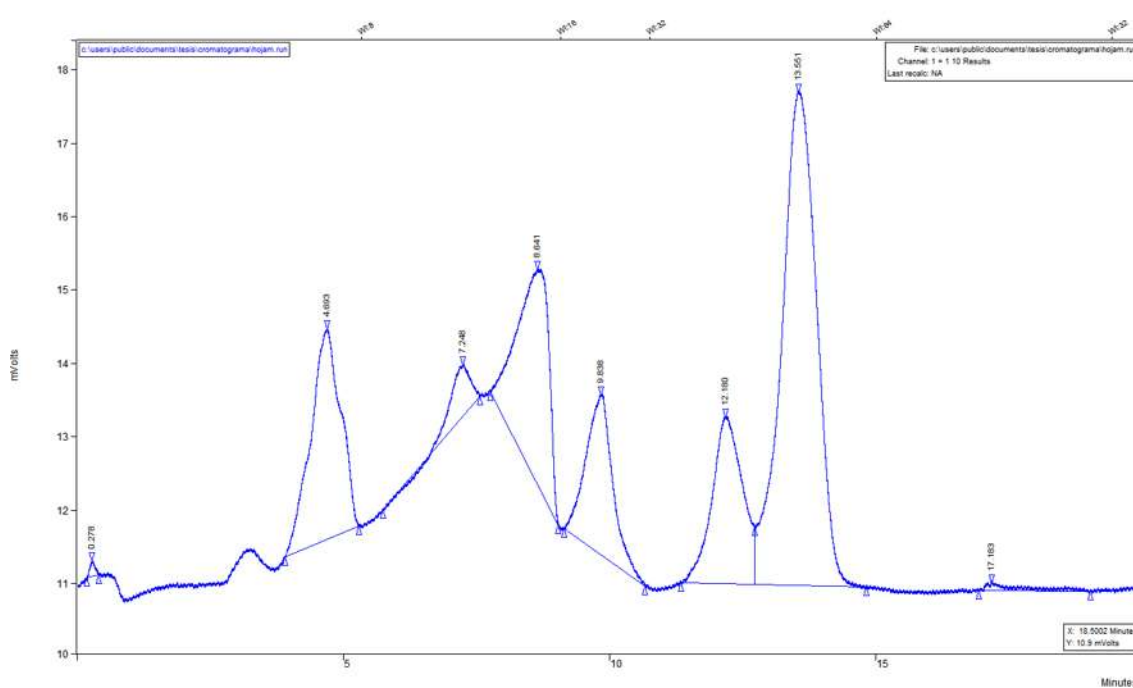


Figura 35 Cromatograma del extracto de las pencas de *A. cupreata*.





Tabla 21 Identificación y cuantificación de azúcares presentes en las pencas del *A. cupreata*.

Extracto de Pencas		
Tiempo de Retención	Azúcar	Cantidad de Azúcar [g/L]
4.693		
7.248	Glucosa	0.1184
8.641	Manosa	0.7503
9.838	Arabinosa	0.4386
12.18		
13.551		

Por otro lado la figura 35 muestra el cromatograma de las pencas, en el cual es posible apreciar una mayor cantidad de picos cuyo tiempo de retención son: 4.693, 7.248, 8.641, 9.838, 12.18, 13.551 minutos, tres de ellos no se identificaron, mientras que el segundo pico corresponde a la glucosa, seguido de la manosa y la arabinosa.

- **Determinación de los Componente Estructurales en la Fibra del *A. cupreata* (Celulosa, Hemicelulosa y Lignina).**

La caracterización del material lignocelulósico en el agave tiene la finalidad de conocer las cantidades de polímeros existentes en sus fibras, para poder estimar el potencial de producción del *Agave cupreata* como materia prima para la producción de bioetanol.





Se determinó la composición lignocelulósica inicial del agave, tanto de sus hojas como del bagazo de la piña, para lo cual se utilizó 1 g de cada una de las muestras con una humedad previamente cuantificada. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla siguiente (tabla 22):

Tabla 22 Rango del porcentaje en peso de materia seca para las fracciones del *A. cupreata*.

Muestra	Porcentaje en peso de materia seca		
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
Bagazo de la Piña	42-48%	14-19%	9-15%
Hojas	62-70%	4-8%	14-19%

- **Estados de la Republica Mexicana con Potencial para la plantación de *Agave cupreata*.**

Para el análisis del potencial agroecológico de cada estado se tomaron como referencia los datos reportados por el INIFAP, descartando aquellos estados con denominación de origen para la producción del mezcal (DOM; Oaxaca, Michoacán, Durango, Guanajuato, Guerrero, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas), estados con la denominación de origen para la producción del Tequila (DOT; Jalisco, Nayarit y otros que también son parte de la DOM), y aquellos estados de los que no se reportan las variables agroecológicas en la base de datos del INIFAP (Coahuila, Colima, DF, Querétaro, Nuevo León y Sinaloa) (INIFAP, 2002). La tabla 23 muestra el valor de las





variables agroecológicas que ayudaron para la determinación de las zonas con potencial para la distribución de la planta.

Tabla 23 Datos para el análisis de la zonas con potencial para la distribución del *A. cupreata*.

Estado	Variable Agroecológica.		
	Temperatura Nocturna Media Anual*	Precipitación Total Anual	Altitud
Aguascalientes	12.8148	400 a 800	2005
Baja California	14.649	menos de 100 a 600	299.2407
Baja California Sur	18.15	menos de 100 a 700	153.96
Campeche	22.65	800 a 2000	39.633
Chiapas	20.31	800 a más de 4500	744.22
Chihuahua	11.8	100 a 1200	1596.15
México	10.243	500 a 2000	2458.2
Morelos	16.925	800 a 2000	13440.93
Puebla	12.824	300 a 4500	1994.16
Quintana Roo	22.129	800 a 2000	43.8
Sonora	17.17	de menos de 100 a 1000	450.8
Tabasco	23.9	1500 a 4500	31.56
Tlaxcala	9.53	400 a 1200	2549.18
Veracruz	20.33	300 a más de 4500	444.893
Yucatán	22.46	400 a 2000	13.09

*Es el promedio de la Temperatura Media Anual de los Municipios de cada Estado





Del análisis de disponibilidad de tierras y como se muestra en la figura 36, para el cultivo de *A. tequilana weber* para la producción de bioetanol y de acuerdo a los datos reportados por el INEGI, el 54.3% del territorio nacional tiene un carácter Árido y Semiárido, de los cuales el 31.3% está formado por tierras de agostadero, territorio sin actividad agropecuaria o forestal (García-García, 2014).

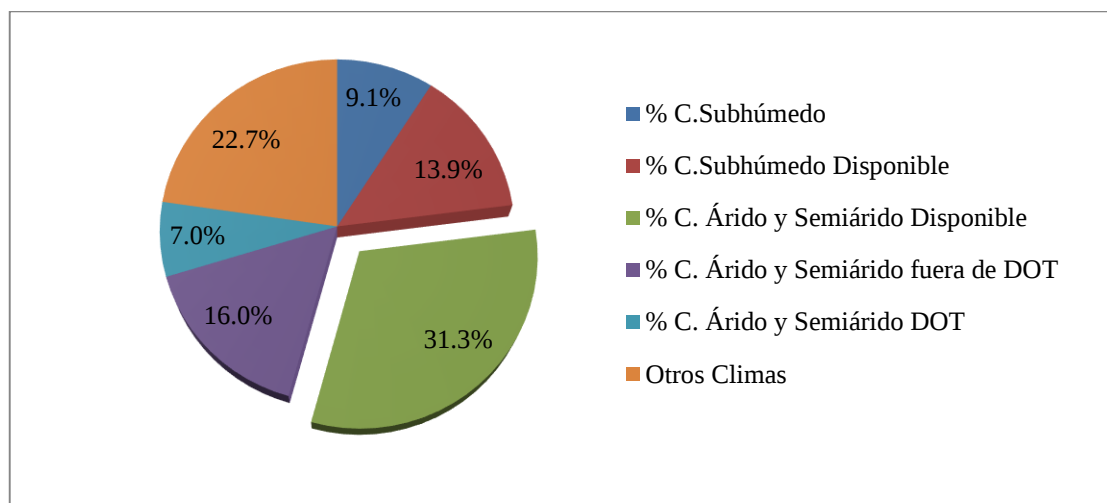
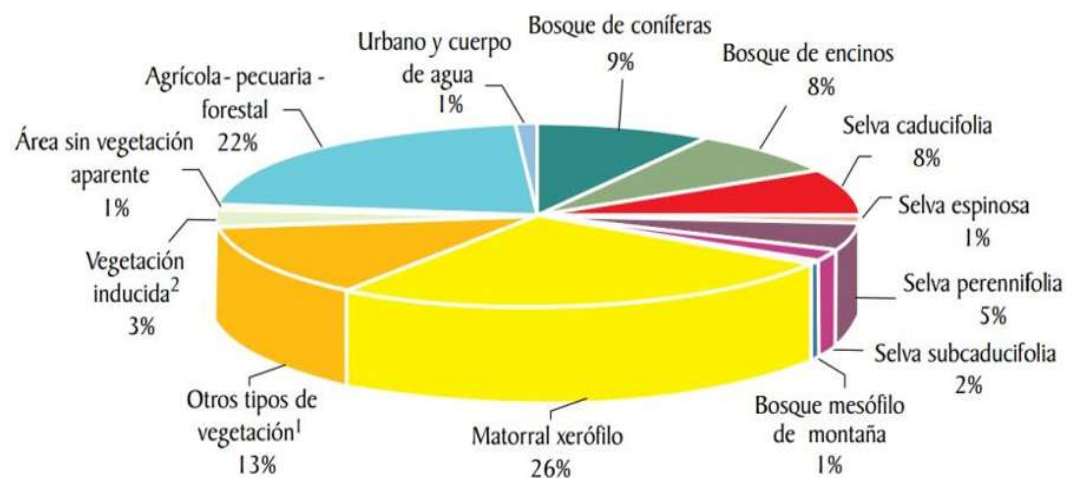


Figura 36 Climas y disponibilidad de Tierras de la República Mexicana (García-García, 2014).





El 1% (1964375 Ha.) del territorio nacional es área sin vegetación aparente como se puede ver en la figura 37 (SEMARNAT, 2006).



Nota: ¹ Incluye pastizal natural, humedal, vegetación halófila y gipsófila, bosque cultivado, pastizal inducido o cultivado, vegetación de galería, palmar natural, vegetación de dunas costeras, chaparral, matorral submontano, sabana, matorral subtropical, palmar inducido y sabanoide.

² Incluye Bosque cultivado, pastizal inducido o cultivado.

Fuente: INEGI. *Carta de uso actual del suelo y vegetación Serie III*. México 2005.

Figura 37 Vegetación y uso del Suelo en México (SEMARNAT, 2006).





La figura 38 muestra los estados contemplados en el estudio para la determinación de zonas con características óptimas, subóptimas y marginales para la plantación de *A. cupreata*. Sin embargo es necesario un estudio más detallado de las regiones de cada estado para las cuales es más factible realizar el cultivo.

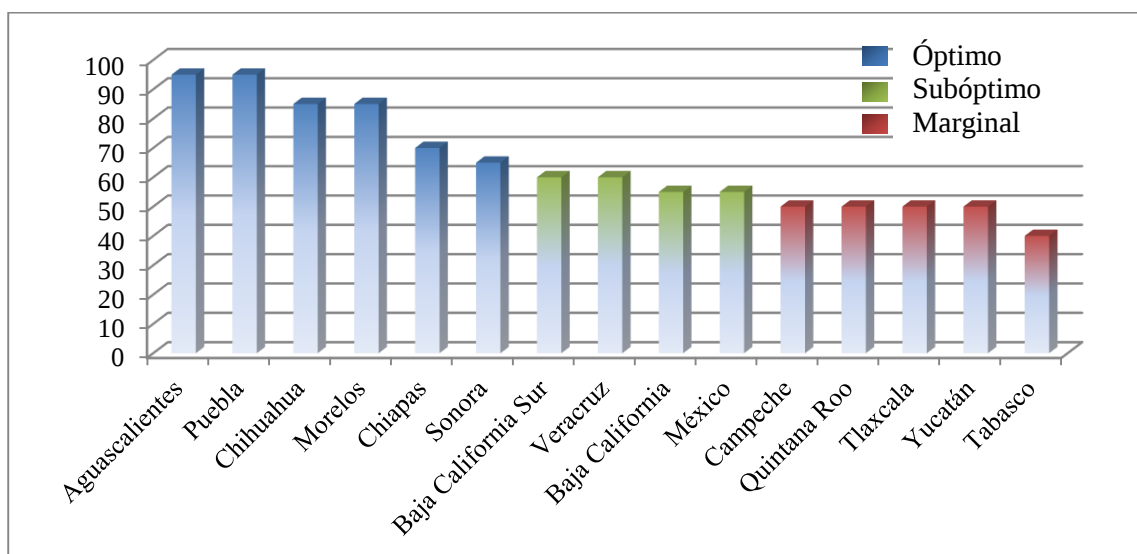


Figura 38 Potencial para la plantación de *A. cupreata* en orden descendente (clasificados en: Óptimo, Subóptimo y Marginal).

La suma de la superficie de estos estados representa el 48.70% del territorio nacional, de los cuales el 23.53% (46'216,244 ha) es territorio árido y semiárido.





- **Balance de Masa de la Piña de Agave Cupreata.**

El resultado de los balances de masa se muestra en las siguientes figuras:

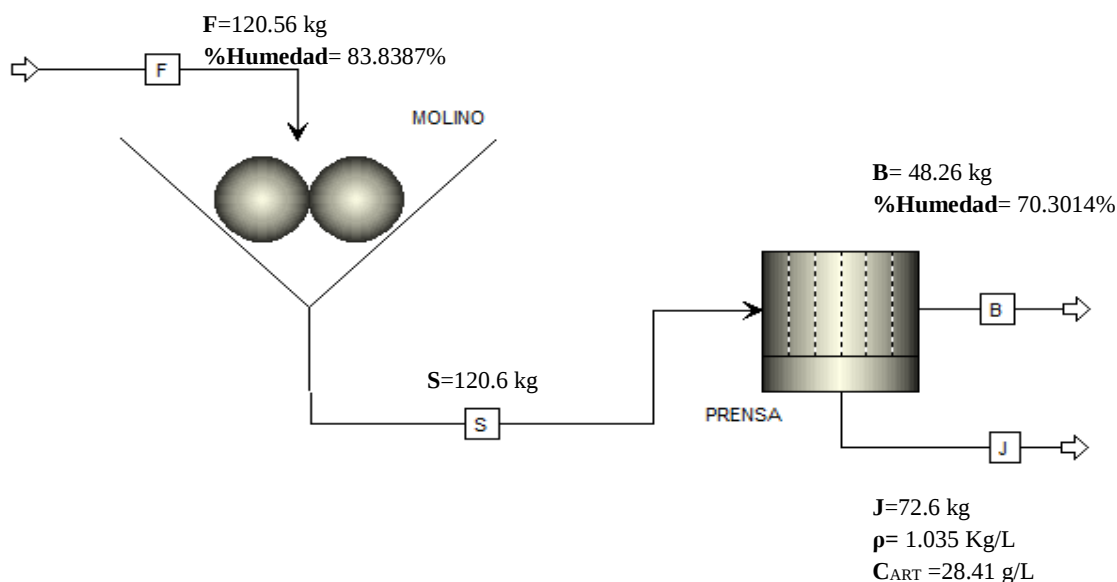


Figura 39 Diagrama del proceso de extracción de los jugos de la piña de *A. cupreata*.

Se determinó que el **40.03%** de la piña corresponde al bagazo (fibra) siendo el **59.97%** el jugo que se obtiene. Con un contenido total de azúcares reductores de **1992.81 g** en **70.145 L** de jugo; el jugo tiene una densidad de **1.035Kg/L**.





- **Balance de Masa de las Pencas de Agave Cupreata.**

Este balance de masa se realizó únicamente con una pequeña parte del total de las pencas por lo que se presenta el diagrama con estos resultados y después se escala hacia los valores correspondientes al total de pencas que corresponden de acuerdo a la proporción de pencas en la planta.

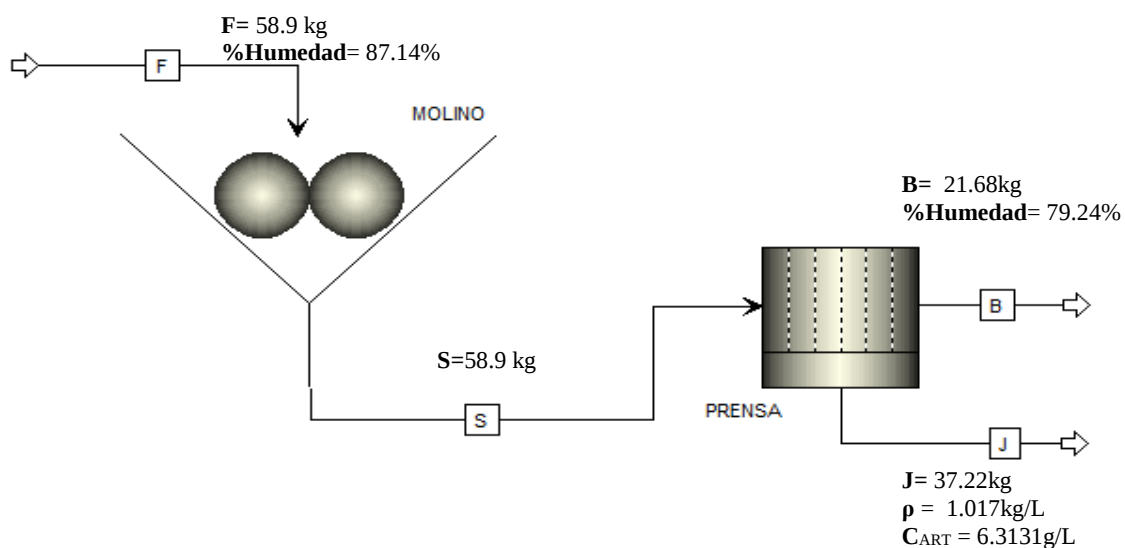


Figura 40 Diagrama del proceso de extracción de los jugos de las pencas de *A. cupreata*.

De lo anterior se determinó que el **36.8081%** de las pencas corresponde al bagazo siendo el **63.1919%** de jugo que se obtiene a partir de ellas. Con un contenido total de azúcares reductores en los **36.5978 L** de **231.0458 g**.





5.3 Proyección de la Producción de Bioetanol.

Aplicando las formulas de proyección se determinó que de una tonelada de piña se producen 327.2175L a partir de su contenido de celulosa, 122.7055L a partir de la hemicelulosa y 11.145L a partir del jugo, dando un total de 461.068L por cada tonelada de piña. Aplicando las mismas formulas para la hojas se obtienen 479.919L a partir de la celulosa, 44.6202L a partir de la hemicelulosa y 25.6732L a partir de los azúcares reductores en el jugo, con lo cual da un total de 550.2125L por tonelada de hojas.

Si ahora se toma en cuenta que el porcentaje en peso de la piña del agave es del 40.03% y el resto pertenece a las hojas, la producción por tonelada de agave seria de 514.5279L.

Considerando que una planta en promedio pesa 100kg aproximadamente, para el territorio disponible de los estados con características óptimas y subóptimas para su cultivo se produciría un total de 5.940035259 billones de litros de etanol. Lo cual cubriría un total de 85 años del uso de combustible tomando como referencia datos publicados por PEMEX donde declara un consumo de gasolina de 191, 105, 980L por día. Estos datos se estimaron tomando en cuenta el uso integral de la planta (cruda) en regiones aptas para su crecimiento.





6. Conclusiones.

El *Agave cupreata* es un cultivo de alto rendimiento que no entra en conflicto con cultivos de productos alimenticios, requiere un mínimo de aportes de agua y de nutrientes, por lo que puede ser cultivado en tierras marginales, reduciendo con ello la competencia de uso de suelo, se adapta fácilmente a condiciones climatológicas extremas.

Es de aceptarse la hipótesis ya que la planta de *Agave cupreata* es un cultivo que presenta un alto potencial para su uso integral como materia prima lignocelulósica en la producción de bioetanol por medio de tecnología de 2da generación, según los estudios hechos en este trabajo.

Se determinó que el *Agave cupreata* está conformado por dos fracciones, siendo **la primera** de ellas las pencas (hojas) las cuales dan lugar a la parte aérea de la planta, cuyas dimensiones promedio son las siguientes: 0.9977 ± 0.0853 m de largo, 23.525 ± 3.0955 cm de ancho máximo, 4.9 ± 0.8485 cm de espesor máximo y un peso promedio de 1.57 ± 0.01 kg; la **segunda fracción** corresponde al tallo al cual se le conoce como piña, obteniéndose las siguientes dimensiones promedio para esta: diámetro máximo para la planta (incluyendo pencas) de 2.4605 ± 0.0065 m, altura de la planta (incluyendo pencas) 1.51775 ± 0.06575 m, con un diámetro máximo de la piña de 0.465 ± 0.055 m y una altura máxima de 0.52 ± 0.09 m.





Los resultados de la caracterización física de la planta indicaron que el porcentaje de humedad de la materia es muy elevado presentando un $83.8387 \pm 2.227\%$ para la piña y un $87.1403 \pm 2.643\%$ para las hojas del agave. Después del proceso de separación (retirando el jugo de la fibra) llevado a cabo por el prensado, el porcentaje de humedad del bagazo de la piña fue de $70.3014 \pm 6.37\%$, mientras que para el bagazo de las hojas el porcentaje fue de $79.2448 \pm 0.2252\%$.

Para la caracterización química, a través del análisis de ART se determinó que el extracto de la piña contenía 28.41 g/L y el extracto de las hojas 6.3131g/L. De la determinación individual de azúcares por cromatografía de alta resolución (HPLC), en la piña del agave se pudo observar la presencia de glucosa con concentración de 7.928g/L, Fructosa con concentración de 13.95g/L, el cromatograma para esta fracción muestra también otros dos picos uno al tiempo de retención de 4.714 minutos el cual corresponde a la inulina, el otro pico a un tiempo de retención de 13.57 no se identificó. Con respecto a las hojas se pudo observar una mayor cantidad de picos en el cromatograma, identificando solo a tres de estos. Glucosa 1.1847g/L, manosa 7.503g/L y arabinosa 4.386g/L.

Las dimensiones de la planta así como la composición física y química (porcentaje de humedad y cantidad de azúcares), pueden variar por diferentes factores en el que se desarrolle tales como la edad del agave, temperatura, humedad del ambiente, precipitación pluvial, altitud, tipo de suelo (según la época en que se coseche).





Se determinó que el bagazo de la piña representa el 40.03% del peso de la piña, los cuales contienen un rango de porcentaje del 42-48% de celulosa, 14-19% de hemicelulosa y del 9-15% de lignina. El bagazo de hojas representa el 36.8081% en peso de estas, y se encuentra igualmente por un rango de porcentaje de celulosa del 62-70%, 4-8% de hemicelulosa y 14-19% de lignina.

Se determinaron los estados que presentaban las características geográficas y climatológicas que favorecen el crecimiento y desarrollo del agave, los cuales son: Aguascalientes, Puebla, Chihuahua, Morelos, Chiapas, Sonora, Baja California Sur, Veracruz, Baja California y el Estado de México, cuya producción de bioetanol a partir de tierras de agostadero, sin actividad agropecuaria o forestal y sin vegetación aparente y haciendo el uso integral del cultivo sería de 5.94 billones de litros, que tomando en cuenta la demanda de gasolina por día, cubriría un poco mas de 85 años. En el estudio se descartaron los estados que pertenecen a la Denominación de Origen del Mezcal y a los que pertenecen a la Denominación de Origen del Tequila, de estos últimos se puede utilizar los desechos que resultan de la elaboración del Mezcal y del Tequila.

El empleo del *Agave Cupreata* como materia prima para la elaboración de bioetanol el cual es una de las fuentes de energía renovables que puede reemplazar en parte el uso de los combustibles fósiles, podría contribuir a la diversificación de la energía en el país, a la apropiación de tecnologías emergentes, sería una solución a la problemática ambiental generada por los desechos agroindustriales de las industrias Mezcaleras, se reducirían las emisiones de gas invernadero y se generaría empleo en el área rural.





El uso de combustibles a partir de biomasa para el transporte, permite un bajo requerimiento de energía proveniente de combustibles fósiles, reduciendo emisiones de gases de efecto invernadero, así como también la dependencia de la económica global de estos recursos energéticos no renovables.

Las investigaciones de este tipo son de vital importancia no sólo para el avance científico sino también para el desarrollo económico, ambiental, social y humano.

7. Recomendaciones.

Se requiere de una mejor implementación viable en el pre-tratamiento de la biomasa, así como un eficiente proceso de hidrolizado y purificado del producto final.

Hacer un estudio más detallado, así como el uso de satélites para la zonificación de la plantación del agave, con uso de datos más recientes.

En futuros trabajos, sería interesante hacer un estudio económico para determinar la rentabilidad de la producción de bioetanol a partir del *Agave cupreata*, así como las reacciones de combustión a las diferentes concentraciones de la mezcla gasolina-etanol y el impacto que tienen estas en los vehículos del estado.





Bibliografía.

Alén, R., 2000. *Structure and chemical composition of wood*. Helsinki: Forest Products Chemistry.

AOAC, 1984. *Official Methods of Analysis*. California: The Association.

Aro, N., Pakula, T. & Penttilä, M., 2005. *Transcriptional regulation of plant cell wall degradation by filamentous fungi*.

Arredondo, C. & Espinosa, H., 2005. *Manual del Magueyero*. Oaxaca(Oaxaca): Comisión de trabajo para el desarrollo responsable de la industria del maguey Y el mezcal en Oaxaca.

Ballesteros, I., Oliva, J. M., Saez, F. & Ballesteros, M., 2001. *Ethanol production by simultaneous saccharification and fermentation of olive oil extraction*. Appl. Biochem. Biotechnol.

Borland, A. M., Griffiths, H., Hartwell, J. & Smith, J. A., *Exploiting the potential of plants with crassulacean acid metabolism for bioenergy production on marginal lands*. Journal of Experimental Botany.

Carpita, N. C. & Gibeaut, D. M., 1993. *Structural models of primary-cell walls in flowering plants- consistency of molecular-structure with the physical properties of the walls during growth*.





Chirino, W., 2005. *Determinación de azúcares presentes en el mosto del Agave cocui mediante cromatografía.*

Chum, H. y otros, 2011. *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.* Cambridge.

CNA, 2005. *Estadísticas del Agua en México.* [En línea]
Available at: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/07_agua/cap7_1.html
[Último acceso: Mayo 2014].

CONABIO, 2006. *Biodiversidad Mexicana.* [En línea]
Available at: http://www.biodiversidad.gob.mx/usos/mezcales/A_cupreata.html
[Último acceso: 5 Marzo 2014].

Espinosa, H. y otros, 2002. *La materia prima para producir el mezcal oaxaqueño.* Oaxaca(Oaxaca): INIFAP-SAGARPA.

FAO., 1996. *Zonación agroecologica: Guía General. Boletín de Suelos.* Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación..

FAO, 1994. *ECOCROP 1. The adaptability of the FAO crop environmental requirements database.* Roma: AGLS. FAO.

FAO, 2008. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación.* [En línea]
Available at: www.fao.org.ISSN 02511-1371





Fernández, J., 1995. *La biomasa como fuente de energía y productos no alimentarios*.

Madrid: CIEMAT.

Flores & Valdés, 1988. *Regiones Áridas y Semiáridas*.

García Mendoza, A. J., 2007. Los Agaves de México. *Ciencia*, Septiembre, Issue 87, pp. 16-21.

García-García, B. A., 2014. *Análisis de Factibilidad de Producción de Bioetanol a partir de Agave Tequilero*. Morelia: Universidad Michoacana de San nicolas de Hidalgo.

García-Mendoza, A. J., 2012. *La Jornada del Campo*. [En línea]
Available at: <http://www.jornada.unam.mx/2012/02/18/cam-pais.html>
[Último acceso: 5 Marzo 2014].

García-Mendoza, A. J., 2012. México, país de magueyes. *La Jornada del Campo*, 18 Febrero, Issue 53.

García-Reyes, B. R. & Rangel-Mendez, J. R., 2009. *Cotribution of agrowaste material main components (hemicelluloses, cellulose, and lignin) to the removal of chromium (III) from aqueous solution*. Journal of Chemical Tecnoogy and Biotechnology.

Gentry, S. H., 2004. *Agaves of Continental North America*. Arizona: University of Arizona Press.

Hernández, M., 1997. *Decoloración de efluentes alcalinos de industrias papeleras por Strobotomycesspp: aspectos químicos y enzimáticos*. Universidad de Alcalá de Henares.





Higuchi, T., 1990. *Lignin Biochemistry: biosynthesis and bio degradation*. s.l.:s.n.

Illsley Granich, C., 2008. *Manejo campesino sustentable del maguey papalote del Chilapan. Fase II. Grupo de Estudios Ambientales AC.*. México, DF: Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. ES004.

Illsley, C. y otros, 2005. *La riqueza de los bosques mexicanos: más allá de la madera. Experiencias de comunidades rurales.*. Primera ed. México(Distrito Federal): SEMARNAT.

INEGI, 2013. *Anuario Estadístico y Geográfico por Entidad Federativa 2013*.

INIFAP. *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*. [En línea]

Available at: <http://www.agromapas.inifap.gob.mx/descargas/presentacion.html>

[Último acceso: Junio 2014].

Iñiguez-Covarrubias, G., Lange, S. & Rowell, R., 2001. *Utilization of byproducts from the tequila industry. Part 1: Agave bagasse as a raw material for animal feeding and fiberboard production*. Bioresource Technology.

Joseph, J., 2005. *H. Ethanol Fuel: vehicular application technology Anfavea, Energy and Enviroment Division*. São Paulo.

Lynd, R. L., Cushman, J. H., Nichols, R. J. & Wyman, C. E., 1991. Fuel ethanol from cellulosic biomass. *Science*, 15 Marzo, 251(4999), pp. 1318-1323.





Maruyama, K. y otros, 1996. *O-acetylated xyloglucan in extracellular polysaccharides from cell suspension cultures of Mentha.*

McMurry, J., 2008. Química Orgánica. En: S. Cervantes Gonzáles, ed. *Química Orgánica*. 7a. edición ed. México, DF: Cengage Learning Editores, pp. 1006-1007.

Mezcalpedia, 2011. *Mescalpedia*. [En línea] Available at: http://www.mezcalpedia.com/index.php?option=com_content&view=article&id=89&Itemid=54

[Último acceso: 5 Marzo 2014].

Miller, G., 1959. *Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar.*

Mosier, N., Wyman, C. & et, a., 2005. *Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass*. Bioresour Technol.

NMX, 1986. *NMX-F-083-1986. ALIMENTOS. DETERMINACIÓN DE HUMEDAD EN PRODUCTOS ALIMENTICIOS.*, Mexico DF.: Diario Oficial de la Federación.

Nobel, P. S., 1994. *Remarkable agaves and cacti*. New York: Oxford University Press..

OCDE-FAO, 2011. *Perspectivas Agrícolas 2011-2020*. OECD Publishing y FAO.

Piemntel, D. y otros, 1980. *Biomass Energy from Crop and Forest Residues*. Residues Science.





Potter, M. & Wiggert, D., 2006. *Mecánica de fluidos*. México, DF.: Thompson.

REMBIO, 2011. *La Bioenergía en Mexico. Situación actual y perspectivas*. Mexico: Red Mexicana de Bioenergía A. C..

Reyes Habib, D. J., 2007. Etanol como aditivo de la gasolina. En: *EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS DE GASOLINAS SIN PLOMO CON ETANOL UTILIZANDO UN MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL*. Barcelona, p. 28.

Rubin, E. M., 2008. *Genomics of cellulose*. Ruíz, C. J. A., 2007. *Requerimientos agroecológicos y potencial productivo del Agave Tequilana Weber en México*. Conocimientos y prácticas agronómicas para la producción de Agave Tequilana Weber en la Zona de Denominación de Origen. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias..

Ruíz, C. J. A., E., P. B. & J., Z. H., 2002. *Regiones térmicas óptimas y marginales para el cultivo de Agave tequilana en el estado de Jalisco*. Jalisco: Agrociencia.

Ruíz, C. J. A. y otros, 1999. *Requerimientos Agroecológicos de Cultivos*.. Jalisco(Guadalajara): Conexión Gráfica.

SAGARPA, *bioenergéticos.gob.mx*. [En línea]
Available at: <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/bioetanol/balance-econologico.html>

[Último acceso: 10 Febrero 2014].





SAGARPA, *bioenergéticos.org.mx*. [En línea]
Available at: <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/bioetanol.html>
[Último acceso: 10 Febrero 2014].

Santiago, D. I., Rodríguez De García, N. & G., M., *Potential for pulp and paper of agave plant fibers*. Revista Forestal Venezolana.

SEMARNAT, 2006. *ATLAS GEOGRÁFICO DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES*. México: SEMARNAT.

SEMARNAT, *Manual que establece los Criterios Técnicos para el Aprovechamiento Sustentable de Recursos Forestales no Maderables de Clima Templado-Frío*.

SENER, 2013. Balance Nacional de Energía. *Secretaría de Energía*.

SIAP, 2014. *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación*. [En línea]
Available at: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado>
[Último acceso: 15 Abril 2014].

Sims, I. M. y otros, 1996. *Structural characterization of xiloglucan secreted by suspension-cultured cells of Nicotina plumbaginifolia*.

Smith, A. M., 2008. *Prospects for increasing starch and sucrose yields for bioethanol production*. The Plant Journal.

Somerville, C., 2007. *Biofuels*. Current Biology.





Stuart, R. P. & El-Halwagi, M. M., 2012. *Integrated Biorefineries, Desing, Analysis and Optimization*. A Champma all book.

Triana Caraton, C. F., 2010. *Produccion de Etanol a partir de residuos provenientes del cultivo de café*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.

UNAM, FACULTAD DE QUÍMICA. [En línea]
Available at: <http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/12etanol.pdf>
[Último acceso: 14 Febrero 2014].

Valenzuela-Zapata, 2007. *Las denominaciones de origen Tequila y Mezcal y la biodiversidad en el género Agave*. Guadalajara: Universidad Autónoma de Guadalajara.

Vries, R. P. & Visser, J., 2001. *Aspergillus Enzyme Involved in Degradation of Plant Cell Wall Polysaccharides*.

Wheals, A. E., Basso, L. C., Alves, D. M. & Amorim, H. V., 1999. *Fuel ethanol after 25 years*. Elsevier Scice.





Glosario.

Azúcares Reductores. Todos los monosacáridos son azúcares reductores, ya que al menos tienen un -OH hemiacetalico libre, por lo que dan positivo a la reacción con reactivo de Fehling, a la reacción con reactivo de Tollens, a la Reacción de Maillard y la Reacción de Benedict. Otras formas de decir que son reductores es decir que presentan equilibrio con la forma abierta, presentan mutarrotación (cambio espontáneo entre las dos formas cicladas α y β), o decir que forma osazonas.

Bioenergía o energía de biomasa es un tipo de energía renovable procedente del aprovechamiento de la materia orgánica e industrial formada en algún proceso biológico o mecánico, generalmente es sacada de los residuos de las sustancias que constituyen los seres vivos (plantas, ser humano, animales, entre otros), o sus restos y residuos. El aprovechamiento de la energía de la biomasa se hace directamente (por ejemplo, por combustión), o por transformación en otras sustancias que pueden ser aprovechadas más tarde como combustibles o alimentos.

Biomasa:

f. Biol. Materia total de los seres que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o de volumen.

f. Biol. Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

Calor Latente de Vaporización. Es el calor absorbido por el combustible al cambiar de líquido a vapor sin sufrir cambio alguno en la temperatura.





Carbohidratos. Los carbohidratos son aldehídos y cetonas polihidroxiados. Se clasifican de acuerdo con el número de átomos de carbonos y el tipo de grupo carbonilo que contiene. Los monosacáridos se clasifican adicionalmente como azúcares D o azúcares L, dependiendo de la estereoquímica de los carbohidratos se representa utilizando proyecciones de Fischer, las cuales representan a un centro quiral como la intersección de dos líneas cruzadas.

Contaminación. Es la introducción de sustancias en un medio que provocan que este sea inseguro o no apto para su uso. El medio puede ser un ecosistema, un medio físico o un ser vivo. El contaminante puede ser una sustancia química, energía (como sonido, calor, luz o radiactividad).

Densidad relativa, es la relación que existe entre el peso de un cuerpo y el de igual volumen de agua a una temperatura normalmente medida a 20° C (Potter & Wiggert, 2006). Esta propiedad resulta importante debido a que a mayor densidad mayor es la pérdida de potencia en el motor, ya que parte del combustible al vaporizar tiende a quedarse en los cambios de dirección del sistema de admisión, afectando el llenado de los cilindros.

Disacáridos son carbohidratos complejos en los que azúcares simples están unidos por un enlace glicósido entre el centro anómero de una unidad y un hidroxilo de la segunda unidad. Los azúcares pueden ser el mismo, como en la maltosa y en la celobiosa, o diferentes, como en la lactosa y la sacarosa. El enlace glicosídico puede ser α (maltosa) o β (celobiosa, lactosa) y puede involucrar cualquier hidroxilo del segundo azúcar. Es





más común un enlace $1 \rightarrow 4$ (celobiosa, maltosa), pero también se conocen otros como el $1 \rightarrow 2$ (sacarosa).

Factibilidad se refiere a la disponibilidad de los recursos necesarios para llevar a cabo los objetivos o metas señaladas. Generalmente la factibilidad se determina sobre un proyecto. Estos resultados se entregan a la gerencia, quienes son los que aprueban la realización del sistema informático. El estudio de factibilidad, es una tarea que suele estar organizada y realizada por los analistas de sistemas. El estudio consume aproximadamente entre un 5% y un 10% del costo estimado total del proyecto, y el período de elaboración del mismo varía dependiendo del tamaño y tipo de sistema a desarrollar.

Grado de inclinación de un terreno. Medido por el ángulo que forma con respecto a la horizontal.

Índice del cambio en la elevación de un área del terreno. A menudo se conoce como una relación de elevación sobre el plano; normalmente expresada en porcentaje. Observar que en estas definiciones las formas expresar la medida de la pendiente en algunos casos es a través de “porcentaje” o “grados”.

Monosacáridos. Estos existen por lo general como hemiacetales cíclicos en vez de aldehídos o cetonas de cadena abierta. El enlace hemiacetal resulta de la reacción del grupo carbonilo con un grupo $-OH$ alejado de tres a cuatro átomos de carbono. Un hemiacetal cíclico de cinco miembros se llama furanosa, y un hemiacetal cíclico de seis





miembros se llama piranosa. La ciclación conduce a la formación de un centro quiral nuevo y a la producción de dos hemiacetales diastereoméricos, llamados anómeros α y β .

Pendiente de un terreno. Todo plano desviado de la horizontal del suelo recibe el nombre general de pendiente.

Poder Calorífico de un Combustible. Es la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad empleada de combustible. Y de acuerdo a como se expresa el estado del agua en los productos de reacción de pueden dividir en:

- Poder Calorífico Superior: expresa la cantidad de calor que se desprende en la reacción completa de la unidad de combustible con el agua de los humos en forma líquida a 0° C y 1 atm.
- Poder Calorífico Inferior: Expresa la cantidad de calor que se desprende en la reacción completa de la unidad de combustible con el agua de los humos en estado de vapor.

Polisacáridos. Como la celulosa, el almidón y el glucógeno, se utilizan en la naturaleza como materiales estructurales, como medios de almacenaje de energía a largo plazo y como marcadores en la superficie celular (McMurry, 2008).

Temperatura de Auto ignición. Es la temperatura mínima a la que un gas inflamable o mezcla que se encuentra en contacto con el aire, arde espontáneamente sin necesidad de una fuente de ignición, para alcanzar la reacción de combustión.





Translocación de sustancias. En general, la translocación se realiza por la acción del agua que se desplaza a través del suelo. Normalmente, el movimiento es vertical descendente, pero en relieves montañosos el desplazamiento lateral u oblicuo adquiere una extraordinaria importancia. Por otra parte, en los ambientes más o menos áridos los movimientos verticales ascendentes toman particular interés. En general, es válido suponer que el agua de precipitación se desplaza desde la superficie, a través de los poros del suelo, a horizontes cada vez más profundos debido a la acción de la gravedad.

Volatilidad. Es una medida de la facilidad con que una sustancia se evapora, dicha propiedad tiene impacto en el compartimiento del motor durante la puesta en marcha y la aceleración, ya que sin ella es imposible la inflación.





Anexo 1. Hoja de seguridad del Etanol.

FORMULA: C_2H_6O (CH_3CH_2O).

PESO MOLECULAR: 46.07 g/mol.

COMPOSICIÓN: C: 52.24%; H: 13.13% y O: 34.73%.

GENERALIDADES:

El etanol es un líquido incoloro, volátil, con un olor característico y sabor picante.

También se conoce como alcohol etílico. Sus vapores son más pesados que el aire.

Se obtiene, principalmente, al tratar etilenos con ácido sulfúrico concentrado y posterior hidrólisis. Algunas alternativas de síntesis son: hidratación directa del etileno en presencia de ácido fosfórico a temperaturas y presiones altas y por el método de Fischer-Tropsch, el cual consiste en la hidrogenación catalítica de monóxido de carbono, también a temperaturas y presiones altas. De manera natural, se obtiene a través de fermentación, por medio de levaduras a partir de frutas, caña de azúcar, maíz, cebada, sorgo, papas y arroz entre otros, generando las variadas bebidas alcohólicas que existen en el mundo. Después de la fermentación puede llevarse a cabo una destilación para obtener un producto con una mayor cantidad de alcohol.

El etanol se utiliza industrialmente para la obtención de acetaldehído, vinagre, butadieno, cloruro de etilo y nitrocelulosa, entre otros. Es muy utilizado como disolvente en síntesis de fármacos, plásticos, lacas, perfumes, cosméticos, etc. También se utiliza en mezclas anticongelantes, como combustible, como antiséptico en cirugía, como materia prima en síntesis y en la preservación de especímenes fisiológicos y patológicos.





El llamado alcohol desnaturalizado consiste en etanol al que se le agregan sustancias como metanol, isopropanol o, incluso piridinas y benceno. Estos compuestos desnaturalizantes son altamente tóxicos por lo que, este tipo de etanol, no debe ingerirse.

NÚMEROS DE IDENTIFICACIÓN:

CAS: 64-17-5	RTECS: KQ 630000
UN: 1170	NFPA: Salud: 0 Reactividad: 0 Fuego:
NIOSH: KQ 6300000	3
NOAA: 667	HAZCHEM CODE: 2 SE
STCC: 4909146	MARCAJE: LIQUIDO INFLAMABLE

SINÓNIMOS:

Etanol Absoluto	Alcohol	de	En inglés:
Alcohol	Fermentación		Ethyl Alcohol
Alcohol Anhidro	Metil Carbinol		Anhydrol
Alcohol Deshidratado	Hidrato de Etilo		Alcare Hand Degermer
Alcohol Etilico	Alcohol de Grano		Algrain
Etanol	Alcohol de Papa		Cologne Spirit
	Hidróxido de Etilo		Ethanol 200 Proof





Ethicap	Fresh M	Jaysol S
Molasses Alcohol	Tecsol C	Spirit Tecsol
SD Alcohol 23-	Spirits of Wine	
Hydrogen	NCI-C03134	
Synasol	Jaysol	

Otros idiomas:

Aethanol (Alemán)	Alcool Etylique (Francés)
Aethylalkohol (Alemán)	Ethylalcohol (Holandés)
Alkohol (Alemán)	Alcool Etilico (Italiano)
Alkohol etylowego (Polaco)	Etanolo (Italiano)
Etylowy Alkohol (Polaco)	

PROPIEDADES FÍSICAS Y TERMODINÁMICAS.

Punto de Ebullición: 78.3 °C.

Índice de Refracción (a 20 °C): 1.361

Presión de vapor: 59 mm de Hg a 20°C.

Punto de fusión: -130°C.

Densidad: 0.7893 a 20°C.





Densidad de vapor: 1.59 g/ml

Temperatura de ignición: 363°C.

Punto de inflamación (Flash Point): 12°C (al 100%), 17°C (al 96%), 20°C (al 80%), 21°C (al 70%), 22°C (al 60%), 24°C (al 50%), 26°C (al 40%), 28°C (al 30%), 36°C (al 20%), 40°C (al 10%) y 62°C (al 5%).

Limites de explosividad: 3.3-19%

Temperatura de autoignición: 793 °C.

Punto de congelación: -114.1 °C.

Calor específico: (J/g °C): 2.42 (a 20°C).

Momento dipolar: 1.699 debyes.

Constante dieléctrica: 25.7 (a 20°C).

Solubilidad: Miscible con agua en todas proporciones, éter, metanol, cloroformo y acetona.

Temperatura crítica: 243.1°C.

Presión Crítica: 63.116 atm.

Volumen crítico: 0.167l/mol

Tensión superficial (din/cm): 231 (a 25°C).

Viscosidad (cP): 1.17 (a 20°C).

Calor de vaporización en el punto normal de ebullición (J/g): 839.31.

Calor de combustión (J/g): 29677.69 (a 25°C).

Calor de Fusión (J/g): 104.6





El etanol es un líquido inflamable cuyos vapores pueden generar mezclas explosivas e inflamables con el aire a temperatura ambiente.

PROPIEDADES QUÍMICAS:

Se ha informado de reacciones vigorosas de este producto con una gran variedad de reactivos como: difluoruro de disulfurilo, nitrato de plata, pentafluoruro de bromo, perclorato de potasio, perclorato de nitrosilo, cloruro de cromilo, percloruro de clorilo, perclorato de uranilo, trióxido de cromo, nitrato de flúor, difluoruro de di oxígeno, hexafluoruro de uranio, heptafluoruro de yodo, tetraclorosilano, ácido permangánico, ácido nítrico, peróxido de hidrógeno, ácido peroxodisulfúrico, dióxido de potasio, peróxido de sodio, permanganato de potasio, óxido de rutenio (VIII), platino, t-butóxido de potasio, óxido de plata y sodio.

En general es incompatible con ácidos, cloruros de ácido, agentes oxidantes y reductores y metales alcalinos.

NIVELES DE TOXICIDAD:

LD₅₀ (oral en ratas): 13 ml/Kg

México:

CPT: 1900 mg/m³ (1000 ppm)

Estados Unidos:

TLV (TWA): 1900 mg/m³ (1000 ppm)

Reino Unido:

VLE: 9500 mg/m³ (5000 ppm)





Francia:

VME: 1900 mg/m^3 (1000ppm)

Alemania:

MAK: 1900 mg/m^3 (1000 ppm)

Periodos largos: 1900 mg/m^3 (1000 ppm)

Suecia:

Periodos largos: 1900 mg/m^3 (1000 ppm)

Alcohol desnaturalizado:

LDLo (oral en humanos): 1400 mg/Kg.

LD₅₀ (oral en ratas): 7060 mg/Kg.

LC₅₀ (inhulado en ratas): 20000 ppm/10h

Niveles de irritación a piel de conejos: 500 mg/24h, severa.

Niveles de irritación a ojos de conejos: 79 mg, 100 mg/24h, moderada.

MANEJO:

-Equipo de protección personal:

Para manejar este producto es necesario utilizar bata y lentes de seguridad, en un área bien ventilada. Cuando el uso es constante, es conveniente utilizar guantes. No utilizar lentes de contacto al trabajar con este producto.

Al trasvasar pequeñas cantidades con pipeta, utilizar propipetas, NUNCA ASPIRAR CON LA BOCA:

RIESGOS:

-Riesgos de fuego y explosión:





Por ser un producto inflamable, los vapores pueden llegar a un punto de ignición, prenderse y transportar el fuego hacia el material que los originó. Los vapores pueden explotar si se prenden en un área cerrada y pueden generar mezclas explosivas e inflamables con el aire a temperatura ambiente.

Los productos de descomposición son monóxido y dióxido de carbono.

-Riesgos a la salud:

El etanol es oxidado rápidamente en el cuerpo a acetaldehído, después a acetato y finalmente a dióxido de carbono y agua, el que no se oxida se excreta por la orina y sudor.

Inhalación: Los efectos no son serios siempre que se usen de manera razonable. Una inhalación prolongada de concentraciones altas (mayores de 5000 ppm) produce irritación de ojos y tracto respiratorio superior, náuseas, dolor de cabeza, excitación o depresión, adormecimiento y otros efectos narcóticos, coma o incluso, la muerte.

Un resumen de los efectos de este compuesto en humanos se da a continuación:

Mg/l en el aire Efecto en humanos

10-20 Tos y lagrimeo que desaparecen después de 5 o 10 minutos.

30 Lagrimeo y tos constantes, puede ser tolerado, pero molesto.

40 Tolerable solo en periodos cortos.

Mayor de 40 Intolerable y sofocante aún en periodos cortos.

Contacto con ojos: Se presenta irritación solo en concentraciones mayores a 5000 a 10000 ppm.





Contacto con la piel: El líquido puede afectar la piel, produciendo dermatitis caracterizada por resequedad y agrietamiento.

Ingestión: dosis grandes provocan envenenamiento alcohólico, mientras que su ingestión constante, alcoholismo. También se sospecha que la ingestión de etanol aumenta la toxicidad de otros productos químicos presentes en las industrias y laboratorios, por inhalación de su excreción o de su metabolismo, por ejemplo: 1, 1,1-tricloroetano, xileno, tricloroetileno, dimetilformamida, benceno y plomo.

La ingestión de alcohol desnaturalizado aumenta los efectos tóxicos, debido a la presencia de metanol, piridinas y benceno, utilizados como agentes desnaturalizantes, produciendo ceguera o, incluso, la muerte a corto plazo.

Carcinogenicidad: No hay evidencia de que el etanol tenga este efecto por el mismo, sin embargo, algunos estudios han mostrado una gran incidencia de cáncer en la laringe después de exposiciones a alcohol sintético, con sulfato de dietilo como agente responsable.

Mutagenicidad: No se ha encontrado este efecto en estudios con *Salmonella*, pero se han encontrado algunos cambios mutagénicos transitorios en ratas macho tratados con grandes dosis de este producto.

Riesgos reproductivos: Existen evidencias de toxicidad al efecto teratogenicidad en experimentos con animales de laboratorio tratados con dosis grandes durante la gestación. El etanol induce el aborto.





ACCIONES DE EMERGENCIA:

-Primeros auxilios:

Inhalación: Traslade a la víctima a un lugar ventilado. Aplicar respiración artificial si ésta es dificultosa, irregular o no hay. Proporcionar oxígeno.

Ojos: Lavar inmediatamente con agua o disolución salina de manera abundante.

Piel: Eliminar la ropa contaminada y lavar piel con agua y jabón.

Ingestión: No inducir el vómito.

EN TODOS LOS CASOS DE EXPOSICIÓN, EL PACIENTE DEBE RECIBIR AYUDA MÉDICA TAN PRONTO COMO SEA POSIBLE.

-Control de fuego:

Utilizar equipo de seguridad necesario, dependiendo de la magnitud del incendio.

Utilizar agua en forma de neblina lo más lejos posible del incendio, los chorros pueden resultar inefectivos. Enfriar los contenedores de se vean afectados con agua. En el caso de fuegos pequeños, pueden utilizarse extinguidores de espuma, polvo químico seco o dióxido de carbono.

-Fugas y derrames:

Evitar respirar los vapores y permanecer en contra del viento. Usar guantes, bata, lentes de seguridad, botas y cualquier otro equipo de seguridad necesario, dependiendo de la magnitud del siniestro.

Mantener alejadas de área, flamas o cualquier otra fuente de ignición. Evitar que el derrame llegue a fuentes de agua o drenajes. Por lo cual, deben construirse diques para contenerlo, si es necesario. Absorber el líquido con arena o vermiculita y trasladar a una





zona segura para su incineración posterior. Usar rocío de agua para dispersar el vapor y almacenar esta agua contaminada en recipientes adecuados, para ser tratada de manera adecuada, posterior mente.

En el caso de derrames pequeños, el etanol puede absorberse con papel, trasladarlo a un lugar seguro y dejarlo evaporar o quemarlo. Lavar el área contaminada con agua.

-Desechos:

La mejor manera de desecharse es por incineración, aunque para pequeñas cantidades puede recurrirse a la evaporación en un lugar seguro.

-Almacenamiento:

Cantidades grandes de este producto deben ser almacenadas en tanques metálicos especiales para líquidos inflamables y conectados a tierra. En pequeñas cantidades pueden ser almacenados en recipientes de vidrio. En el lugar de almacenamiento debe haber buena ventilación para evitar la acumulación de concentraciones tóxicas de vapores de este producto y los recipientes deben estar protegidos de la luz directa del sol y alejados de fuentes de ignición.

REQUISITOS DE TRANSPORTE Y EMPAQUE:

Transporte terrestre:

Marcaje: 1170. Líquido inflamable.

HAZCHEM: 2 SE.

Transportación marítima:

Código IMDG: 3074

Clase: 3.2





Marcaje: líquido inflamable.

Transportación aérea:

Código ICAO/IATA: 1170

Clase: 3

Cantidad máx. En vuelo comercial: 5l.

Cantidad máx. En vuelo de carga: 60 l. [3] (UNAM, s.f.).





Anexo 2 Tipos de Clima en México.

