



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS  
OBTENIDOS DEL PROCESO HIDROTÉRMICO SOLAR CON BAGAZO  
DE AGAVE *ANGUSTIFOLIA*

# TESIS

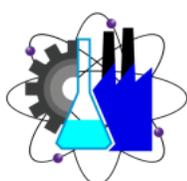
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA QUÍMICA

**PRESENTA:**  
MARTHA IVETT REYES PACHECO

**DIRECTORA DE TESIS:**  
DRA. HEIDI ISABEL VILLAFÁN VIDALES  
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES, UNAM

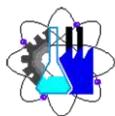
**CUERNAVACA, MORELOS**

**ENERO, 2022**





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería



## FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT  
SGC Certificada en la norma ISO 9001:2015

FORMA T4  
NOMBRAMIENTO COMITÉ REVISOR

Cuernavaca, Mor., a 20 de enero de 2022

**MTRA. MARÍA DEL CARMÉN PÉREZ REDONDO**  
**DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ**  
**DRA. HEIDI ISABEL VILLAFÁN VIDALES**  
**DRA. CARMEN HENEFF GARCIA ESCOBAR**  
**DR. FABIÁN JESÚS RENDÓN HERNÁNDEZ**  
**P R E S E N T E**

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de: **TESIS**

Titulado:

**“Principales características de los productos obtenidos del proceso hidrotérmico solar con bagazo de agave *Angustifolia*”**

Que presenta (el) o (la) **C. MARTHA IVETT REYES PACHECO**. Del programa educativo de: **INGENIERÍA QUÍMICA**

**A T E N T A M E N T E**  
*Por una humanidad culta*

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**DIRECTORA**

**Se anexa firma electrónica**

**D I C T A M E N**

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**DIRECTORA DE LA FCQeI**  
**P R E S E N T E**

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBRE	FIRMA
	<b>MTRA. MARÍA DEL CARMÉN PÉREZ REDONDO</b>	
	<b>DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ</b>	
	<b>DRA. HEIDI ISABEL VILLAFÁN VIDALES</b>	
	<b>DRA. CARMEN HENEFF GARCIA ESCOBAR</b>	
	<b>DR. FABIÁN JESÚS RENDÓN HERNÁNDEZ</b>	

**El voto del comité es aprobatorio, se anexan firmas electrónicas**

VALH/fmg

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209  
Tel. (777) 329 70,00, Ext. 7039/ fcqei@uaem.mx



Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ** | Fecha:2022-01-20 13:19:14 | Firmante

CDKfEaJPSk/0DfdEL6irIjLHbtctSs62IikX7/yCuadLd1F2JL+fv3WCyGX+ALAZE3Zr4BKXjMOcJhOfbfJhytjLvmYlgJ3t0EwuyYKPhCsvowdFYSG4dm6ja72/2iQ89RHF/LYkvMfC  
CzrCVuLdjAyHX8BK3BI8J4fp4UnPg+1iWxOL7q3rWTBkVVdXteJYgSHMvT5beaJzeW4dOD4Eei5wPnLsoJqmalzUnj9l+gPzL69t+x+rzX9vDIZQDSQNCrLY+dlkme8fSDoKEb49  
CHenhOrGz353nv6mGSc+33diL+47oNmulgboxz/bVmvbMh+gy55J8K6D1twYQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[YOJekdMjA](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/zTurowMmPzuQ8C14ZHDdf8QsPN7wHnKe>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ROBERTO FLORES VELAZQUEZ | Fecha:2022-03-15 18:54:42 | Firmante

xt5pNEw4tu/mydJDuvDUVaKQY1Afs69fMn4zCZrD5+xLgdMVQBLQljbvVQ3Jhar1Hwlp8utFQRNVx0cb7m57K05VWVOT68IHom+LV/5AiKkmqYQAPy4ei+qICfaErAm6cnAfwD0 OhgRm7sIMAKPwzFy16MS6V0n4KFmhoR4pO4thrJponjn34Ij+mMktCgVhykhNT7jdG71isFFiknvkKeRb0IcvNT3tYr6bh2DKUzEsPRhn0ccrHhjArpsd4NgcL9V30nwtR8BDfPEsai0 xUSla2wMoJunfhi/iPeflkS4wIBXtZruV9NUUkb4p+WllfmwYMAxnLRi4hvH+2u4qg==

HEIDI ISABEL VILLAFAN VIDALES | Fecha:2022-03-16 11:10:40 | Firmante

nKf9PNYcoAGPfv+iatOLNDG9kdPy/IDes+nK3yHpnsa91SICZ8m2bjMqXwa5TGgRf7zDIXQijcQaSCZMQH3P/dpqz7/nfn25z+irPNLxWQASNGSPHau+NF8jVAXW312p8rtOsfm1/ mwA7nJGLLwnWxD3q8LhscIQMkt4PYGTFRNYhuzpZNCQsKn07eNCUHXD0HMavi6j6E0R7ngvqcmM8hx4TDoYUqbOqeUIYCXm3rf3YS2vh4KWYqWVWSPS8YqchPxUCoGneV Gavg6lJfRl/JGCMIBRUGwsuLzNdPcqCsNO3eMdqYnGI7Ue6UAJdtFz9S1KCY5Dh0KpQUUp2pYJlJA==

FABIAN JESUS RENDON HERNANDEZ | Fecha:2022-03-16 14:15:17 | Firmante

AEZEnvslmYQg9exsckzRBnkBIMfYNYXg1tQ9GthhR1qc58VCK1YNmlApzqRcBYPT5htjnxfdZ1kPKdRWvBMfsLOI90+OMc6w4Cw+UPeDaNv1nTBq0nx0AAqQLv+8tZ/tXzQpXd nq7G6wtoipD9kgxh2TB9jQvRMhK6JgbrmNQvwy2C7QHZZqMjvbvOZ+O8c9J4yBIW1lqC/eYQKhRyy9qPSfUSxdGYoy/bgliK53tNpJ79z8hF2NvX3WVXU2Eg5K5zJD3i2lxvKllrhvBz aJ/jV74Z9ny8ix6rhNdOI5Z40IE517t/ixXSX9ugUiqMsgdNqEzH4JOKDifLhfjyKlqFw==

MARIA DEL CARMEN PEREZ REDONDO | Fecha:2022-03-16 15:09:52 | Firmante

RDZl3xpMP2eWbb5oAf+g+b+4CGorKOHWQlihtAcgAEqB8zF1SFTabKb5/7RffpgeWwFRjAvpnyXP1APa+frGc58u7glBorrS1EFv/p1vFGkOsl4uQ03D0Yv18ZuyNTFIRAI0qwuaOQ KLktcBRisJ5Y5WgcEp5nelTORdusLay+DuEMxsazlZ0CmeXRT/4vxmllmD5ebZ3vrfnsGSSbdte1T0AvUL8zShM7vkrFXosibNQs30EVGbzZcJDZMj9QgHyAxPIWdg/sBqVvmh 19TYiq/dgikDGLualuoMT1hD3l/eVgDnv6k7wkQKckmu24hTGB+lpwID6f5VhXPpzzw==

CARMEN HENEFF GARCIA ESCOBAR | Fecha:2022-03-17 09:19:13 | Firmante

fAADfJrxTXkICIZN2XsfPKK/KEPyQKU24owcFjcr5o91eh96HwpzL4yHj+2/8hVpvogA2XAPwIEcn7f02HHdUPSN/nc/qDJEWB2U4LIOM3bLsDXSRZ1yQ/RjllRzxeulwDEGq9Hb7XQ JqhOrJW/iQnvJBTM7OQDqj++0cl/KRn/i9uS09Y4rfdSDqVUuMbNspj0mrzjL9tSyppgSrW275U4LStg6pU5tadg6NR+e1m12lq4aTh3i3ZV/ionrbwJsevgzgpZOlc9ypRhuT1WW5irV1 eR0qjHXpO5AYhTxHDkplxxDNKlaK00VfLhC7MwFQo2CX+b6c3CinOlglFn2Q==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



29eIVjA7S

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/kiqrDUCqMi5eXNYOWMHZD6GbszlzDMxK



# Agradecimientos

---

A mi tutora la Dra. Heidi Isabel Villafán Vidales quien con sus conocimientos, apoyo y comprensión me guio a través de cada una de las etapas de este proyecto. Gracias por ser una gran persona, mentora y un ejemplo a seguir.

A la Dra. Adriana Longoria, Dulce Ruiz y Alejandro Ayala por su apoyo en la parte experimental.

Al Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes por su apoyo, durante la parte administrativa.

A mis padres ya que con todo su amor se esfuerzan por darme lo mejor.

A mis compañeros y amigos de la universidad, tantas risas y bellos momentos que llevare a lo largo de mi vida.

Al comité asesor por su correcciones y sugerencias las cuales ayudaron a pulir este trabajo.

Agradezco al proyecto DGAPA-PAPIIT-UNAM IN110118 "Producción de bioaceites a través del uso de microalgas y energía solar concentrada" por la beca otorgada para la realización de esta tesis.

Este trabajo de tesis recibió apoyo del Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética a través del Proyecto 207450, "Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol)" y particularmente dentro del Proyecto Estratégico No. 120 " Tecnología solar para obtención de productos con valor agregado mediante procesamiento hidrotermal".

# Dedicatoria

---

*A Dios y mis padres Omar y Claudia, por su amor y apoyo incondicional, porque a pesar de los obstáculos me han ayudado a convertirme en la persona que soy ahora. Este trabajo y muchos de mis logros son para ustedes. Estaré eternamente agradecida por todo lo que hacen por mí, los amo.*

*A mis hermanos Jesus y Zusette por hacer mi vida más divertida, brindarme su confianza y verme como un buen ejemplo, pero sobre todo por su amor.*

*A mi abuela Martha y familia en general. Por todo su cariño y ánimos para continuar con mis sueños.*

*Gracias por todo a cada una de las personas que han estado a mí lado en cada una de las etapas de mí vida. Sin su ayuda no podría haber concluido este gran proyecto.*

# Contenido

---

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	V
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	VII
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	3
<b>HIPOTESIS</b> .....	4
<b>OBJETIVOS</b> .....	4
<b>Objetivo general</b> .....	4
<b>Objetivos particulares</b> .....	4
<b>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES</b> .....	5
<b>1.1. Energía solar y tecnologías para su aprovechamiento</b> .....	5
1.1.2. Energía solar térmica .....	6
1.1.3. Energía solar térmica de concentración .....	7
1.1.4. Concentrador de foco puntual: Horno solar .....	9
1.1.5. Horno Solar del IER-UNAM .....	10
<b>1.2. Biomasa</b> .....	14
1.2.1. Tipos de biomasa .....	14
1.2.2. Composición de la biomasa vegetal .....	15
<b>1.3. Biocombustibles</b> .....	18
1.3.1. Clases de biocombustibles .....	18
<b>1.4. Tecnologías de conversión de la biomasa</b> .....	20
1.4.1. Procesos Termoquímicos .....	22
<b>1.5. Procesamiento hidrotermal</b> .....	24
1.5.1. Clasificación del procesamiento hidrotermal .....	24
1.5.2. Características de los productos del procesamiento hidrotermal .....	27
1.5.2.1. Separación de los productos del procesamiento hidrotermal .....	29
1.5.3. Parámetros operacionales del procesamiento hidrotermal .....	32
1.5.3.1. Efecto de la biomasa y el disolvente .....	32
1.5.3.2. Agua como solvente .....	34
1.5.3.3. Efecto del tiempo de residencia .....	35

1.5.3.4. Efecto de la temperatura de reacción.....	36
1.5.3.5. Efecto de la presión.....	36
<b>1.6. Características generales del Agave y su uso como biomasa .....</b>	<b>37</b>
1.6.1. <i>Agave Angustifolia</i> .....	38
<b>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>40</b>
<b>2.1. Técnicas de caracterización .....</b>	<b>40</b>
2.1.1. Análisis elemental .....	41
2.1.2. Microscopia electrónica de barrido (SEM) .....	41
2.1.3. Caracterización térmica mediante TGA de bagazo de Agave.....	42
2.1.4. Cuantificación del poder calorífico.....	42
<b>2.2. Descripción de reactor solar para procesamiento hidrotérmico.....</b>	<b>44</b>
<b>2.3. Recolección y separación de los productos.....</b>	<b>46</b>
2.3.1. Extracción.....	47
2.3.2. Peso constante del bioaceite.....	48
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1. Caracterización del Agave <i>Angustifolia</i>.....</b>	<b>50</b>
3.1.1. Microscopia electrónica de barrido (SEM) de la biomasa .....	52
3.1.2. Caracterización térmica mediante TGA de bagazo de Agave.....	54
<b>3.2. Caracterización del carbón y bioaceite .....</b>	<b>55</b>
3.2.1. Diseño experimental .....	55
3.2.2. Análisis elemental .....	57
3.2.3. Diagrama de Van Krevelen.....	60
3.2.4. Microscopia electrónica de barrido del carbón (SEM).....	64
3.2.5. Poder calorífico.....	65
<b>CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>69</b>
<b>REFERENCIAS EN INTERNET .....</b>	<b>73</b>
<b>TABLAS Y ANEXOS .....</b>	<b>75</b>

# Lista de figuras

<b>Figura 1.1.</b> Clasificación de los captadores energía solar térmica con y sin concentración solar. Tomada y modificada de Camarillo & Rábago (2018).....	7
<b>Figura 1.2.</b> Esquema de los sistemas de concentración solar. Tomada de Tecnologías Solares Termoeléctricas (s.f.) .....	8
<b>Figura 1.3.</b> Esquema del funcionamiento de un horno solar.....	10
<b>Figura 1.4.</b> Horno Solar de Alto Flujo Radiactivo, en el IER-UNAM, Temixco Morelos. Tomada de Licurgo-Pedraza (2012).....	11
<b>Figura 1.5.</b> Distribución de facetas del concentrador en grupos de la misma distancia focal. Tomada de Riveros-Rosas et al. (2010).....	12
<b>Figura 1.6.</b> Clasificación de los tipos de biomasa.....	14
<b>Figura 1.7.</b> Composición del material vegetal.....	15
<b>Figura 1.8.</b> Estructura molecular de la cadena de celulosa. Tomada y modificada de Alonso, Wettstein & Dumesic (2012).....	16
<b>Figura 1.9.</b> Estructura molecular de la cadena de Hemicelulosa. Tomada y modificada de Alonso, Wettstein & Dumesic (2012).....	17
<b>Figura 1.10.</b> Estructura molecular de la cadena de Lignina Tomada y modificada de Alonso, Wettstein & Dumesic (2012).....	17
<b>Figura 1.11.</b> Clasificación de los procesos de conversión de biomasa. Tomada de Klug (2012).....	21
<b>Figura 1.12.</b> Procesos de conversión termoquímica para diferentes productos finales. Tomada y modificada de O. Ellabban et al. (2014).....	22
<b>Figura 1.13.</b> Clasificación del procesamiento hidrotérmico de biomasa con referencia al diagrama de fase presión-temperatura del agua. Kambo & Dutta (2015).....	25
<b>Figura 1.14.</b> Productos obtenidos de la conversión hidrotermal de biomasa. Tomada de Tekin et al. (2014) .....	29
<b>Figura 1.15.</b> Procedimiento de recolección y separación de productos. Tomada y modificada de García-Alba (2012).....	31
<b>Figura 2.1.</b> Bagazo de agave de la especie <i>Angustifolia</i> .....	40
<b>Figura 2.2.</b> Calorímetro <i>Parr</i> .....	43
<b>Figura 2.3.</b> Instrumentación y foto del reactor. ....	44
<b>Figura 2.4.</b> Diagrama del posicionamiento de los termopares.....	46
<b>Figura 2.5.</b> Equipo Soxhlet para la extracción del bioaceite. ....	47
<b>Figura 2.6.</b> Bioaceite llevado a peso constante. ....	48

<b>Figura 2.7.</b> Diagrama de flujo de la síntesis y análisis de los productos obtenidos mediante licuefacción hidrotermal. ....	49
<b>Figura 3.1.</b> Micrografías de las fibras de bagazo de Agave a diferentes escalas (a) 200 micrómetros, b) 100 micrómetros y c) 50 micrómetros antes del proceso hidrotermal obtenidas con el microscopio electrónico de barrido MEB. ....	52
<b>Figura 3.2.</b> Grafica de difracción de rayos X del bagazo de agave. ....	53
<b>Figura 3.3.</b> Termograma del bagazo de agave con una rampa de calentamiento de 10 °C/min. ....	54
<b>Figura 3.4.</b> Diagrama del diseño experimental del proceso hidrotermal para diferentes temperaturas. ....	55
<b>Figura 3.5.</b> Diagrama del diseño experimental del proceso hidrotermal para diferentes concentraciones.....	55
<b>Figura 3.6.</b> Diagrama del diseño experimental del proceso hidrotermal para diferentes tiempos de residencia.....	56
<b>Figura 3.7.</b> Diagrama del diseño experimental del proceso hidrotermal para diferentes presiones.....	56
<b>Figura 3.8.</b> Diferentes condiciones de temperatura vs % de carbono y oxígeno..	58
<b>Figura 3.9.</b> Diferentes condiciones de concentración vs % de carbono y oxígeno .....	58
<b>Figura 3.10.</b> Diferentes condiciones de tiempo de residencia vs % de carbono y oxígeno .....	59
<b>Figura 3.11.</b> Diferentes condiciones de presión vs % de carbono y oxígeno.. .....	60
<b>Figura 3.12.</b> Diagrama de Van Krevelen para bagazo de agave, bioaceite y carbón. ....	63
<b>Figura 3.13.</b> Micrografías de carbón a diferentes condiciones de operación: a) (300°C, 50bar, 10%w, 0min), b) (250°C, 50bar, 10%w, 0min), c) (200°C, 50bar, 10%w, 0min), d) (250°C, 50bar, 5%w, 60min) obtenidas con el microscopio electrónico de barrido MEB. ....	64

# Lista de tablas

---

<b>Tabla 1.1.</b> Tipos de biocombustibles. Salinas Callejas & Gasca Quezada (2009).....	19
<b>Tabla 1.2.</b> Propiedades de los disolventes de licuefacción comunes. Huang & Yuan (2015).....	33
<b>Tabla 1.3.</b> Propiedades fisicoquímicas del agua en función de la temperatura y la presión. Tomada y modifica de Tekin et al. (2014).....	35
<b>Tabla 2.1.</b> Componentes para la instrumentación del reactor. Tomada de Ayala-Cortes (2019). .....	45
<b>Tabla 3.1.</b> Análisis químico del bagazo de agave Angustifolia.....	50
<b>Tabla 3.2.</b> Análisis elemental de los carbones por OEA de las muestras. ....	57
<b>Tabla 3.3.</b> Análisis elemental del bioaceite por OEA de las muestras. ....	57
<b>Tabla 3.4.</b> Relaciones H/C y O/C del bioaceite para el diagrama de Van Krevelen. ....	61
<b>Tabla 3.5.</b> Relaciones H/C y O/C del carbón para el diagrama de Van Krevelen .	62
<b>Tabla 3.6.</b> Relaciones H/C y O/C de la biomasa y carbones comerciales. ....	62
<b>Tabla 3.7.</b> Poder calorífico de los bioaceites obtenidos a diferentes condiciones operacionales.....	65
<b>Tabla 3.8.</b> Poder calorífico de los carbones obtenidos a diferentes condiciones operacionales.....	65

## INTRODUCCIÓN

La energía se puede entender como la capacidad que tiene un sistema para poder realizar un trabajo. Se encuentra presente en la vida cotidiana y se manifiesta de distintas maneras; desde ser necesaria para que todo ser vivo pueda realizar sus funciones vitales, hasta su aplicación en procesos industriales. En este último punto es donde la energía se utiliza de manera extensiva. Actualmente la mayoría de la energía se obtiene por medio de diferentes procesos en donde se utilizan materiales con alta densidad energética como los combustibles fósiles. Hoy en día, el abuso y explotación de estos recursos nos acerca cada vez más a su futuro agotamiento y una contaminación ambiental sin precedentes como consecuencia de su uso indiscriminado. Estos dos puntos nos han llevado a la búsqueda de posibles soluciones; es ahí en donde se encuentran como una opción alentadora las energías renovables.

Las energías renovables se definen como aquellas que se renuevan a una tasa mayor que la que se consumen. Entre estas energías se encuentran la hidráulica, los sistemas eólicos, solares fotovoltaicos, geotérmicas, mareomotrices, de biomasa y la termo-solar o solar térmica. En particular esta última es un tipo de energía muy atractiva y con varias aplicaciones. Tal como su nombre lo indica, este tipo de energía utiliza la radiación solar como fuente de alimentación para producir calor, el cual se utiliza para calentar un fluido que, por lo general, suele ser agua o aire. Otro de los mayores métodos utilizados es la conversión de biomasa, el cual presenta una variedad de procesos para su transformación a diferentes productos, los cuales se obtienen a partir de cultivos alimenticios, material de desecho y microorganismos como las microalgas. La principal fuente de biomasa utilizada es la lignocelulosa, ya que es el material más abundante en nuestro planeta. Se compone de celulosa, hemicelulosa y lignina. Cada uno de estos componentes posee propiedades físicas y químicas que los convierten en materiales interesantes que pueden ser utilizados en procesos biotecnológicos, a causa de su bajo costo y amplia disponibilidad (González et al., 2005).

En relación con eso, en México una de las mayores industrias agrícolas es la que involucra el uso del agave. El bagazo de agave es un residuo de origen vegetal derivado del proceso para la producción del tequila y el mezcal. Este residuo generalmente se desecha en zonas no adecuadas, lo que conlleva a diferentes tipos de contaminación; sin embargo, al ser un residuo lignocelulósico abundante, ha demostrado ser factible en convertirse en diferentes productos tales como alcoholes, ácidos orgánicos, compostas, papel y biocombustibles (González et al., 2005; Gurrola, 2006).

Con el propósito de obtener una mayor eficiencia y aprovechamiento de estas energías se busca combinar ambos procesos, evaluando el uso del bagazo de agave *Angustifolia* como una opción para la producción de biocarbón, bioaceite y otros productos de valor agregado al mismo tiempo que se disminuye el impacto generado en el medioambiente.

## JUSTIFICACIÓN

El agave tiene una gran importancia económica y cultural para el pueblo mexicano, ya que proporciona recursos para el ecosistema y constituye una parte integral de la identidad del país, así mismo satisface diversas necesidades que van desde alimentos, medicinas, fertilizantes y la más conocida que es la producción del tequila o mezcal.

Se reporta que en Guerrero cada año se producen aproximadamente 1.7 millones de litros de mezcal, lo cual representa una importante fuente de ingresos para las familias de este estado (Barrientos et al., 2019). Es decir, la extracción del agave genera grandes beneficios; sin embargo, también produce una gran cantidad de residuos lignocelulósicos. En México no se cuenta con una norma que establezca su uso y disposición, dando como resultado que no se realice un manejo adecuado de los mismos. De acuerdo con Gurrola (2016) en el año 2012 se registró que la industria del mezcal en México produjo aproximadamente 29 375 toneladas de residuo de agave; solo en el estado de Durango se alcanzaron 300 toneladas. Generalmente, estos desechos son quemados o vertidos en ríos y pastizales, ya que su transporte o tratamiento son difíciles de realizar. Pero a pesar de ser un residuo de origen orgánico su descomposición puede tardar alrededor de un año, lo que genera problemas de contaminación produciendo lixiviados que contaminan el agua y el suelo, además de malos olores que afectan la calidad del aire debido a la proliferación de hongos y levaduras, por estas razones es necesario encontrar formas de reducir su acumulación. Una forma de aprovechar este residuo es que, debido a su alto contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, puede ser utilizado como materia prima en diferentes métodos de energías renovables.

Con base en lo anterior, el eje central del presente trabajo es utilizar el proceso hidrotermal de biomasa combinado con la energía solar concentrada para transformar el bagazo de agave *Angustifolia*.

## HIPOTESIS

El bagazo de agave *Angustifolia* se puede utilizar como fuente de biomasa para la producción de aceite y carbón, así como de productos derivados de alto valor agregado mediante el proceso hidrotermal de biomasa con concentración solar. El rendimiento de los bioproductos obtenidos puede compararse con los informes reportados de otros procesos hidrotermales de diferentes materiales.

## OBJETIVOS

### Objetivo general

- Realizar el análisis de los productos obtenidos por medio del proceso hidrotérmico solar de biomasa con residuos de agave de la especie *Angustifolia* con el propósito de evaluar el impacto que tienen las diferentes condiciones de operación en las características físicas y químicas de estos.

### Objetivos particulares

- Producir bioproductos provenientes de residuos de *agave Angustifolia* mediante el proceso hidrotermal.
- Separar los productos del proceso hidrotermal solar de biomasa como: aceite, carbón y fase acuosa.
- Analizar las características generales de los productos obtenidos, por medio de técnicas como: análisis elemental, microscopia electrónica de barrido, análisis termogravimétrico y cuantificación del poder calorífico.

## **CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES**

### **1.1. Energía solar y tecnologías para su aprovechamiento**

La radiación solar es la energía más abundante en el planeta Tierra y es emitida por la estrella central de nuestro sistema planetario, conocida como el Sol. El Sol se encuentra conformado por diversos elementos en estado gaseoso, entre ellos y en mayor proporción el hidrógeno. En su interior se presentan elevadas presiones y temperaturas de varios millones de grados lo que genera de manera espontánea un proceso denominado fusión nuclear, lo cual da origen a la energía solar. La energía solar proporciona innumerables beneficios y ha sido utilizada por el hombre desde la antigüedad, lo que la convierte en una de las fuentes de energía renovable inagotables, no contamina y contribuye al desarrollo sostenible. El Sol emite continuamente una potencia de 62.600 kilovatios por cada metro cuadrado de su superficie. En un período de solo dos días, el planeta recibe una cantidad de energía equivalente a todas las reservas de combustibles fósiles; esto equivale a unas 60 veces el consumo anual en el mundo lo cual nos da una idea del enorme potencial que tiene este recurso. Ahora bien, no toda la energía del Sol llega a la Tierra, pero a pesar de ello, ésta puede ser captada por medio de diferentes sistemas para su aprovechamiento (Sedigas, 2013; Camarillo & Rábago, 2018; Arancibia & Best y Brown, 2010).

Las tecnologías para el uso de la energía solar se pueden dividir en 3 grandes grupos: solar fotovoltaica, fotoquímica y fototérmica. La primera convierte la energía solar en energía eléctrica a través de dispositivos semiconductores llamados celdas o paneles solares por medio del llamado efecto fotovoltaico, el cual ocurre cuando la luz absorbida ilumina ciertos materiales generando electricidad. Hoy en día, los paneles fotovoltaicos tienen muchos usos tanto a nivel doméstico, como comercial y los podemos encontrar desde dispositivos pequeños como calculadoras hasta señalización autónoma en carreteras.

La fotoquímica emplea la absorción de la luz en las reacciones químicas, es decir, la energía absorbida produce un estado de excitación o activación en las moléculas, lo cual las hace más reactivas que en su estado fundamental. Existen diversas

aplicaciones para esta tecnología como obtener combustibles como el hidrógeno, o purificar sustancias degradando compuestos tóxicos.

### **1.1.2. Energía solar térmica**

Por otra parte, la energía solar térmica utiliza la energía radiante del Sol para incrementar la temperatura de algún sistema, cuerpo o fluido mediante el uso de diferentes equipos como concentradores, receptores y sistemas de monitoreo. Esta energía puede usarse para generar potencia mecánica o eléctrica, como calor de proceso para la industria, o bien aplicaciones a más altas temperaturas como la producción de hidrógeno o productos de interés para la industria química (Camarillo & Rábago, 2018; Licurgo-Pedraza, 2012; Arancibia & Best y Brown, 2010; Energías renovables, s.f.).

Podemos definir a la energía solar térmica como la energía que resulta de la conversión de la radiación solar en calor. Entre las aplicaciones de la energía solar térmica existe la posibilidad de generar energía eléctrica, vapor, calentamiento de agua o algún fluido, o bien proveer la energía necesaria para llevar a cabo reacciones químicas que nos permiten obtener diversos productos. El procedimiento para obtener esta energía se lleva a cabo por medio de colectores o captadores. Los colectores solares son un tipo especial de intercambiador de calor que consiste en una superficie que se opone a los rayos solares y absorbe la radiación para transformarla en calor; este calor es transferido a un fluido denominado fluido térmico o de trabajo. Los colectores solares se dividen en dos categorías: no concentradores y concentradores. Los no concentradores o también llamados estacionarios tienen la misma área de recepción y absorción de radiación solar, mientras que los concentradores presentan una superficie absorbente más pequeña que la superficie receptora, lo que aumenta el flujo de radiación solar. Su característica principal es que solo utilizan radiación solar directa, por lo que se requiere un sistema de seguimiento solar. Los captadores o colectores se clasifican como colectores de baja, media y alta temperatura. Es importante mencionar que cada rango de temperatura implica un tipo diferente de sistema de captación. A continuación, en la figura 1.1 se mencionan los principales tipos de captadores (Camarillo & Rábago, 2018; Zambada, 2015).

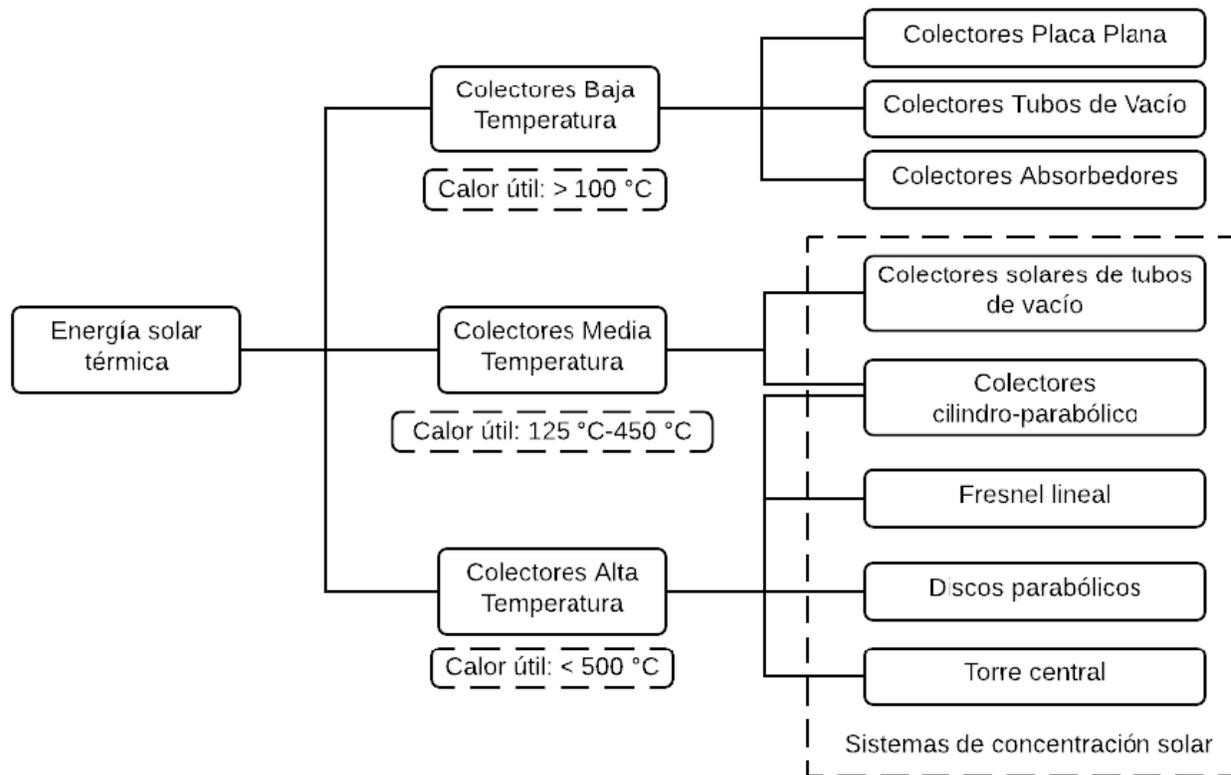


Figura 1.1: Clasificación de los captadores energía solar térmica con y sin concentración solar. Tomada y modificada de Camarillo & Rábago (2018).

### 1.1.3. Energía solar térmica de concentración

La energía solar térmica, utiliza radiación solar directa (DNI, por sus siglas en ingles), que se considera una fuente de rayos paralelos a la superficie de la Tierra. Arancibia (2014) resalta que concentrar la radiación significa capturar la energía solar en un área determinada y dirigirla a un área más pequeña, es decir, el propósito de los sistemas de concentración solar es aumentar el flujo de radiación solar en el receptor diseñado para absorberlo. Los sistemas de concentración generan calor o electricidad mediante el uso de cientos de espejos que concentran los rayos del sol en un rango de temperatura de 400 a 1000 °C. Hay varias formas de espejos, métodos de seguimiento solar y generación de energía útil para convertirla en calor de media y alta temperatura. Todos ellos se basan en el principio óptico de la Ley de Snell para la reflexión. Los sistemas más utilizados son los denominados sistemas de foco puntual y foco lineal (Figura 1.2). En la categoría de foco lineal que concentran la radiación solar en tubos colocados a lo largo de la línea focal, se encuentran el concentrador lineal tipo Fresnel,

canal cilíndrico y canal parabólico. Generalmente, estos concentradores son usados para cocción de alimentos o calor para procesos industriales. Con este tipo de sistemas es posible alcanzar temperaturas entre los 100 y 450 °C. Por otro lado, que los colectores de foco puntual que utilizan platos o discos y los de tipo torre central comúnmente son empleados para la generación de energía eléctrica, ya que trabajan a temperaturas superiores a los 500 °C. Con estos niveles de temperatura se pueden realizar procesos termoquímicos para el almacenamiento de la energía o producción de combustibles solares como gas de síntesis o hidrógeno. Dentro de estos sistemas tenemos a los hornos solares, sistemas de torre central y los discos parabólicos (Camarillo & Rábago, 2018; Arancibia, 2014).

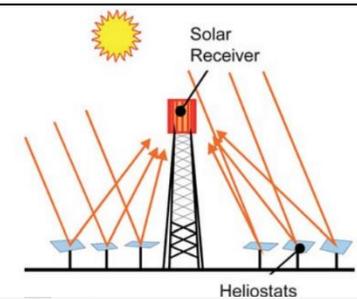
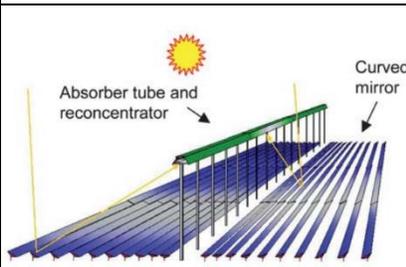
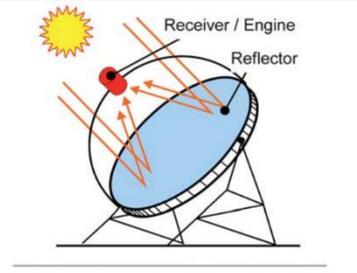
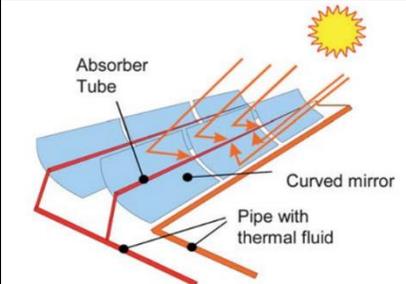
Concentrador	puntual	lineal	
Discreto			Foco fijo (Evacua el calor más fácilmente)
Continuo			Foco móvil (Recibe más energía)

Figura 1.2: Esquema de los sistemas de concentración solar. Tomada de Tecnologías Solares Termoeléctricas (s.f.)

#### **1.1.4. Concentrador de foco puntual: Horno solar**

El horno solar es un sistema de alta concentración que proporciona una atmósfera y un espacio de trabajo adecuado, en donde la energía de la radiación utilizada para el calentamiento se puede controlar con precisión y modificar rápidamente. Por las características que tiene este sistema sólo se utiliza para investigación. La tecnología de los hornos solares comenzó en 1950. La primera investigación sobre hornos solares tenía como objetivo comprender los efectos de las altas temperaturas (alrededor de 3 500 °C) en diversas propiedades de los materiales expuestos a un flujo de radiación altamente concentrado.

Como se menciona en Riveros-Rosas (2010) en la actualidad los hornos solares cuentan con una amplia gama de aplicaciones, por ejemplo:

- Determinación de propiedades termofísicas bajo luz solar concentrada, incluyendo expansión térmica, conductividad y difusividad térmicas, calor específico, propiedades mecánicas, y emisividad y emitancia espectral.
- Envejecimiento acelerado de materiales por UV.
- Desarrollo de receptores para la tecnología de plantas de generación de potencia termosolar.
- Descomposición térmica y termoquímica del agua para la producción de hidrógeno.
- Simulación de efectos térmicos en presencia de flujo radiactivo altamente concentrado.
- Destrucción de materiales tóxicos: industriales, orgánicos, desechos hospitalarios, etc.

El horno solar consta de un sistema óptico compuesto por un helióstato el cual sigue automáticamente al Sol y refleja la radiación solar a un concentrador. El concentrador puede ser un espejo parabólico o un conjunto de espejos esféricos.

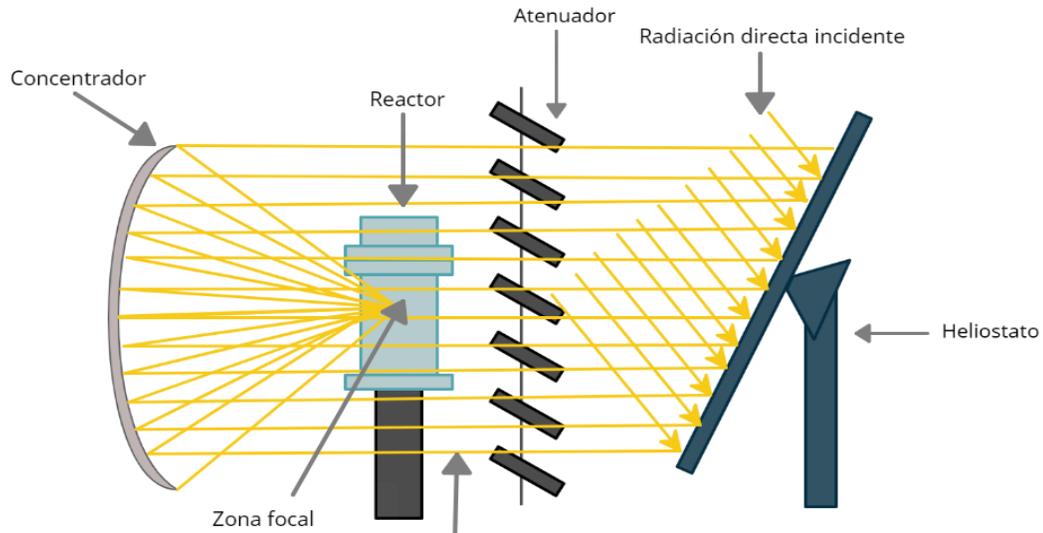


Figura 1.3: Esquema del funcionamiento de un horno solar.

Dado que el área o zona focal del concentrador, es una zona bien definida que tiene una mesa de trabajo con movimiento en x, y y z, es fácil instalar un equipo de experimentación o aplicación. El nivel de potencia y, por lo tanto, de temperatura del horno se ajusta mediante un atenuador, que funciona como una persiana, se encuentra entre el helióstato y el concentrador. Existen limitaciones en cuanto a sus condiciones de funcionamiento, ya que deben colocarse en zonas con poca nubosidad, las pruebas experimentales solo se pueden realizar de forma intermitente y solo se puede procesar una pequeña cantidad de muestras a la vez (Riveros-Rosas et al. 2010).

### 1.1.5. Horno Solar del IER-UNAM

El Horno Solar de alto flujo radiativo (HoSIER) se encuentra ubicado en las instalaciones del Instituto de energía Renovables de la UNAM, en Temixco, Morelos. Es un equipo que utiliza energía solar concentrada para la investigación básica y aplicada, además de investigar varios procesos industriales y desarrollar componentes de tecnología de generación de energía solar térmica.



Figura 1.4: Horno Solar de Alto Flujo Radiactivo, en el IER-UNAM, Temixco Morelos. Tomada de Licurgo-Pedraza (2012).

El Horno cuenta con una potencia experimental de 30 kWt, un concentrador multifacético en un arreglo de 6.3 m x 6.3 m, un atenuador de 40 m<sup>2</sup>, un heliostato de 70 m<sup>2</sup> y un edificio de laboratorio donde se encuentra una sala de instrumentos y control experimental, así como un laboratorio de química y una plataforma de pruebas.

**CONCENTRADOR:** Es un concentrador facetado, compuesto por 409 espejos de forma hexagonal, un diámetro de 40 cm y superficie esférica. El arreglo de los espejos conforma un diseño de panel de primera superficie con aluminio depositado por evaporación. La disposición del espejo se divide en cinco elementos ópticos los cuales están montados sobre una estructura esférica de dimensiones 6.72 m X 6.2 m (Licurgo-Pedraza, 2012).

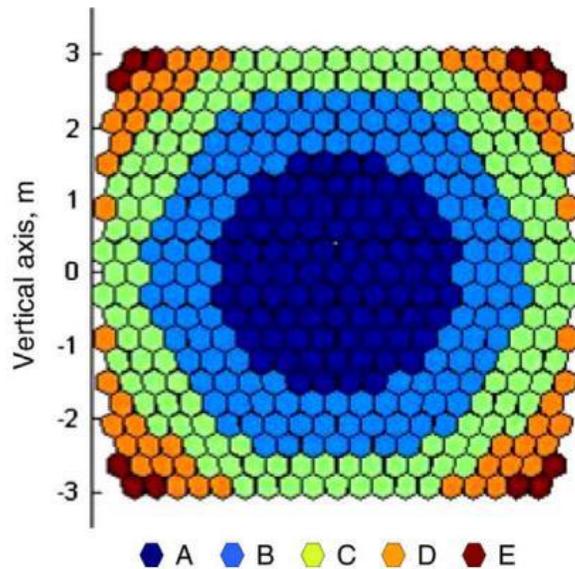


Figura 1.5: Distribución de facetas del concentrador en grupos de la misma distancia focal. Tomada de Riveros-Rosas et al. (2010).

**ATENUADOR:** Está compuesto por 45 placas de acero inoxidable pulidas con chorro de arena, colocadas verticalmente en un marco de 6,29 m X 6,7 m. El atenuador controla la apertura de las persianas y ajusta la potencia del HoSIER. El rango es de 0 a 100%, donde 0% significa que el atenuador está completamente cerrado y 100% significa que las persianas están perpendiculares al marco. Además, cuenta con un sistema de paro de emergencia si es que llegase a ocurrir un imprevisto durante el experimento (Licurgo-Pedraza, 2012; Ayala-Cortés et al., 2019).

**HELIOSTATO:** Constituido por 25 facetas, el tamaño es de 1.2 x 1.2 m y el grosor es de 6 mm. El heliostato se mueve en el cenit y el azimut para seguir al Sol de la mejor manera durante las pruebas (Ayala-Cortés et al., 2019).

**SISTEMA DE CONTROL:** Controla cada uno de los componentes del HoSIER como lo es el atenuador, la cortina, el heliostato, mesa de trabajo con movimiento tridimensional, sistemas de refrigeración y datos obtenidos de diversos sensores ubicados en los equipos experimentales, así como las estaciones de luz diurna y meteorológica. El sistema de control central se coordina a través de una máquina conocida como “máquina de estados”, la cual ordena a los sistemas principales del horno, sin interferir con el procesamiento de cada programa durante la ejecución. Todo

esto se lleva a cabo por medio de un sistema SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) por sus siglas en inglés (LACYQS, 2015).

## 1.2. Biomasa

Existe una variedad de definiciones para la biomasa, pero de acuerdo con Romanelli (2016) biomasa se puede definir como la materia orgánica derivada de la naturaleza o procesos biológicos que generalmente son utilizados como energía. Esta materia orgánica proviene de actividades forestales, agrícolas, ganaderas, domésticas e industriales. De forma que los recursos de biomasa se originan de medios muy diversos y heterogéneos.

La biomasa lignocelulósica como materia orgánica tiene las características de una energía renovable, ya que su contenido energético proviene de la energía solar, es decir que se lleva a cabo por el proceso de fotosíntesis, donde las plantas absorben la energía luminosa del Sol, agua y  $CO_2$  de la atmósfera para producir energía. Así mismo algunos animales absorben y transforman esta misma energía al alimentarse de ellas. Para que posteriormente a través de algún proceso termoquímico o biotecnológico al que se somete la biomasa se puedan obtener ciertos productos que generalmente se denominan biocombustibles, los cuales se utilizan con fines térmicos y eléctricos (Lucas & Del Peso, s.f.; Romero A, 2010).

### 1.2.1. Tipos de biomasa

Se puede clasificar según su composición, origen y estado:

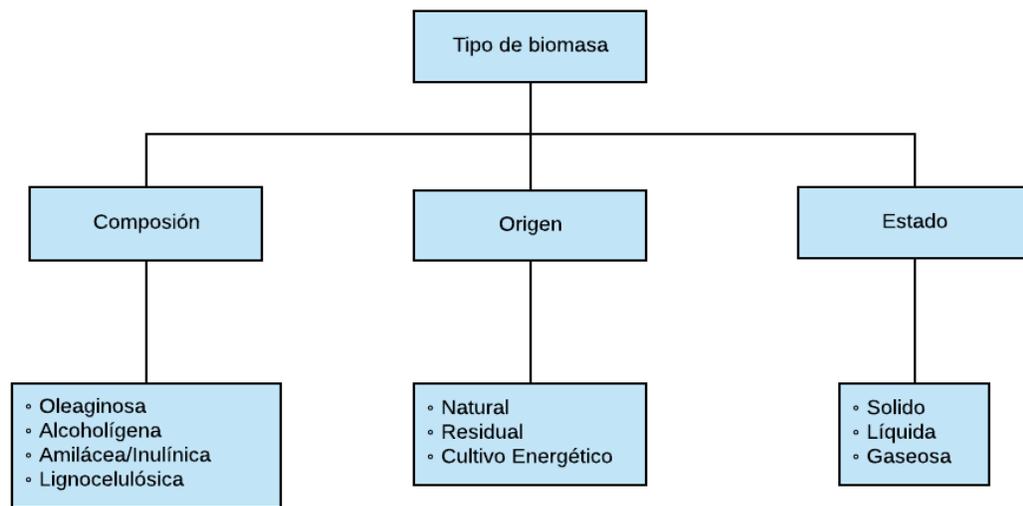


Figura 1.6: Clasificación de los tipos de biomasa.

De acuerdo con el origen:

Natural: Ocurre naturalmente en los ecosistemas sin intervención humana, es decir se genera de manera espontánea como lo son ramas o leñas.

Residual: Proviene de residuos generados por el desarrollo de actividades humanas y los denominados residuos biodegradables.

Cultivo energético: Son cultivos productores de energía con fines no alimenticios. A diferencia de los cultivos alimentarios agrícolas, los cultivos energéticos se seleccionan en función de la biomasa y el rendimiento en lugar de la calidad. Suelen caracterizarse por su robustez con el fin de reducir el coste de cultivo y por tanto el precio de la biomasa final.

### 1.2.2. Composición de la biomasa vegetal

La biomasa lignocelulósica o vegetal resalta por ser la más abundante en la tierra y la más utilizada para la producción de biocombustibles debido a su composición. Esta materia orgánica se encuentra constituida principalmente por tres tipos de polímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina los cuales suelen representar más del 75% de su estructura junto con otros componentes inorgánicos y extractivos (Abril & Navarro, 2012).

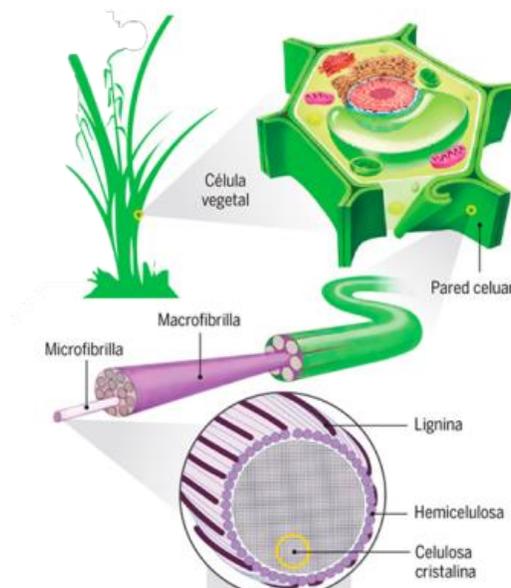


Figura 1.7: Composición del material vegetal.

Fuente: <https://www.gaceta.unam.mx/biobutanol-opcion-energetica-de-segunda-generacion/>

Celulosa: Es un polímero de glucosa conformado por cadenas lineales de D-glucosa las cuales se encuentran unidas por enlaces  $\beta$ -1,4 glicosídicos y pesos moleculares de aproximadamente de 100,000 g/mol. La combinación entre las dos unidades de glucosa a lo largo de la cadena de celulosa forma un disacárido denominado Celobiosa. La celulosa tiene un alto contenido de grupos OH, pero a pesar de ello cuenta con regiones cristalinas y amorfas que la hacen insoluble en agua. Además, esta misma estructura limita el ataque de reactivos químicos y enzimas. Para destruir o penetrar la estructura, se requieren tratamientos y condiciones estrictos como lo son el uso de químicos con ácidos, bases o agentes oxidantes, o bien altas temperaturas, es decir, la celulosa desempeña un papel importante en el mantenimiento de la estructura de las paredes celulares de las plantas (Abril & Navarro, 2012).

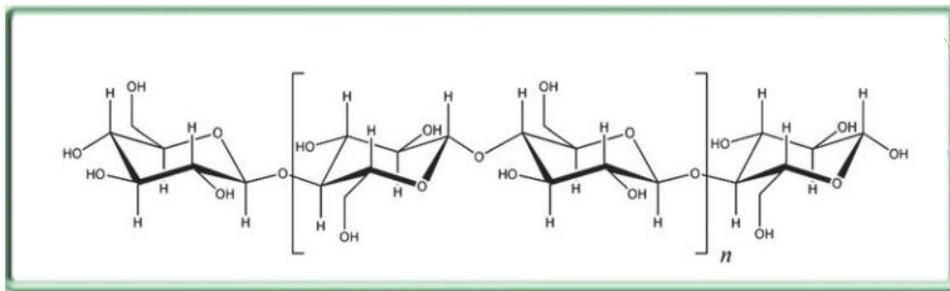


Figura 1.8: Estructura molecular de la cadena de celulosa. Tomada y modificada de Alonso, Wettstein & Dumesic (2012).

Hemicelulosa: Es un carbohidrato complejo heterogéneo con diferentes polímeros en su estructura, tales como pentosa (xilosa y arabinosa), hexosa (manosa, glucosa y galactosa), azúcar y ácido; los glucósidos están ligados entre sí. Las hemicelulosas tienen bajos grados de polimerización. El xilano es la hemicelulosa más común y el polisacárido no celulósico más importante en las monocotiledóneas. El xilano está compuesto por una cadena principal de unidades llamadas anhidro xilopiranosil, que están conectadas por enlaces glicosídicos  $\beta$ -1-4. Su función principal es conectar las fibras de lignina y celulosa las cuales dan la rigidez (Abril & Navarro, 2012; Sánchez Riaño, Gutiérrez Morales, & Muñoz Hernández, 2010).

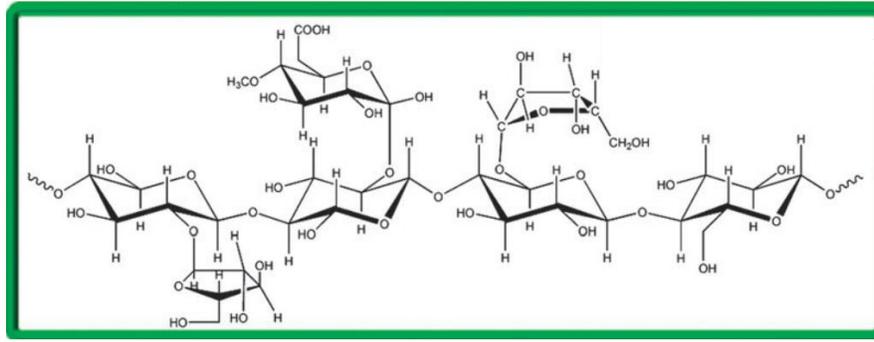


Figura 1.9: Estructura molecular de la cadena de Hemicelulosa. Tomada y modificada de Alonso, Wettstein & Dumesic (2012).

Lignina: Es un polímero amorfo de alto peso molecular que se encuentra constituido por tres diferentes unidades de fenilpropano (p-coumaril, coniferil y sinapil alcohol), estas unidades monoméricas están conectadas por enlaces carbono-carbono y enlaces de tipo éter y su proporción varía entre las especies de plantas (Torres & Montero, 2015). La lignina se combina con la celulosa y hemicelulosa para formar una barrera impenetrable en la pared celular además cumple con dos funciones básicas en los vegetales: proporciona resistencia a ataques de microorganismos y actúa como pegamento en las paredes celulares (Abril & Navarro, 2012).

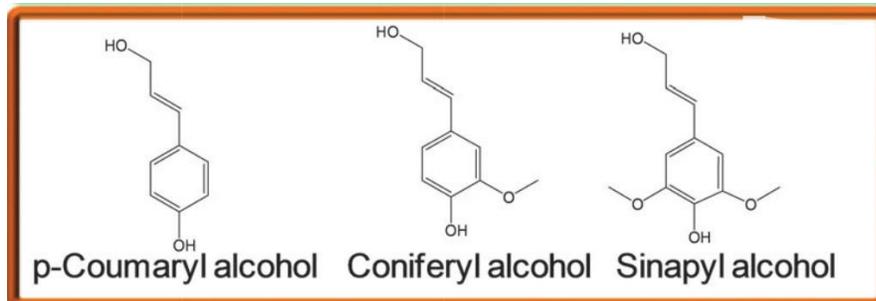


Figura 1.10: Estructura molecular de la cadena de Lignina Tomada y modificada de Alonso, Wettstein & Dumesic (2012).

Extractivos: Se definen como componentes extractivos a todos los compuestos vegetales que no forman parte de la estructura de la pared celular y pueden extraerse con agua o disolventes orgánicos entre los que se encuentran: terpenos como lo son polímeros del isopreno y alcoholes terpenicos, variedad de resinas, ácidos grasos, alcoholes, fitoesteroides además de fenoles como los taninos que son polifenoles derivados de ácido gálico y de la catequina (Kuchelmeister & Bauer, 2015; Barroso, 2010).

Componentes inorgánicos: Son aquellos componentes insolubles como cenizas compuestas carbonatos y oxalatos, como la sílice y algunos otros y en menor proporción como almidón, pectinas o proteínas (Barroso, 2010).

### **1.3. Biocombustibles**

Durante años, los combustibles fósiles han sido la fuente más barata de energía y obtención de productos de uso cotidiano, ejemplo de ello son la gasolina, el diésel, el gas licuado y gas natural comprimido, los cuales generalmente son utilizados en los medios de transporte. El uso de estos derivados de petróleo trae consigo preocupaciones y problemas de seguridad energética, ambientales, económicos y sociales, los cuales se acentúan más en los sectores rurales de todos los países. Considerando estos factores se han buscado tecnologías alternativas tales como los biocombustibles, los cuales se pueden obtener por medio de materias primas renovables y que se encuentran disponibles en todo el mundo. Estos combustibles tienen características parecidas a gasolinas y gasóleos, lo que permite su utilización en motores convencionales sin tener que efectuar modificaciones importantes.

#### **1.3.1. Clases de biocombustibles**

El término biocombustible se atribuye a los combustibles sólidos (biocarburantes), líquidos (etanol, aceite vegetal y biodiésel) o gaseosos (biogás, biosíngas y biohidrógeno) que se producen predominantemente a partir de biomasa, es decir, material orgánico o desechos metabólicos (Demirbas, 2009). Existen varios tipos de biocombustibles, los cuales se clasifican de acuerdo con la materia prima empleada para producirlos, estos se denominan de primera, segunda y tercera generación (Tabla 1.1).

**Tabla. 1.1.**

Tipos de biocombustibles. Salinas Callejas & Gasca Quezada (2009).

<b>Tipos de biocombustibles</b>		
<b>Sólidos</b>	<b>Líquidos</b>	<b>Gaseosos</b>
Paja	Alcoholes	Gasógeno
Leña sin procesar	Biohidrocarburos	Biogás
Astillas	Aceites vegetales	Hidrógeno
Briquetas y pellets	Ésteres derivados de	
Triturados finos	Aceite de vegetales	
Carbón vegetal	Aceites de pirolisis	

La biomasa para los biocombustibles de primera generación es la más utilizada, por ejemplo, la producción de etanol se lleva a cabo a partir del maíz, el trigo o la remolacha, caña de azúcar y para el biodiésel por medio de semillas oleaginosas, entre otras materias primas que se utilizan como alimento.

A diferencia de la materia prima que se utilizada para generar biocombustibles de primera generación, los insumos de segunda generación deben crecer en tierras que no puedan utilizarse para cultivar alimentos, generalmente son residuos agrícolas y forestales compuestos principalmente por celulosa y hemicelulosa sin valor alimenticio. Entre ellos se encuentran el bagazo de la caña de azúcar, el rastrojo de maíz (tallo, hojas y olote), aserrín, hojas y ramas secas de árboles o grasas animales, incluso aceites ya utilizados en las cocinas (Álvarez, 2009). La ventaja principal es que no se utilizan tierras de cultivo específicamente para este propósito y se da una segunda vida a lo que se considera como desecho, pero a pesar de esto se encuentran algunos inconvenientes dentro de su aplicación, ya que al ser un proceso complejo para la obtención del producto se necesita un alto consumo de energía y suministros, debido a que requiere de una serie de tratamientos físicos y químicos para convertir la biomasa.

Por último, nos encontramos con los de tercera generación los cuales incluyen una variedad de algas obtenidas de especies no alimenticias a través de técnicas de biología molecular. Muchas algas son extremadamente ricas en aceite, producen hasta 100 000 L de aceite por año, mientras que la palma, el coco, el ricino y el girasol producen hasta 5 950, 2 689, 1 413 y 952 L por año, respectivamente (Amin, 2009). Otra ventaja es que los sistemas de producción de biomasa de microalgas se pueden adaptar fácilmente a diversos niveles de habilidades operativas o tecnológicas. La desventaja se encuentra en su recolección y procesamiento ya que como se menciona en Amin (2009) el método de recolección por floculación química es un método que a menudo es demasiado costoso para grandes operaciones, además de que el crudo que se obtiene tiene un mayor contenido de nitrógeno que el petróleo ordinario, por lo que requiere de sistemas adicionales para el tratamiento de los gases de combustión con el fin de evitar la formación de  $NO_x$ .

Desafortunadamente aún existen barreras en la aplicación de biocombustibles, las cuales son principalmente económicas y de producción. Además, se deben tener en cuenta factores adicionales como el cultivo de alimentos, recopilación y transporte de biomasa residual, cultivo y cosecha de microalgas, así como del costo relativo del biodiésel versus el petrodiesel, ya que estos pueden variar dependiendo de la materia prima, la escala de producción y la región. Pero a pesar de esto, el enfoque favorable que nos ofrecen los combustibles líquidos renovables son tentativos, desde aspectos socioeconómicos hasta ambientales tales como: valor agregado a la materia prima, un mayor número de empleos en la manufactura rural, inversiones en plantas y equipos, reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, el desarrollo regional, la estructura social y la agricultura (Demirbas, 2009a).

#### **1.4. Tecnologías de conversión de la biomasa**

Dependiendo de la naturaleza de la biomasa y su consumo energético se pueden utilizar diferentes métodos para obtener biocombustibles de tipo líquido, sólido y gaseoso, ya sea por procesos mecánicos, termoquímicos o biotecnológicos (Salinas

et al., 2009). Los dos últimos son los más utilizados y su principal diferencia radica en su eficiencia, ya que los procesos termoquímicos requieren de menor tiempo de reacción como pueden ser segundos o minutos mientras que los bioquímicos pueden tardar días, semanas o incluso más para la obtención de algún producto (Zhang et al., 2010). Otro punto importante que hace que la eficiencia de los procesos termoquímicos sea mayor es la capacidad que tienen éstos para transformar y degradar la lignina, ya que comparado con los procesos bioquímicos la lignina es un residuo que no es posible utilizarlo en el proceso.

Por otro lado, el tipo de biomasa utilizada limita el tipo de proceso a utilizar. La biomasa puede dividirse en dos grandes grupos: biomasa seca y húmeda, la primera hace referencia a aquella que puede obtenerse de manera natural como la paja y la leña con una humedad por debajo del 60%, es utilizada en procesos termoquímicos o fisicoquímicos, ya que generan directamente energía térmica, así como la obtención de productos secundarios. La biomasa húmeda cuenta con una humedad por arriba del 60% entre ellas se encuentran residuos de animales, vegetación terrestre o acuática por mencionar algunos, generalmente su tratamiento es mediante procesos bioquímicos y fisicoquímicos, así como algunas rutas termoquímicas, es decir, procesos donde la gran cantidad de agua sea una ventaja y no afecte al proceso, como la gasificación con vapor de agua y el procesamiento hidrotérmico (Figura 1.11). Esta clasificación es parcial, pero ayuda a tener un panorama más general de la caracterización de los procesos de conversión (Klug, 2012).

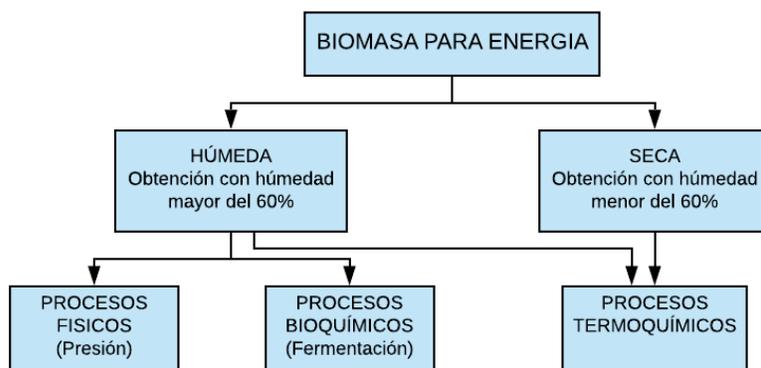


Figura 1.11: Clasificación de los procesos de conversión de biomasa. Tomada de Klug (2012).

### 1.4.1. Procesos Termoquímicos

Los procesos termoquímicos de conversión comprenden básicamente combustión, pirólisis, gasificación y procesos hidrotérmicos; esta clasificación se da de acuerdo con las condiciones del proceso y al tipo de producto final que se obtiene. A continuación, se describe brevemente las características de cada ruta termoquímica (Figura 1.12).

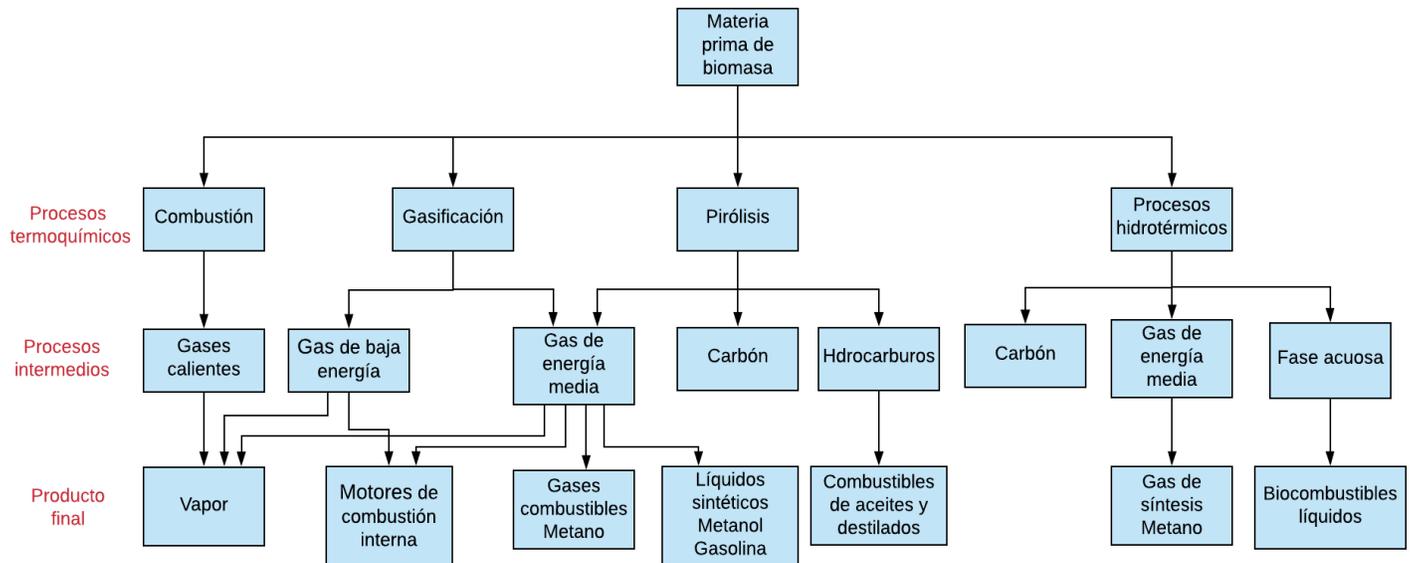


Figura 1.12: Procesos de conversión termoquímica para diferentes productos finales. Tomada y modificada de O. Ellabban et al. (2014).

**Combustión:** Proceso mediante el cual se combina el oxígeno del aire (comburente) con los diferentes elementos oxidantes del combustible (biomasa) originándose un desprendimiento de calor. Es el proceso más utilizado para la conversión de biomasa en la producción de calor para diferentes aplicaciones, por ejemplo, obtención de vapor.

**Pirólisis:** Descomposición térmica que ocurre mediante la ausencia de oxígeno donde la biomasa se calienta a temperaturas elevadas (300 – 650 °C) (Kambo & Dutta, 2015). Consta de tres etapas: la dosificación y alimentación de la materia prima, la transformación de la masa orgánica y finalmente, la obtención y separación de los productos como carbón sólido, bio-aceite y gases a temperaturas elevadas (Klug, 2012). Generalmente no es necesario un catalizador, y los fragmentos descompuestos

ligeros se convierten en compuestos oleosos a través de reacciones homogéneas en la fase gaseosa (Demirbas, 2009b). Existen diferentes tipos de pirólisis, de acuerdo con la temperatura de reacción y el tiempo de residencia, se puede dividir en rápida, intermedia y lenta.

**Gasificación:** Consiste en la quema de biomasa mediante oxidación parcial con aire, oxígeno, vapor,  $CO_2$ , o mezclas de estos componentes la cual se convierte en un gas denominado de síntesis o “gas pobre” a altas temperaturas en intervalos de entre 500 y 900 °C (Amin, 2009). El gas obtenido se conoce como gas productor, es una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y metano, junto con dióxido de carbono y nitrógeno además de otros gases como hidrocarburos ( $CH$ ), alquitranes, carbón vegetal, componentes inorgánicos y cenizas. La gasificación de carbón produce algunas otras reacciones de equilibrio además este "gas pobre" y puede separarse para obtener gases de mejor calidad como el hidrógeno o gas de síntesis (mezcla de  $H_2$  y  $CO$  en diferentes proporciones) (Demirbas, 2009b).

**Procesamiento hidrotermal:** En contraste con los procesos termoquímicos de conversión (combustión, gasificación y pirólisis) el proceso hidrotérmico de biomasa se diferencia por la adición de agua u otros solventes que son utilizados como medio de reacción. La biomasa de tipo lignocelulósica (materia vegetal) es la más utilizada en este tipo de procesos, ya que contienen grupos hidroxilo, por lo tanto, se pueden convertir en intermedios para la producción de biopolímeros. En definición, la tecnología hidrotérmica busca reproducir el proceso que se lleva a cabo de manera natural para la formación de combustibles fósiles utilizando como medio agua subcrítica o supercrítica a temperaturas de 200-800 °C y presiones de 5-30 MPa. En este trabajo de tesis se utilizará el procesamiento hidrotermal para transformar biomasa lignocelulósica de 2da generación en combustibles sólidos, gaseosos y líquidos. A continuación, se describe más a detalle el procesamiento hidrotermal.

## **1.5. Procesamiento hidrotermal**

En el procesamiento hidrotermal es relevante comprender cómo cambian las propiedades del agua con la temperatura y la presión de operación y cómo afectan a la respuesta de la biomasa. Entre las propiedades más importantes se consideran la miscibilidad, densidad, constante dieléctrica, productos iónicos, enlaces de hidrógeno, viscosidad y coeficiente de difusión. Además de la presión y temperatura como parámetros operativos, se pueden mencionar las concentraciones de la materia prima y los tipos catalizadores, ya que todos ellos afectan la selectividad de los productos (Kan et al. 2014). El proceso solo se ha logrado a pequeña escala con residuos urbanos, agrícolas y pecuarios por lo cual aún se encuentra en etapa de desarrollo. Los principales productos que se obtienen son aceite, carbón, sustancias solubles en agua y gas. Al añadir diferentes tipos de catalizadores se puede mejorar la calidad del aceite y los productos obtenidos. En términos generales el tratamiento hidrotérmico es cuidadoso con el medio ambiente ya que, en comparación con los productos peligrosos obtenidos de la combustión como amoníaco y NOx, la oxidación hidrotérmica obtiene subproductos inofensivos (Toor, 2011). Aunque las tecnologías hidrotermales para el procesamiento de biomasa tienen muchos beneficios potenciales, estas tecnologías aún permanecen en la fase de investigación y no se comercializan ampliamente. Algunas de las razones por lo que esto sucede son: el diseño de los reactores, la carga de biomasa en la alimentación, precipitación de sal y problemas con el catalizador (Kan et al. 2014).

### **1.5.1. Clasificación del procesamiento hidrotermal**

De acuerdo con los parámetros de operación que se utilicen para el procesamiento hidrotermal (presión y temperatura) se pueden clasificar en tres subprocesos: Carbonización, licuefacción y gasificación (Figura 1.13).

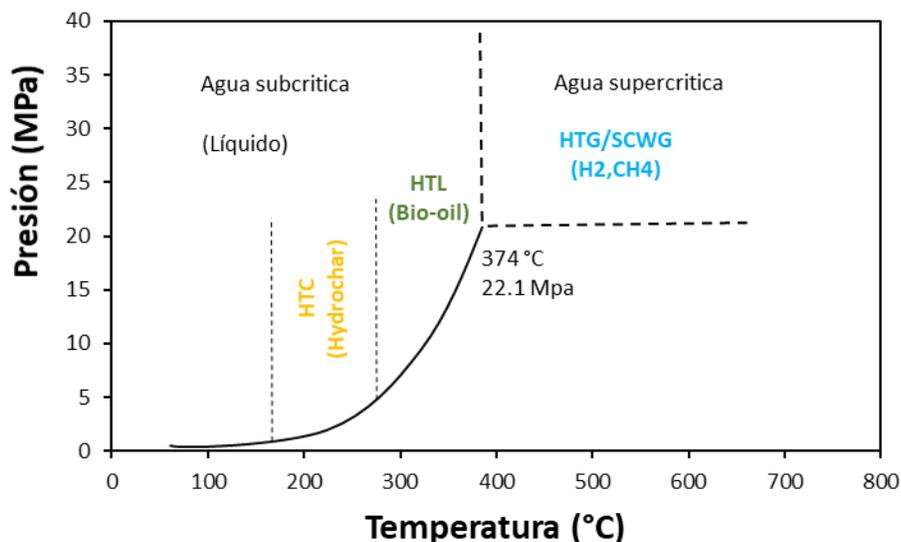


Figura 1.13: Clasificación del procesamiento hidrotérmico de biomasa con referencia al diagrama de fase presión-temperatura del agua. Kambo & Dutta (2015).

**Carbonización hidrotérmica:** La carbonización hidrotérmica o (HTC, por sus siglas en inglés) es un proceso termoquímico de conversión en el cual se obtiene un producto sólido rico en carbono. Aunque es un proceso novedoso, su estudio se remota a 1913 por Friedrich Bergius ya que describía el proceso natural de carbonificación. Este proceso se lleva a cabo en el rango de temperatura de 180–260 °C y presiones de 2 a 6 MPa (Kambo & Dutta, 2015). A estas condiciones, las reacciones de HTC son favorables debido a que necesitan menor energía de activación que las reacciones de pirólisis. La HTC incluye una etapa donde la biomasa se hidroliza para formar moléculas más pequeñas, deshidratación y condensación o polimerización (Ponce, 2012).

**Licuefacción hidrotérmica:** Proceso termoquímico por el cual podemos transformar la biomasa lignocelulósica en un producto rico en una fase aceitosa (conocida como bio-oil) (Remón et al., 2019). Este proceso se lleva a cabo generalmente a 280-370 °C y entre 10 y 25 MPa, en estas condiciones, el agua todavía está en estado líquido y tiene una extensa gama de propiedades (Toor, 2011).

Los rendimientos de la HTL presentan gran influencia de acuerdo con el tipo y composición de biomasa, ejemplo de ello son los bioaceites obtenidos de cascara de

coco y bagazos donde los rendimientos obtenidos van de 27 a 60% en peso además de valores caloríficos de 30 MJ/kg, esto quiere decir que los mayores rendimientos serán obtenidos con biomasa que contenga un alto valor de celulosa mientras que por el contrario un alto valor de lignina favorece a la formación de carbón (Kan, 2014).

**Gasificación hidrotermal:** El proceso conforma un conjunto de reacciones termoquímicas las cuales se llevan a cabo en un ambiente limitado de oxígeno que da como resultado la transformación de un sólido, el cual se convierte en una mezcla de gases debido a las condiciones de presión y temperatura que es sometido (400-700 °C y 25-30 MPa.). La mezcla se encuentra conformada por hidrógeno, metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono (Durán, 2014; Barreiro et al., 2013).

### **1.5.2. Características de los productos del procesamiento hidrotermal**

Como se mencionó anteriormente, los principales productos del procesamiento hidrotérmico de biomasa se presentan en cuatro fases. Un sólido, un gas, un aceite o crudo y una fase acuosa, cuyos rendimientos dependen de las condiciones de operación. A continuación, se describen las principales características de cada uno de los productos:

#### **Bioaceite**

El aceite de biocrudo o bio-oil es una mezcla multicomponente de varios tamaños moleculares producida por la despolimerización y descomposición de lignina, hemicelulosa y celulosa de microalgas (lípidos, proteínas y carbohidratos) o cualquier tipo de biomasa utilizada. El bioaceite producido es un líquido viscoso oscuro, que huele a humo y presenta una alta energía. Más del 99% del bioaceite se encuentra constituido por alcoholes, aldehídos, ácidos, ésteres, furanos, cetonas, fenoles derivados de la lignina, azúcares y diferentes grupos multifuncionales y cuenta con un pH de 2-5.8 el cual se relaciona con sus volúmenes de ácidos carboxílicos como ácido fórmico y ácido acético. Un ejemplo de su composición elemental reportado por García et al. 2012, es que a partir del alga *Demodermus sp.* a temperatura de 375 °C y 5 min de reacción se obtuvo un contenido de *N* 6,3%, *C* 74,5%, *H* 8,6% y *O* 10,5% y un valor calorífico (HHV) de 35,4 MJ/kg. Algunas de las características del bioaceite pueden obtenerse mediante cromatografía de gases, pero la mayoría de los compuestos pesados no eluirán de la columna cromatográfica y por lo tanto no podrán ser caracterizadas. Presenta un contenido energético alrededor del 70 al 95% del aceite combustible de petróleo y es parecido al crudo pesado, aunque debido a la cantidad de humedad, oxígeno, viscosidad y un menor valor de carbono y poder calorífico, no se puede utilizar directamente como combustible de transporte; sin embargo, se puede aprovechar como materia prima para la co-combustión en refinerías (Baloch et al., 2018; Barreiro et al., 2013).

### **Fase acuosa**

La fase acuosa que se obtiene de la HTL de microalgas presenta un alto contenido de nutrientes y materia orgánica. Se compone de  $PO_4^{3-}$ ,  $NH_4^+$ ,  $CH_3COO^-$  y cationes metálicos:  $K^+$ ,  $Na^+$  o  $Mg^{2+}$ . Con base en lo anterior diversos grupos de investigación están buscando dar opciones para el uso de este subproducto. Algunas alternativas es que debido a que las microalgas pueden absorber nitrógeno de diversas fuentes (orgánicas o inorgánicas), se ha demostrado que el nitrógeno recuperado del agua puede ser utilizado para alimentar cultivos de diferentes cepas las cuales muestran una capacidad para crecer, pero a un ritmo más lento de lo habitual. Otra opción es utilizar la fase acuosa como fuente de carbono para cepas heterótrofas dado que el contenido de materia orgánica también es alto (Barreiro et al., 2013).

### **Fase gaseosa**

Los dos principales productos gaseosos obtenidos de HTL con microalgas son  $CO_2$  y el  $H_2$ . En el caso de Brown et al. 2010, se utilizó la microalga marina *Nannochloropsis* sp. a una temperatura moderada de 350 °C, donde registraron que el gas obtenido contaba con la siguiente composición molar: 662 mmol mol<sup>-1</sup>,  $CO_2$  y 297 mmol mol<sup>-1</sup>,  $H_2$ , mientras que la fracción restante consistía en una pequeña cantidad de  $CH_4$ ,  $N_2$ ,  $C_2H_4$  y  $C_2H_6$ . Algunos autores informan que, una vez superado el punto crítico del agua, la concentración de  $CO_2$  disminuye, mientras que la concentración de los hidrocarburos ( $CH_4$  y  $C_2$ ) aumenta (Brown et al., 2010; Barreiro et al., 2013).

En lo que respecta a García et al. 2012, el principal compuesto en la fase gaseosa es el  $CO_2$  (99.7-66.9 mol % con 5 min y 98.5-58.1 mol % con 60 min tiempo de residencia). El rango se mantiene de 175 a 350 °C. Se formaron cantidades muy pequeñas de  $CO$  y  $H_2$ , lo que indica que la desoxigenación se produce principalmente mediante descarboxilación en lugar de descarbonilación. Además del carbono gaseoso, estudios previos también han identificado compuestos que contienen nitrógeno en la fracción de gas. (García et al., 2012)

## Fase sólida

También se producen residuos sólidos con alto contenido de cenizas y casi sin hidrógeno, azufre ni nitrógeno. Jena *et al.* Proporcionaron la composición elemental de residuos sólidos HTL de *Spirulina platensis* a 350 °C y un tiempo de reacción de 60 min: 11,82% C, 1,81% H, 1,41% N y 0,61% S. Estos productos sólidos pueden contener algunos nutrientes, lo que los hace atractivos como enmiendas del suelo. Pueden ser utilizados como materia prima para procesos termoquímicos como pirólisis o gasificación mientras que las cenizas restantes se podrían convertir en fuentes de nutrientes para el crecimiento de microalgas (Barreiro *et al.*, 2013).

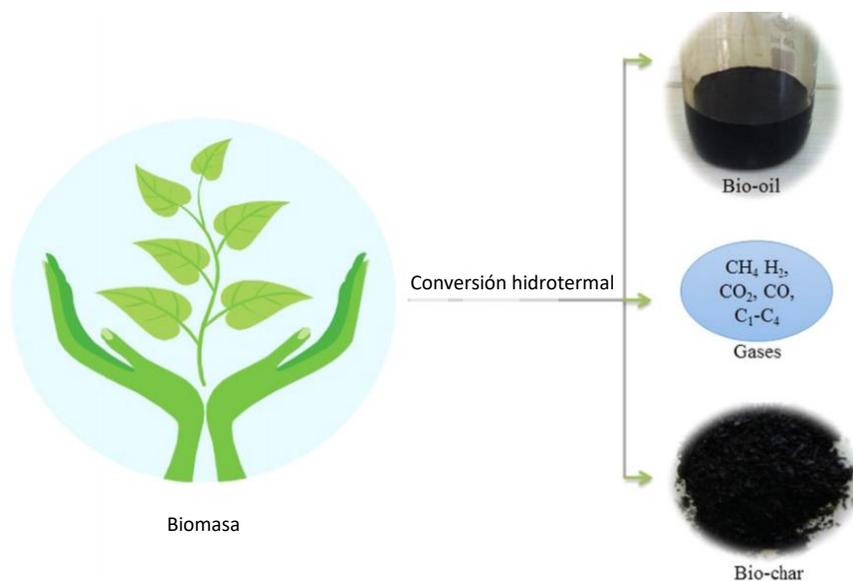


Figura 1.14: Productos obtenidos de la conversión hidrotermal de biomasa. Tomada de Tekin *et al.* (2014)

### 1.5.2.1. Separación de los productos del procesamiento hidrotermal

Hasta ahora, casi todos los experimentos reportados en la literatura en donde se emplea microalgas como biomasa han utilizado solventes orgánicos como diclorometano, cloroformo, acetona, THF o hexano; para la separación de las diferentes fracciones obtenidas. Al utilizar un solvente orgánico se aumenta el costo general del proceso además de que requiere de un mayor tiempo para su evaporación; esto puede provocar en el caso del biocrudo que las moléculas más ligeras y volátiles

se evaporen junto con el disolvente. Esta técnica de separación es necesaria para recuperar pequeñas cantidades de productos obtenidos de los experimentos. Pero si se requiere llevar el proceso a una operación continua, lo más recomendable sería separar por decantación, ya que la fase acuosa y la del bioaceite parecen formar fases separadas a temperaturas cercanas a la temperatura crítica del agua (Barreiro, Prins, Ronsse, & Brilman, 2013). De acuerdo con Vardo (2012) para la separación de sólidos se utilizó un sistema de filtración presurizado de acero inoxidable revestido con Teflón para eliminar los sólidos suspendidos en el solvente empleado (diclorometano) y la fase acuosa. El filtro utilizado (Satorious 0.45- I m membranas de celulosa) y los sólidos retenidos se recuperaron y secaron para determinar la masa de sólidos residuales. Luego se usó un embudo de decantación para recuperar los orgánicos solubles filtrados y el solvente se evaporó a presión reducida para recuperar la fase de bioaceite.

Para el caso de Garcia-Alba (2012) donde se utilizó como biomasa a la microalga *Desmodesmus sp.* la separación se realizó de la siguiente manera: el producto se recogió después de desconectar y abrir la autoclave. La mezcla de muestra se filtró al vacío. Después de filtrar la mezcla completa, el pequeño remanente que aún se encontraba presente en el recipiente de vidrio, se lavó con 20 ml de diclorometano. Después de filtrar, se centrifugó a 7500 rpm durante 15 minutos para optimizar la separación entre la fase inferior de diclorometano y la fase acuosa, que luego se recuperó por medio de una jeringa. Finalmente, para obtener un producto oleoso, totalmente libre de disolventes, la muestra se colocó en un lavado continuo con  $N_2$  como gas portador durante 24 horas, para evitar posibles oxidantes lipídicos (figura 1.15).

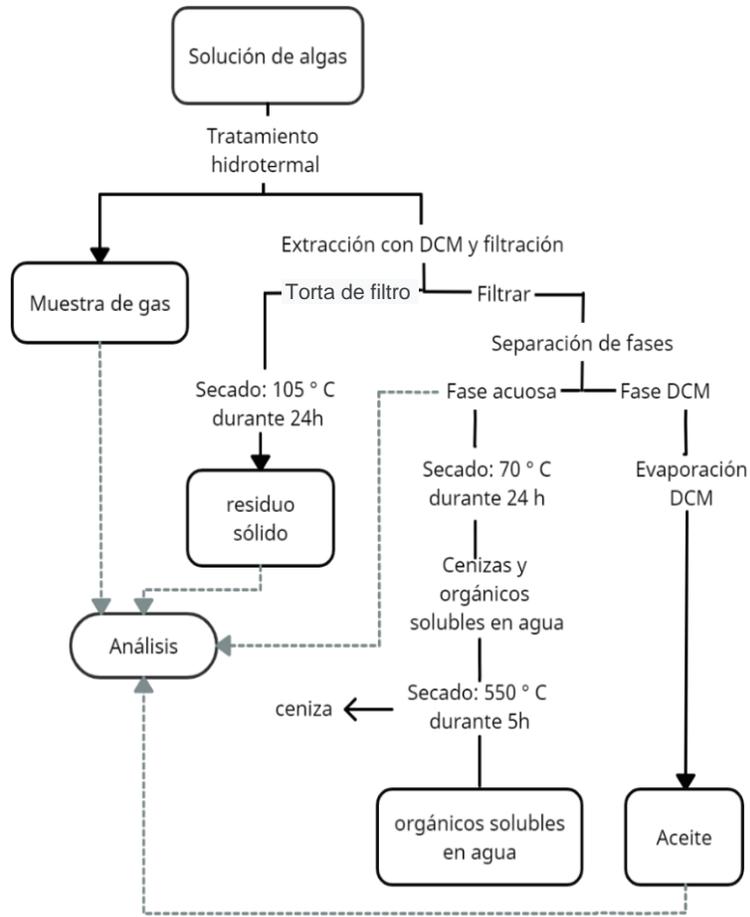


Figura 1.15: Procedimiento de recolección y separación de productos. Tomada y modificada de García-Alba (2012).

### **1.5.3. Parámetros operacionales del procesamiento hidrotermal**

#### **1.5.3.1. Efecto de la biomasa y el disolvente**

El tipo de biomasa es un parámetro importante para considerar en el procesamiento hidrotermal ya que se encuentra constituida por varios elementos, los cuales reaccionan de manera diferente al tratamiento. Cada elemento de la biomasa se comporta de manera diferente durante la reacción termoquímica, pero los cambios en la composición de la biomasa tienen un impacto significativo en la conversión y distribución general del rendimiento. La biomasa más utilizada para el proceso hidrotermal son la lignocelulósica y de algas. Teniendo en cuenta a Feng et al. 2014 donde se estudiaron 3 tipos de biomasa con las siguientes condiciones de operación: presión inicial de  $N_2$  de 2,0 MPa durante 15 min a 300 °C. Dio como resultado diferentes porcentajes de bioaceite, para cada una de las biomásas utilizadas, es decir, 36% para corteza de pino blanco, 58% de corteza de abeto blanco y 67% en corteza de abedul. Además de Otro estudio reportado por Karagoz et al. 2005 donde se utilizó celulosa, lignina, aserrín y cáscara de arroz bajo las mismas condiciones de temperatura y tiempo (280 °C, 15 min), se encontró que la celulosa exhibe la capacidad de generar más bioaceite que la lignina. En particular, cuanto mayor sea la celulosa y la hemicelulosa, mayor será el rendimiento (% en peso) del bioaceite y cuanto mayor sea el contenido de lignina, mejor será la formación de carbono. Esto debido a que la lignina es la más estable de las tres formulaciones básicas, sus cadenas moleculares son difíciles de romper o licuar, pero fáciles de coquizar. La celulosa y la hemicelulosa son más sencillas de degradar ya que cuentan con una estructura más simple, menor fuerza de adhesión y menor estabilidad que la lignina. Por lo tanto, incluso en las mismas condiciones de operación, las propiedades físicas y químicas y el rendimiento de los productos parecen depender en gran medida de las materias primas (Baloch et al. 2018; Xue et al. 2016).

La función del disolvente en el proceso hidrotermal es descomponer la materia prima y suministrar hidrógeno activo. Además, el aumento de la relación biomasa/disolvente reduce la tendencia del disolvente a disolverse y estabilizarse, lo que da como

resultado un rendimiento de bioaceite reducido. Se han utilizado diferentes solventes como agua, etanol, metanol y acetona para determinar su efecto sobre la tasa de conversión general y el rendimiento de bioaceite (% en peso) durante el proceso (Baloch et al., 2018). Los disolventes que se utilizan en el proceso se pueden clasificar en tres tipos: disolventes polares próticos, apróticos dipolares y no polares (Huang & Yuan, 2015). Los disolventes polares próticos son aquellos que contienen un enlace del tipo *OH* o *NH* ejemplo de ellos son el agua y alcoholes, los apróticos dipolares son solventes que no contienen estos enlaces como la acetona y el 1,4-dioxano, por último se encuentran los no polares o apolares son sustancias de tipo orgánico y en cuyas moléculas la distribución de la nube electrónica es simétrica; por lo tanto, estas sustancias carecen de polo positivo y negativo en sus moléculas. Algunos solventes de este tipo son el cloroformo, benceno y tolueno.

**Tabla 1.2.**

Propiedades de los disolventes de licuefacción comunes. Huang & Yuan (2015).

<i>Solvente</i>	<i>Formula</i>	$T_c(^{\circ}C)$	$P_c(MPa)$	$\rho_c(g/cm^3)$	<i>Polaridad</i> <sup>a</sup>	<i>Constante</i> <sup>b</sup> <i>dieléctrica</i>
Agua	$H_2O$	374	22.1	0.3320	100	79.7
Metanol	$CH_4O$	240	7.96	0.2720	76.2	32.6
Etanol	$C_2H_6O$	243	6.39	0.2760	65.4	22.4
Acetona	$C_3H_6O$	235	4.8	0.2779	35.5	20.4
1,4- dioxano	$C_4H_8O_2$	315	5.21	0.3702	16.4	2.21

*a* Agua tomada como 100.

*b* Determinado a 20 °C.

Las principales características de los solventes se relacionan con su constante dieléctrica. De acuerdo con lo observado por Liang et al. (2006) con diferentes solventes en los experimentos con mazorca de maíz, el rendimiento y la velocidad de reacción fue más significativo cuando se utilizó carbonato de etileno en comparación con el etilenglicol, debido a que la constante dieléctrica para el carbonato de etileno (90.5) fue mucho mayor. Otro factor para considerar es el uso de catalizadores, ya que ayudan a reducir la temperatura de reacción, así como mejorar la reacción cinética y

el rendimiento de los productos. Algunos ejemplos de catalizadores pueden ser los alcalinos ya que mejoran el rendimiento en aceites pesados (Zhang et al., 2010).

### **1.5.3.2. Agua como solvente**

Debido a que el agua es un solvente barato, no tóxico y forma parte de la biomasa húmeda se utiliza como medio de reacción en el proceso de licuefacción hidrotermal, además es una alternativa a los productos químicos corrosivos y solventes tóxicos (Kambo & Dutta, 2015). Las condiciones en las que opera el agua en el proceso hidrotermal se denominan agua subcrítica y supercrítica, es decir cuando el agua llega a su punto crítico a 374 °C y 22.1 MPa se encuentra en una fase de líquido-vapor donde los volúmenes molares del líquido y del gas se hacen iguales, de forma que desaparece la distinción entre las dos fases separadas (Tabla 3). Por lo tanto, el agua subcrítica es aquella que se encuentra debajo del punto crítico en un rango de temperatura de 100–374 °C y bajo suficiente presión para permanecer líquido, contrario a esto el agua supercrítica ocurre cuando la temperatura es superior a las condiciones del punto crítico (Tekin et al., 2014). En estas condiciones se encuentran varias ventajas debido a sus diversas propiedades. La viscosidad del agua disminuye con temperatura creciente y tiene un valor cercano a la viscosidad de vapor de agua cerca del punto crítico. En el agua supercrítica el agua presenta baja viscosidad y un alto coeficiente de difusión, que conduce a altas velocidades de reacción. Adicionalmente, el agua a altas temperaturas también puede comportarse como un reactivo en el medio de reacción hidrotermal (Tabla 1.3).

**Tabla 1.3.**

Propiedades fisicoquímicas del agua en función de la temperatura y la presión.  
Tomada y modifica de Tekin et al. (2014).

	Agua ambiente	Agua subcrítica	Agua supercrítica	
Temperatura (°C)	25	250	400	400
Presión, p (Mpa)	0.1	5	25	50
Densidad, $\rho$ ( $g\ cm^{-3}$ )	0.997	0.80	0.17	0.58
Constante dieléctrica, ( $\epsilon$ )	78.5	27.1	5.9	10.5
$p\ K_{su}$	14	11.2	19.4	11.9
Capacidad calorífica, $C_p$ ( $kJ\ kg^{-1}K^{-1}$ )	4.22	4.86	13	6.8
Viscosidad, $\mu$ ( $mPa\ s$ )	0.89	0.11	0.03	0.07
Conductividad térmica, $\lambda$ ( $mW\ m^{-1}K^{-1}$ )	608	620	160	438

Cómo se ha mencionado anteriormente los procesos hidrotermales presentan grandes ventajas tanto económicas como de producción para el desarrollo de biocombustibles, ya que la biomasa utilizada no necesita de un pretratamiento, esto comparado con otras tecnologías como la pirólisis donde la biomasa necesita estar seca.

### 1.5.3.3. Efecto del tiempo de residencia

Como se menciona en Xue et al. 2016 el tiempo de residencia se define generalmente como el tiempo de reacción a la temperatura máxima sin considerar los tiempos de calentamiento y enfriamiento. Anastasakis & Ross (2011) estudiaron el efecto del tiempo de residencia en las semillas de *L. cubeba* y descubrió que al cambiar el tiempo de reacción entre 30 y 120 min aumentaba el rendimiento de bioaceite (% en peso) de un 53 a 56.9%. Qu et al. 2003, investigó la licuefacción directa de *Cunninghamia lanceolata* en  $H_2O$  con tiempos de reacción de 10-30 min presentando un rendimiento máximo de aceite del 24% en un tiempo de residencia de 10 min, mientras que con tiempos de residencia mayores disminuyó. En conclusión, el tiempo de reacción juega un papel importante en la degradación de materiales. Muchos investigadores han sugerido un tiempo óptimo de 60 min para obtener un mayor rendimiento de bioaceite

(% en peso) y un menor rendimiento de carbonización (Baloch et al. 2018; Xue et al. 2016).

#### **1.5.3.4. Efecto de la temperatura de reacción**

La temperatura es uno de los parámetros decisivos del proceso HTL (figura 1.16). Cuando la temperatura se encuentra en condiciones subcríticas, se ha notado que incrementa la ruptura de enlaces químicos y la despolimerización de la biomasa. Por tanto, la concentración de radicales libres también aumenta y la probabilidad de reactividad de las moléculas fragmentadas, lo que provoca un aumento del rendimiento total de bioaceite.

Cuando la temperatura se acerca o supera el punto crítico, el agua se restringe y los rendimientos de carbón y gases aumentan con la temperatura de reacción, lo que indica que las altas temperaturas promueven la descomposición y la re-descomposición de los intermedios. Como resultado, la producción de bioaceite disminuye (Xue et al. 2016).

#### **1.5.3.5. Efecto de la presión**

La presión es otro parámetro importante que afecta el rendimiento de los aceites orgánicos HTL. En el proceso de HTL, la presión mantiene el agua en un estado monofásico, evitando así la gran entalpía de entrada requerida para el cambio de fase. La presión también mejora la descomposición y extracción de la biomasa. Además, la presión es directamente proporcional a la temperatura de reacción en el proceso HTL. La alta presión causada por la alta temperatura puede reducir la formación de bioaceite provocando una cantidad significativa de conversión intermedia en carbono. La baja presión también reduce el rendimiento de aceite orgánico debido a la reacción incompleta (Xue et al. 2016).

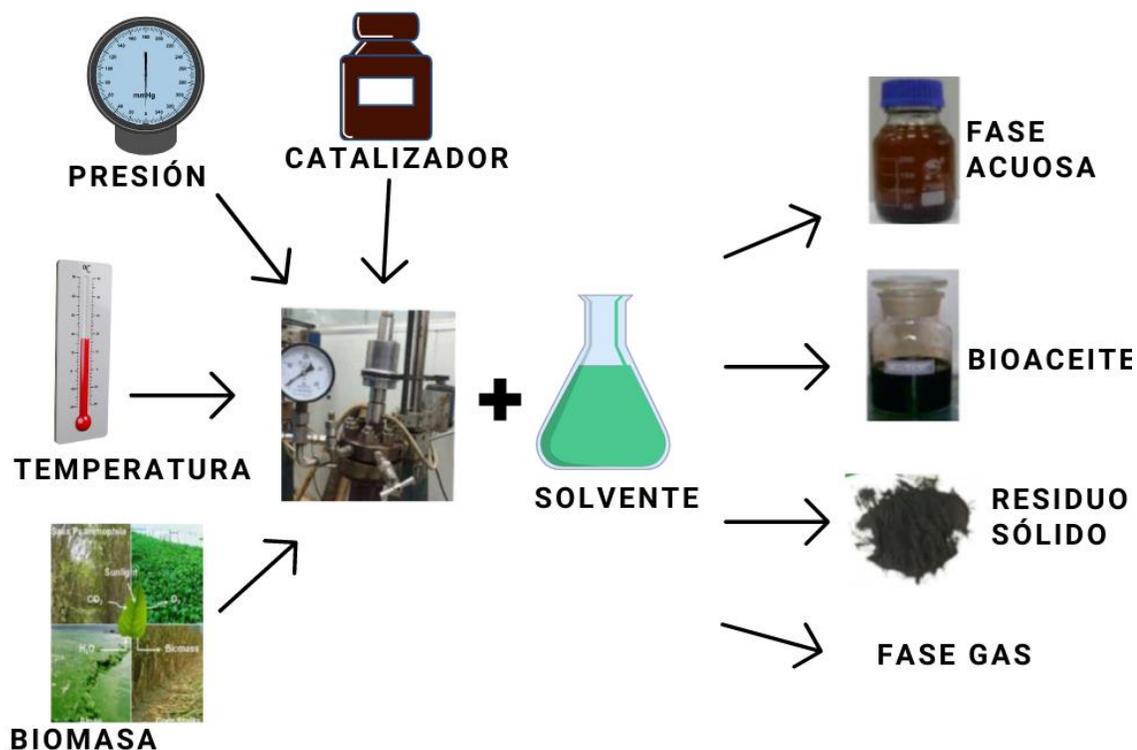


Figura 1.16: Vía de reacción del proceso hidrotérmico de biomasa. Basada en Xue et al. (2016).

## 1.6. Características generales del Agave y su uso como biomasa

Existen diferentes orígenes para la palabra Agave uno de ellos es el de origen griego el cual significa "noble, ilustre o admirable" y fue descrito por Linneaus en 1753, cuando describió a la primera especie conocida por la ciencia, el agave *Americana*. La familia *Agavaceae* cuenta con 20 géneros y alrededor de 300 especies, de las cuales 200 aproximadamente se encuentran en México. Aunque también se reportan desde 272 hasta 150 y 136 (Cedeño, 1995; Bautista et al., 2001; Alfaro et al., 2007). El género Agave pertenece a la clase monocotiledónea, es decir, es una angiosperma caracterizada fundamentalmente por desarrollar una única hoja seminal o cotiledón (primera hoja que se forma en el embrión) tras la germinación de la semilla, esta planta posee una forma en espiral y tiene entre 1.2 y 1.6 m de altura. La estructura de las

hojas es lanceolada aproximadamente de 90 a 120 cm, además de ser afiladas, con fibras duras y casi siempre rígidamente estiradas.

La distribución de su cultivo abarca alrededor de 2 500 a 2 800 plantas en una hectárea, las cuales dependiendo de las condiciones ambientales como terrenos secos, altos y ricos de sílice favorecen a su crecimiento para que alcancen la madurez en un tiempo estimado de 6 a 10 años. Una vez transcurrido ese tiempo, la piña del agave esta lista para su cosecha y posterior tratamiento, en el cual se lleva a cabo la extracción de azúcares que se utilizan en el sector de la industria de bebidas y alimentos (Bautista, 2001).

El bagazo de agave es el residuo fibroso que queda después de picar, lavar y exprimir el agave cocido para extraer el azúcar fermentable para la producción de tequila. El bagazo está compuesto principalmente por fibras heterogéneas de 10-12 cm de longitud y materiales orgánicos no fibrosos, que corresponden a la corteza y la cubierta vascular fibrosa esparcida dentro de la cabeza de la planta de agave (Flores, 2009). Entre los usos que presenta el bagazo de agave se encuentra el alimento para aves y ganado, para la fabricación de ladrillos de adobe, relleno para muebles y colchones, papel hecho a mano y combustibles de calderas. Se encuentra principalmente constituido por un 43% de celulosa, 19% hemicelulosa y 15% lignina, lo que lo convierte en un buen precursor para la formación de biocombustibles (Abreu, 2013).

### **1.6.1. *Agave Angustifolia***

Maguey de hoja angosta, espadín, gubuk y sacatoro son algunos de los nombres con los que es conocido el *Agave Angustifolia*; esta especie es utilizada en el procesamiento tradicional de la bebida alcohólica conocida como bacanora desde hace cientos de años. Cuenta con amplio rango de latitud que abarca desde el norte de México hasta Costa Rica y una altitud del nivel del mar hasta 2180 msnm, lo que lo hace una especie adaptable a diferentes tipos de ecosistemas (Vázquez-García, 2007). Como otros agaves, tiene un ciclo de vida largo por sus características biológicas, pues suele tardar entre 6 y 8 años en producir los frutos de las semillas.

También es una planta que tiene un solo evento de reproducción final, es decir, que después de eso mueren (Martín, s.f.).

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El proyecto de investigación es solo para fines descriptivos por lo que se cuantificó los componentes que contiene la biomasa lignocelulósica y se centra en informar las características de los productos obtenidos del proceso. Los experimentos se llevaron a cabo en el HoSIER (horno de concentración solar experimental de la UNAM) ubicado en las instalaciones de IER, Temixco.

### 2.1. Técnicas de caracterización

La biomasa utilizada para este proyecto fue bagazo de agave de la especie "*Angustifolia*" y fue recolectado en el estado de Guerrero (Figura 18). Para la caracterización se utilizaron las normas del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, por sus siglas en inglés), ya que cuentan con un apartado para caracterizar materiales lignocelulósicos. Esta caracterización es importante realizarla ya que con ella se puede conocer la composición básica y propiedades de la biomasa que se utilizará en las pruebas experimentales. Es importante aclarar que no fue posible llevar a cabo la caracterización completa con todos los procedimientos que proponen las normas NREL debido a que no se tenía todos los reactivos necesarios, por lo tanto, sólo se realizaron las pruebas que se describen a continuación:



Figura 2.1: Bagazo de agave de la especie *Angustifolia*.

### **2.1.1. Análisis elemental**

Se realizó un análisis elemental para comprender la composición de las muestras de agave. Esto incluye oxidar completamente la muestra mediante combustión, para convertir elementos en gases ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $SO_2$ ) los cuales son expulsados por helio. Este análisis da como resultado el contenido en peso de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno.

La preparación de la muestra se basó en colocar 10 mg de pentóxido de vanadio ( $V_2O_5$ ) en una placa de estaño para determinar la presencia de azufre. Después, se depositó de 2-3 mg de muestra mezclado con el  $V_2O_5$  y se cerró la bandeja. Por último, se registra el peso de la muestra sin pentóxido de vanadio y se corre en el Analizador Elemental Orgánico, marca *Thermoscientific* y modelo Flash 2000 CHNS/O (Ayala-Cortés et al., 2019).

Para el caso de los materiales viscosos como el bioaceite se encuentra la problemática de que la muestra queda adherida a las paredes de las charolas y estas no pueden cerrarse, por lo tanto, la muestra se seca a 60 °C durante 2 semanas hasta estar completamente seca, se raspa y coloca en la bandeja de estaño. Como consecuencia queda aire dentro de las charolas y se utiliza este valor como parte del análisis lo que nos genera falsos positivos para  $H_2$ ,  $N_2$  e incluso  $C$ . Se utilizó 2 mg por muestra, realizándose cada prueba por duplicado. Si la muestra no daba el valor previsto con 2 mg, se colocaba un máximo de 4 mg en la charola para ver si la muestra realmente contenía o no los elementos esperados. Debido a que estas bandejas son muy blandas los materiales duros o con formas muy afiladas, pueden llegar a perforar la bandeja lo que afecta a los resultados de la muestra.

### **2.1.2. Microscopia electrónica de barrido (SEM)**

La superficie de la biomasa se analizó mediante microscopia electrónica de barrido y el equipo utilizado para observar la topografía de la superficie fue de la marca *Hitachi* modelo S-5500. Para realizar este estudio se coloca una muestra de biomasa en un portamuestras de aluminio con cinta de carbono de doble cara para adherir el polvo.

Ya que la muestra no cuenta con un tratamiento térmico puede ser difícil de observar en el equipo, esto dado a su polaridad y electronegatividad. Por lo cual se coloca el portamuestras con biomasa en la cinta de carbón en un recipiente y se calienta junto con otra muestra de carbón, para promover la evaporación y depósito del carbono, generando así una mayor conductividad en la biomasa inicial (Ayala-Cortés et al., 2019).

### **2.1.3. Caracterización térmica mediante TGA de bagazo de Agave**

El análisis termogravimétrico del residuo de agave se realizó en la balanza termogravimétrica Q500 V6.7 Build 203 y marca *TA Instruments*. Para conocer el cambio de masa de la muestra a medida que cambia la temperatura. Esto nos proporcionará información sobre si la muestra se descompone o reacciona con otros componentes. Se utilizaron muestras de bagazo con masas de 23.223 mg. La prueba se realizó en una atmósfera de nitrógeno ( $N_2$ ) con una rampa de  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , por ser una descomposición termoquímica realizada en ausencia de oxígeno ( $O_2$ ), es considerada como pirólisis (Ayala-Cortés et al., 2019).

### **2.1.4. Cuantificación del poder calorífico**

Para la cuantificación del poder calorífico se utilizó un calorímetro de la marca *Parr* modelo 6400, donde se probaron muestras de biomasa, carbón y aceite. Además de utilizar el equipo mencionado se cuenta con ecuaciones reportadas en la literatura para determinar el poder calorífico de acuerdo con la composición elemental de muestras que contienen carbono. Por esta razón las muestras también fueron llevadas a un analizador elemental para determinar el contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre (*CHONS*).

El poder calorífico se calculó utilizando la siguiente ecuación. Tomada de Hosokai et al., (2016):

$$LHV [KJ/g] = 38.2m_C + 84.9(m_H - m_O/8) - \Delta H_1 \quad (1)$$

Donde:

$m_C$  = Carbono en %

$m_H$  = hidrógeno en %

$m_O$  = oxígeno en %

En cualquier base (húmeda, seca o sin cenizas)

$\Delta H_1$  = calor latente



Figura 2.2: Calorímetro *Parr*.

## 2.2. Descripción de reactor solar para procesamiento hidrotérmico

Los experimentos se llevaron a cabo utilizando un reactor de tipo autoclave, el cual fue diseñado específicamente para trabajar con altas presiones y altos flujos de energía solar concentrada en el horno solar del IER-UNAM. Las piezas que se utilizaron para la conexión del reactor solar hidrotérmico fueron proveídas por *Swagelok*. Para la recopilación de datos durante la prueba experimental se utilizó el programa *Keysight BenchVue*, el cual fue seleccionado debido a su interfaz, ya que no requiere más programación que la del tipo de sensor a utilizar. El programa lee la señal de voltaje o corriente y luego puede correlacionar el voltaje con el tipo de termopar perteneciente. El reactor cuenta con un sensor de presión que trabaja en un rango de 0-5000 psi y la señal de salida es de 4-20 mA, cabe mencionar que el sensor soporta hasta 70 °C de temperatura. Para la conversión de mA a psi, se tuvieron que llevar a cabo una serie de ecuaciones, en las cuales se tuvieron en cuenta los siguientes factores: la señal de salida tiene un comportamiento lineal dentro del rango de trabajo del sensor y al tener dos puntos operativos, se puede obtener una línea de tendencia por el método de mínimos cuadrados.

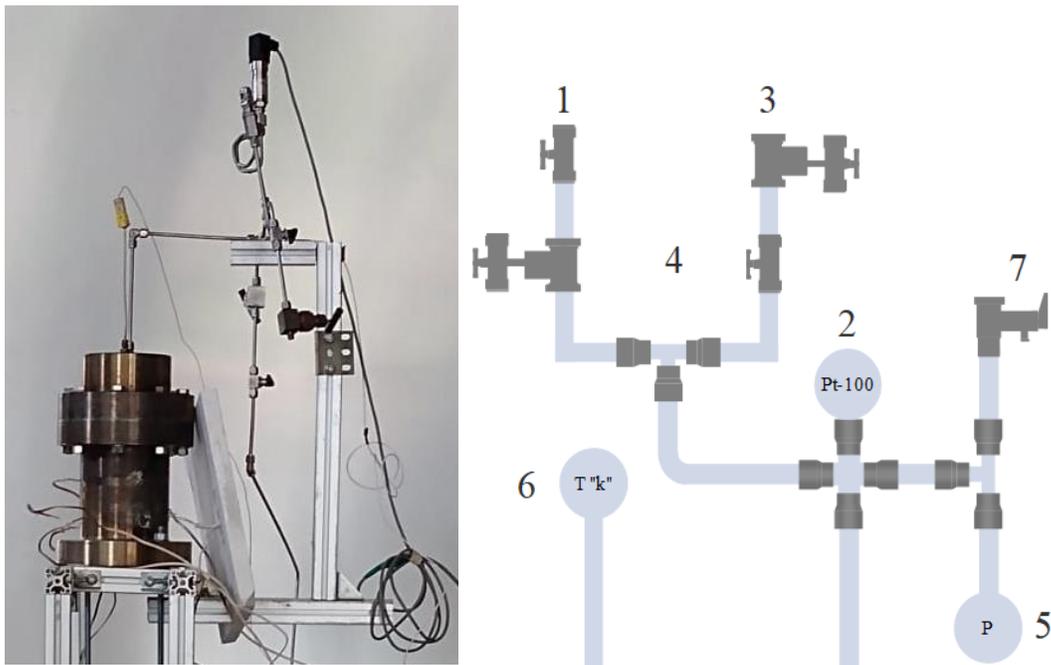


Figura 2.3: Instrumentación y foto del reactor.

**Tabla 2.1.**

Componentes para la instrumentación del reactor. Tomada de Ayala-Cortes (2019).

Número	Instrumentación
1	Entrada del gas de purga (válvula de bola 1/4 in)
2	Sensor Pt-100 para medir temperatura
3	Salida del gas de purga (Válvula de aguja 1/4 in)
4	Válvula de aguja 1/4 in
5	Sensor de presión
6	Termopar tipo "k" de inconel de 1/4 in
7	Válvula de alivio 1/4 in

El volumen interno del reactor es de 641 mL y el grosor de la pared es de 4.14 cm. Cuenta con una tapa del mismo material, acero inoxidable 304, con dos conectores NPT de 1/4 de pulgada que se encuentra instrumentada. El sello entra la tapa y el cuerpo del reactor se logra con un anillo de cobre y 8 pernos. La temperatura del fluido al interior del reactor y en las paredes exteriores se monitorean con 8 termopares tipo "K", los cuales se encuentran distribuidos de la siguiente manera: un termopar pasa por la tapa del reactor para medir la temperatura del fluido dentro del reactor junto con un sensor de temperatura PT-100 en la tubería. Los 8 termopares tipo "K" externos se dividen en 2 grupos 4 frente al concentrador y 4 termopares en la pared trasera. Los termopares 1-4 miran hacia el concentrador y 5-8 están en la parte trasera del reactor, expuestos a menos flujo de radiación (figura 2.4). (Ayala-Cortés et al., 2020).

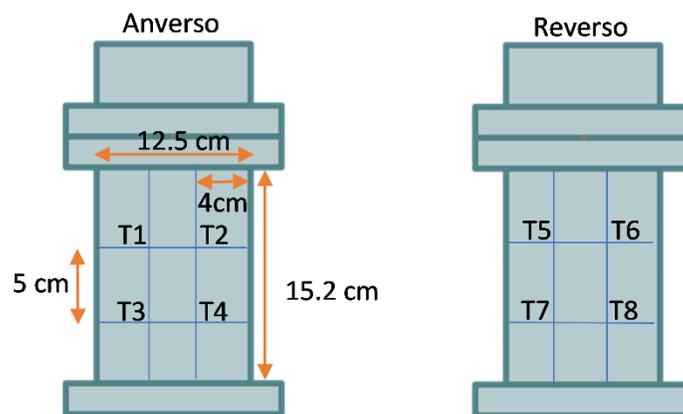


Figura 2.4: Diagrama del posicionamiento de los termopares.

En la licuefacción hidrotermal se recomienda tener una atmósfera libre de oxígeno, debido a que provoca que obtengamos productos con un alto contenido atómico de este componente, lo cual produce un bioaceite inestable. Por lo tanto, utilizó un gas inerte, que en este caso fue argón (Ar) de grado industrial (Pureza 99.5%) de la marca INFRA.

Al inicio de los experimentos se realizaron 3 lavados con argón para asegurarse de tener la menor cantidad de oxígeno durante los experimentos. Posteriormente se cargó el reactor a diferentes presiones de carga con el propósito de alcanzar presiones de operación que nos aseguran mantenernos arriba de la curva de saturación de agua y con ello mantener agua en estado líquido.

### 2.3. Recolección y separación de los productos

Una vez realizado el procesamiento hidrotérmico en el horno solar, el producto se recogió después de dejar enfriar el reactor a temperatura ambiente, y a continuación, se abrió el reactor y recogió cuidadosamente la mezcla. Se requirió la ayuda de un disolvente para recoger la cantidad máxima del producto que a menudo se adhiere a las paredes del reactor. El solvente utilizado para este paso fue agua desionizada. Posterior a esto, el producto fue recolectado en frascos de vidrio para ser pesados en una balanza granataria y conocer la cantidad de producto obtenido. Una vez realizado

este paso, se lleva a cabo la separación de cada uno de los reactivos, las cuales se describen a continuación.

### 2.3.1. Extracción

El bioproducto obtenido se filtró en una bomba de vacío con membranas Nylon de 0.45  $\mu\text{m}$  para separar la fase acuosa del sólido. Posterior a eso, la fase sólida (carbón) fue trasladada a un dedal de celulosa para poder ser introducida en el Soxhlet donde se utilizó 250 mL de acetona o diclorometano como solvente. El equipo permaneció de 12 a 15 horas calentándose a 120 °C. El biocarbón y el bioaceite se extrajeron hasta que el disolvente recirculado se volvió transparente.



Figura 2.5: Equipo Soxhlet para la extracción del bioaceite.

La fase acuosa que quedó en el matraz después de filtrar, se pasó a un embudo de decantación para posteriormente añadir el bioaceite obtenido en la extracción y rescatar el que se encuentre en la fase acuosa.

El carbón que se encuentra en el dedal fue secado a 60 °C en una mufla durante 2 h para poder retirar la parte sólida sin humedad en un vaso de precipitado.

### 2.3.2. Peso constante del bioaceite

La parte del bioaceite que se encontraba en el embudo de decantación se vació en un frasco aproximadamente a 1/3 de su capacidad y se mantuvo en la mufla a 60 °C para que el solvente orgánico (acetona) se evaporara, esto se hizo constantemente hasta que no quedara nada del solvente en el frasco y así obtener el bioaceite.



Figura 2.6: Bioaceite llevado a peso constante.

## Diagrama de flujo del proceso

Se puede observar en la figura: 2.7. los procesos que experimenta el bagazo de Agave antes y después del procesamiento hidrotérmal.

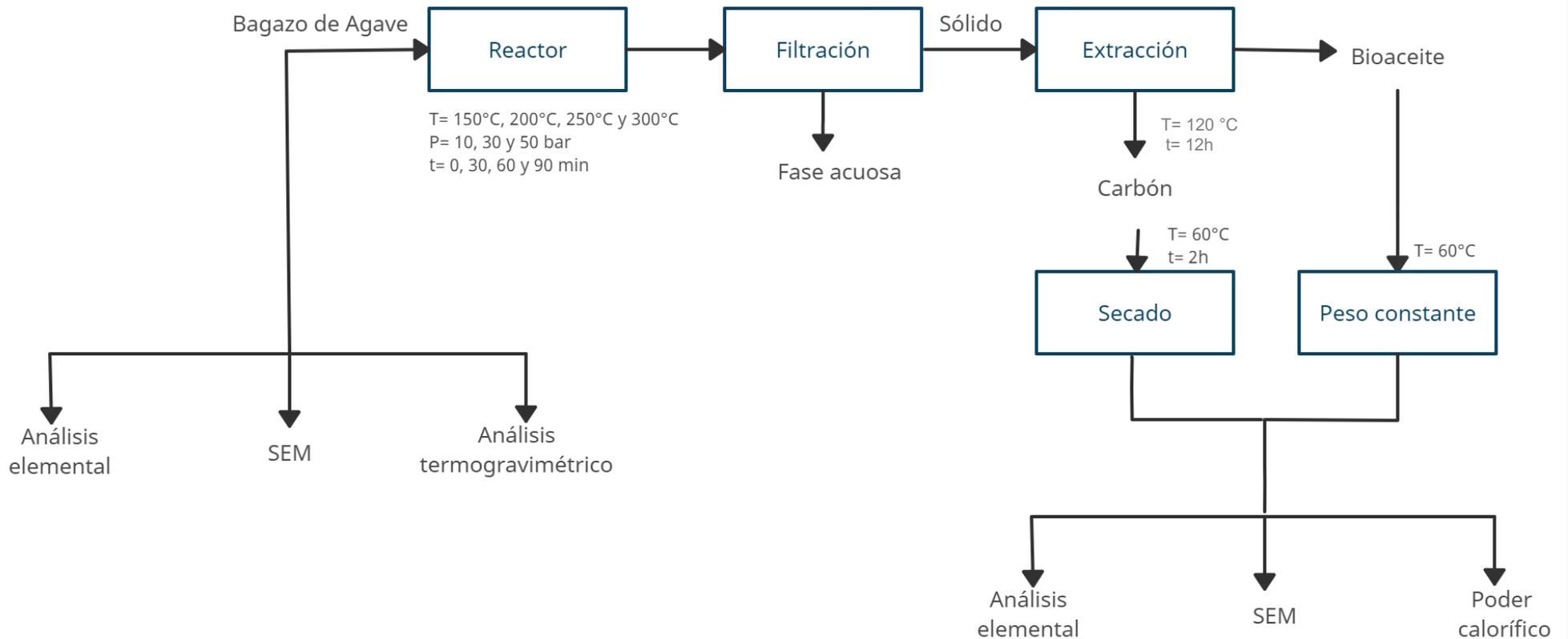


Figura 2.7: Diagrama de flujo de la síntesis y análisis de los productos obtenidos mediante licuefacción hidrotérmal.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las características de los productos obtenidos por medio del proceso hidrotermal están estrechamente relacionadas con las materias primas utilizadas y el tratamiento térmico. En este apartado se presentan las principales características físicas y químicas de la biomasa inicial (*Agave Angustifolia*), así como de los productos obtenidos del procesamiento hidrotérmico (bioaceite y biochar).

### 3.1. Caracterización del *Agave Angustifolia*

Para poder obtener resultados analíticos que sean de utilidad debe realizarse el análisis preliminar de la biomasa inicial antes de cualquier tratamiento térmico. Este estudio también nos permite observar si existe cierta degradación o cambio de los compuestos originales después del proceso.

**Tabla 3.1.** Análisis químico del bagazo de agave *Angustifolia*.

Análisis	Valor (%w)
Húmedad	9.4
Sólidos totales	90.6
Cenizas	11.05
Lignina	13.7
C	45.07
H	4.9
O	49.4
N	0.65
S	0
a) HHV (MJ/kg)	16.3
b) HHV (MJ/kg)	15.5

a) Obtenido con el calorímetro.

b) Obtenido con la ecuación (1).

Cómo se puede apreciar en la Tabla 3.1 el contenido de lignina en la biomasa de agave es de 13.7% en peso, lo cual indica que este porcentaje es menor a los reportados para otras especies de agave como *cupreata*, *tequiliana* y *lechuguilla* con valores de 17.8%, 16.8% y 15.3% respectivamente (Balam-Cocom et al., 2006). El contenido de cenizas es 11.05% lo que indica que el bagazo de agave contiene un alto contenido de minerales en comparación con lo reportado en Manjarrez (2007), para otros materiales lignocelulósicos tales como madera dura (0.3-1%), bagazo de caña de azúcar (2-5%) y paja de arroz (4-11%). Por otro lado, este porcentaje también nos indica la cantidad de masa que no puede ser transformada durante el procesamiento termoquímico. En términos generales, el contenido de cenizas de la mayoría de la biomasa no supera el 5%; sin embargo, durante el procesamiento y manipulación, puede contaminarse, aumentando su contenido de minerales y reduciendo la energía neta disponible, esto afectará la degradación térmica sobre algunos parámetros y rendimiento de productos de licuefacción hidrotermal.

### 3.1.1. Microscopia electrónica de barrido (SEM) de la biomasa

En la Figura 3.1 se observan las micrografías correspondientes al bagazo de agave. Las imágenes muestran presencia de partículas de forma fibrosa además de que la estructura inicial del agave no muestra una superficie porosa. El bagazo está compuesto por lignina y hemicelulosa, las cuales recubren las microfibras de celulosa y las aglomeran en forma de fibras intactas. Los cristales depositados en las fibras que se observan en la imagen a), b) y c), corresponden a sales de calcio, las cuales se encuentran presentes porque las plantas extraen estos minerales del suelo. Las sales que se encontraron mediante difracción de rayos X (figura 3.2) son la whewellita ( $CaC_2O_4 \cdot H_2O$ ) la cual como se observa es el mineral que más predomina en el bagazo, además de otros compuestos cristalinos como óxido de silicio ( $SiO_2$ ), calcio (Ca) y sulfuro de calcio (CaS).

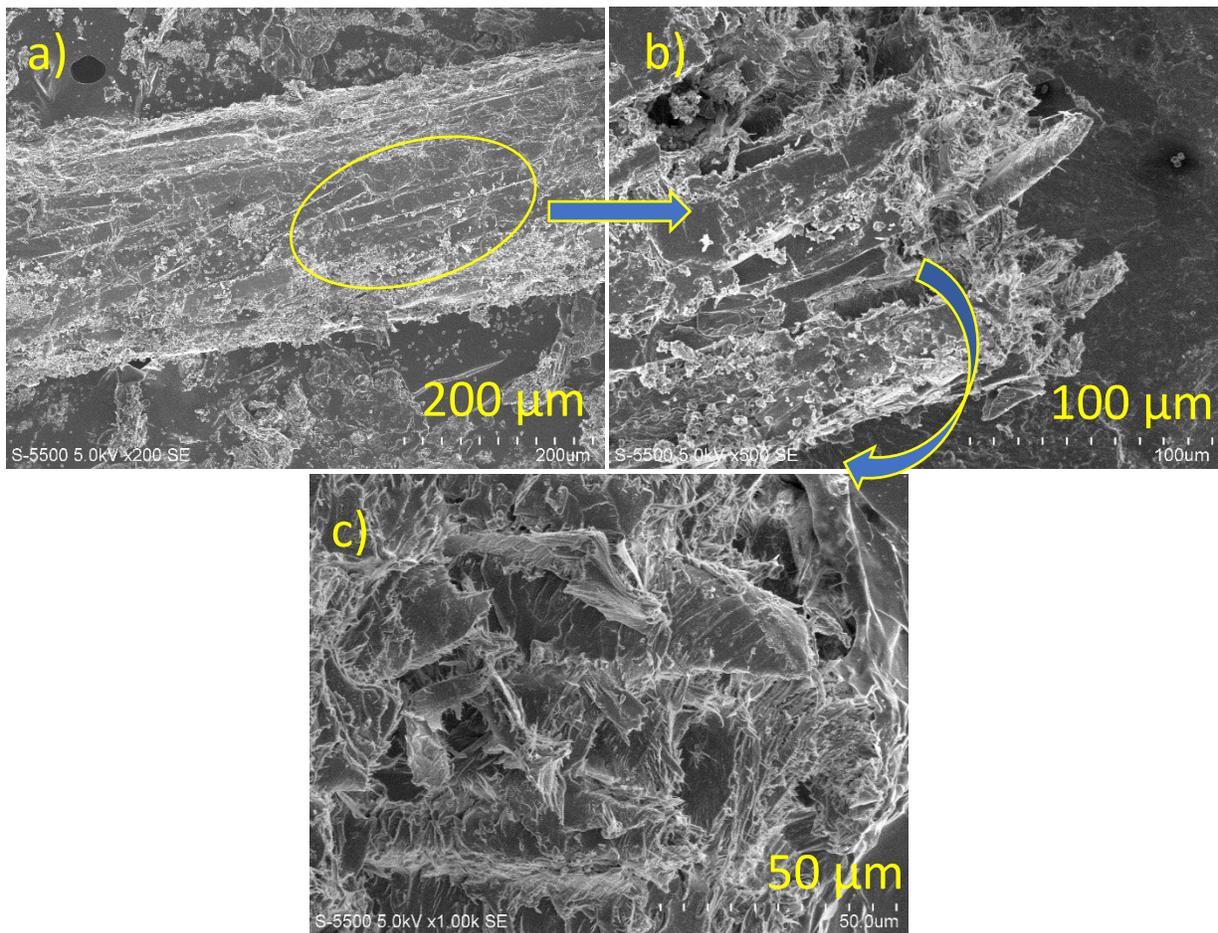


Figura 3.1: Micrografías de las fibras de bagazo de Agave a diferentes escalas (a) 200 micrómetros, b) 100 micrómetros y c) 50 micrómetros antes del proceso hidrotermal obtenidas con el microscopio electrónico de barrido MEB.

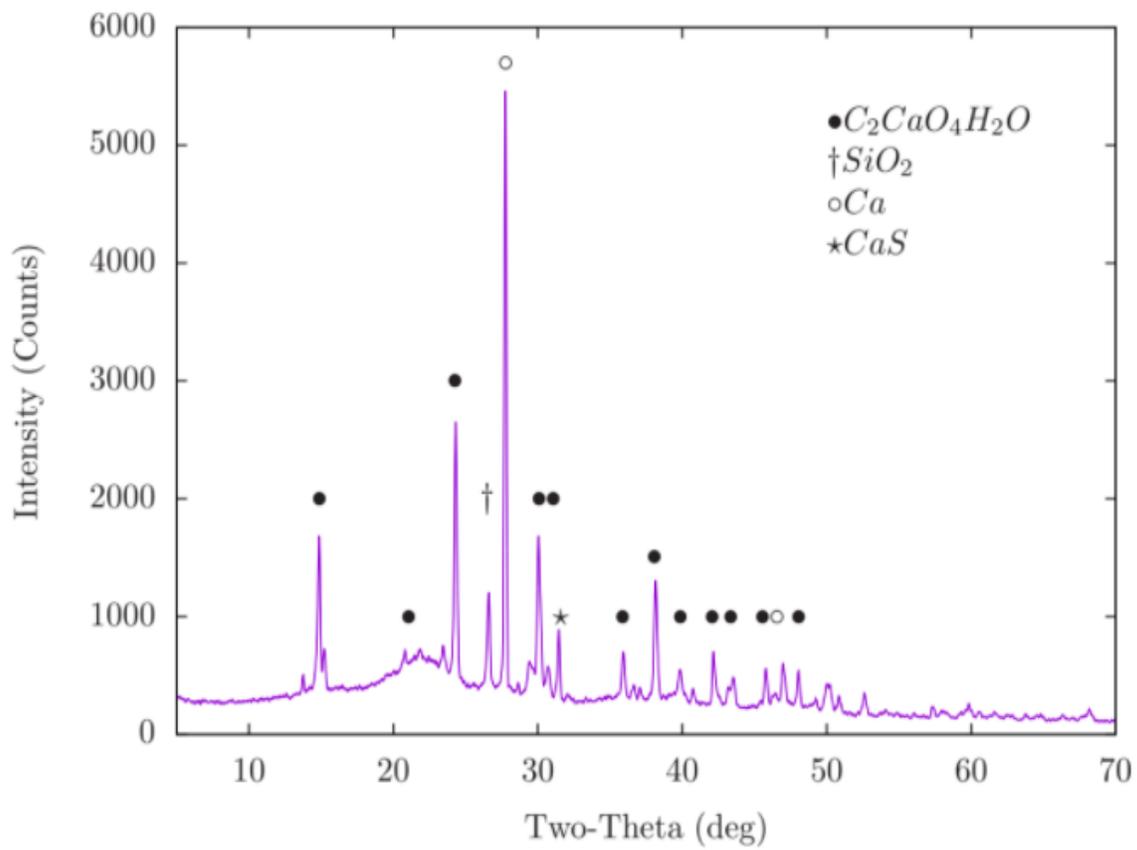


Figura 3.2: Grafica de difracción de rayos X del bagazo de agave.

### 3.1.2. Caracterización térmica mediante TGA de bagazo de Agave

La prueba se llevó a cabo en una atmósfera de nitrógeno ( $N_2$ ) con una velocidad de calentamiento de  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ . Como se puede observar en la figura 3.3 el cambio de masa con respecto a la temperatura (% mg vs s) se muestra del lado izquierdo, mientras que a la derecha se encuentra la derivada de la masa con respecto al tiempo y temperatura (% mg / min vs s). La pérdida en peso de 8.2 % y los picos menores a los  $200\text{ }^\circ\text{C}$  indican la liberación de componentes volátiles como alcohol y humedad, así como la descomposición de la hemicelulosa que ocurre de  $130 - 194\text{ }^\circ\text{C}$  de acuerdo con lo reportado en Chávez-Guerrero (2010). La celulosa es el componente más abundante de la biomasa, de modo que el pico más elevado en la figura 3.3 de  $333\text{ }^\circ\text{C}$  representa la liberación de grasas y cera. Mientras que el rango de descomposición de la lignina oscila de los  $280$  a  $500\text{ }^\circ\text{C}$ , lo cual se puede observar en la temperatura de  $484.06\text{ }^\circ\text{C}$ , ya que la deshidratación es más complicada que en la celulosa y la hemicelulosa  $194\text{ }^\circ\text{C}$  (Mohan *et al.* 2006). En el último pico se puede notar que a la a  $677.35\text{ }^\circ\text{C}$  aún hay degradación de compuestos como lo son anillos cíclicos y/o la posterior carbonización de alquitranes formados. Finalmente, a  $800\text{ }^\circ\text{C}$  los residuos representan un 37% de la biomasa original.

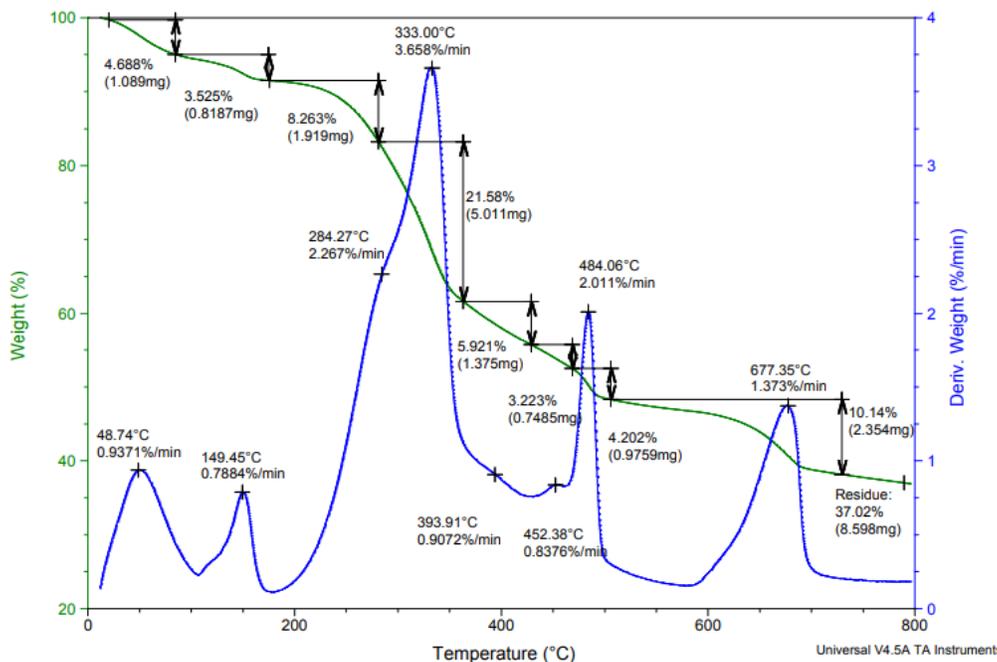


Figura 3.3: Termograma del bagazo de agave con una rampa de calentamiento de  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ .

## 3.2. Caracterización del carbón y bioaceite

### 3.2.1. Diseño experimental

Las pruebas realizadas se reportan en los siguientes diagramas: (figuras 3.4-3.7). Los experimentos se encuentran organizados de acuerdo con las variables que se modificaron; en total se tomaron 8 muestras. En la figura 3.4 podemos observar cómo cambia la temperatura mientras que las demás variables se mantienen constantes. En el caso de las figuras 3.5-3.7 se trabajó con una temperatura constante (250 °C) mientras que se modificaron la concentración, el tiempo de residencia y la presión, respectivamente. Este arreglo experimental permite evaluar el efecto que tiene cada una de las variables de operación en las principales características de los productos.

**Variabes dependientes:** Poder calorífico.

**Variabes Independientes:** Tiempo de residencia, temperatura, concentración y presión.

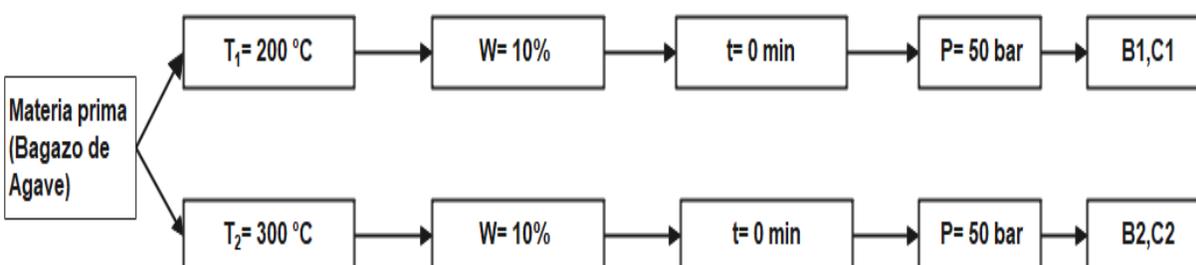


Figura 3.4: Diagrama del diseño experimental del proceso hidrotermal para diferentes temperaturas.

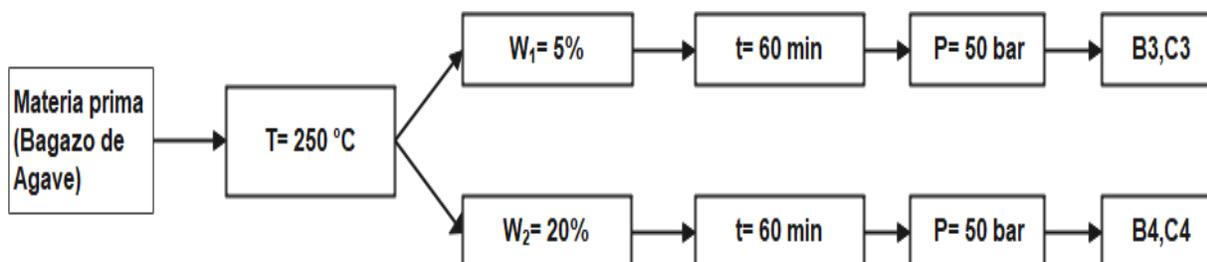


Figura 3.5: Diagrama del diseño experimental del proceso hidrotermal para diferentes concentraciones.

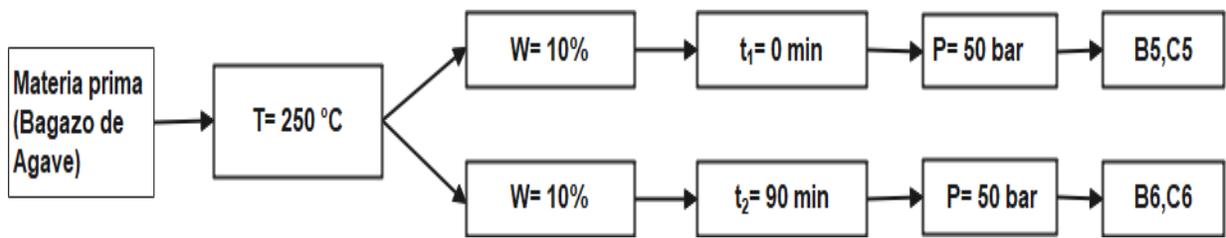


Figura 3.6: Diagrama del diseño experimental del proceso hidrotermal para diferentes tiempos de residencia.

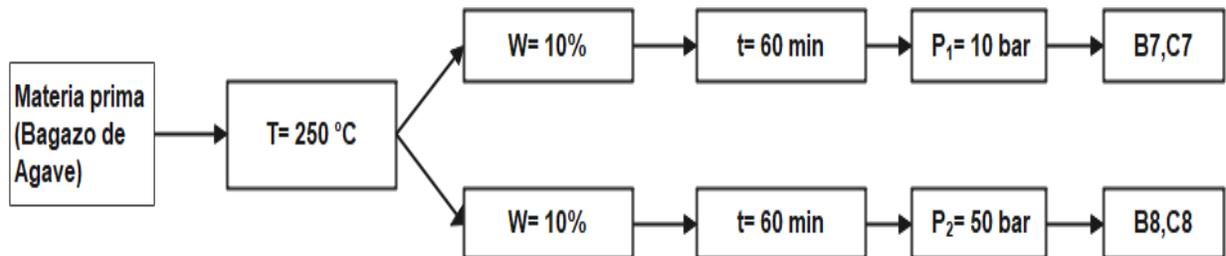


Figura 3.7: Diagrama del diseño experimental del proceso hidrotermal para diferentes presiones.

**Donde:**

**P=** Presión

**T=** Temperatura

**W=** Concentración de bagazo

**t=** Tiempo de residencia en el reactor

**B=** Nombre de la muestra de bioaceite

**C=** Nombre de la muestra de carbón

### 3.2.2. Análisis elemental

La Tabla 3.2 y 3.3 muestra los porcentajes de nitrógeno, carbono e hidrógeno promedio obtenido del duplicado de las muestras seleccionadas de bioaceite y carbón. La nomenclatura y condiciones utilizadas para las muestras se mencionan en las figuras 3.4-3.7.

**Tabla 3.2.** Análisis elemental de los carbones por OEA de las muestras.

Análisis elemental (%wt)										
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	*Turba	*Lignito
<b>C</b>	39	52	68	54	50	57	57	54	55	63
<b>H</b>	4	3	4	4	5	4	4	4	5	4
<b>O</b>	56	45	28	42	45	39	39	42	33	17
<b>N</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1
<b>S</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

a) % En peso de oxígeno se calculó por diferencia =  $100 - [(C + H + N + S)]$

\*Valores sacados de *A. Mathanker, et al. (2020)*

**Tabla 3.3.** Análisis elemental del bioaceite por OEA de las muestras.

Análisis elemental (%wt)									
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	
<b>C</b>	63	69	53	65	60	67	68	65	
<b>H</b>	6	6	6	6	6	6	6	6	
<b>O</b>	31	25	41	29	34	27	26	29	
<b>N</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>S</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	

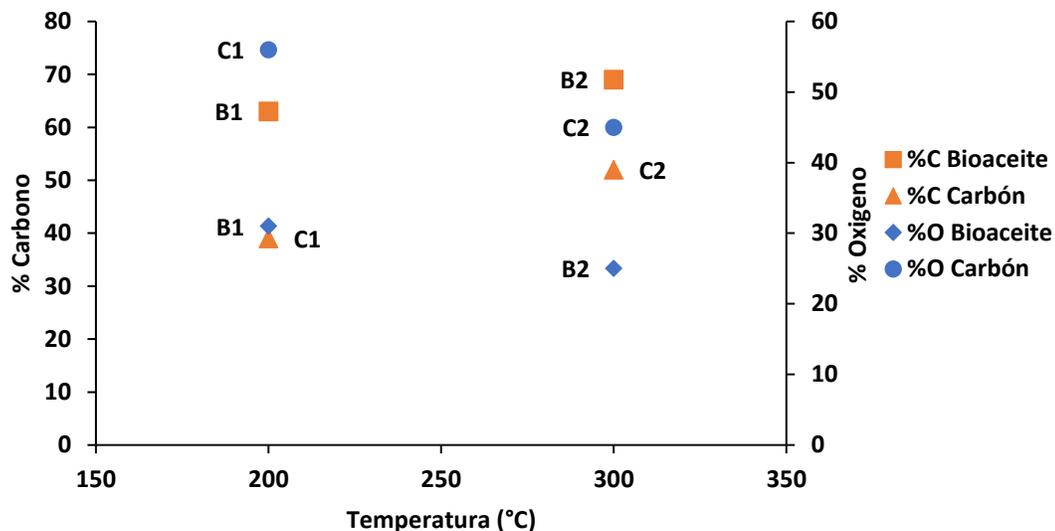


Figura 3.8: Diferentes condiciones de temperatura vs % de carbono y oxígeno.

Se puede observar en la Figura 3.8, para caso del bioaceite, el % de Carbono aumenta conforme aumenta la temperatura, es decir, comparando la muestra B1 y B2 donde las condiciones de operación son las mismas existe un aumento considerable de 63% a 69%. Lo mismo ocurre para el caso del carbón comparando las mismas muestras C1 y C2 las cuales aumentan de 39% a 52%. Mientras que para el % de O este disminuye cuando se aumenta la temperatura en ambos casos.

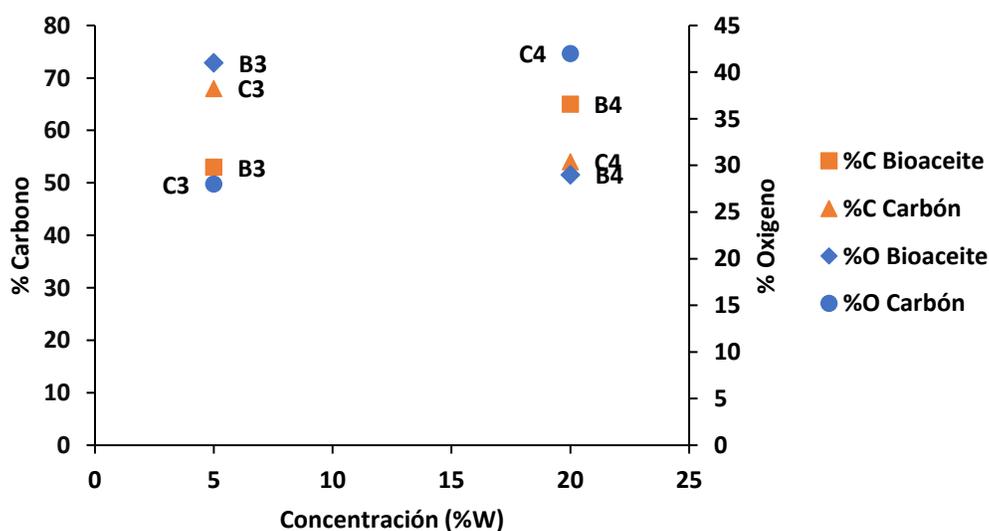


Figura 3.9: Diferentes condiciones de concentración vs % de carbono y oxígeno.

En el caso de las concentraciones B3 y B4 se puede analizar que el bioaceite aumenta su % de Carbono cuando la concentración de bagazo aumenta. Mientras que para los carbones ocurre lo contrario ya que el valor de carbono para la muestra C3 aumenta cuando el porcentaje de sólidos es de 5% y disminuye en C4 cuando es de 20%. Esto probablemente se debe a que, al haber más biomasa y tener un reactor sin agitación, puede haber zonas donde la temperatura no sea lo suficientemente alta para llevar a cabo la reacción química.

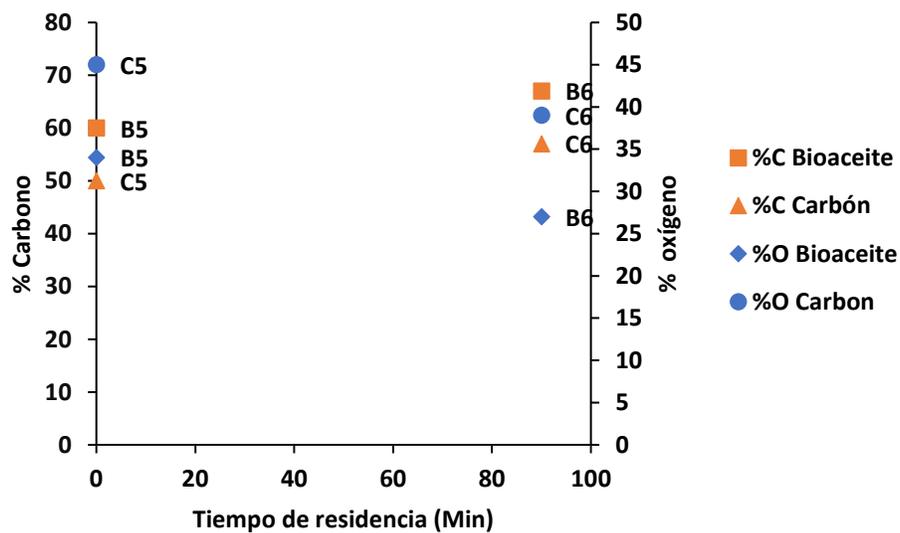


Figura 3.10: Diferentes condiciones de tiempo de residencia vs % de carbono y oxígeno.

Para muestras (B5, B6) y (C5, C6) ocurre el mismo caso que en las condiciones de temperatura ya que mientras el % de C aumenta conforme el tiempo de residencia, el % de O disminuye. Aunque la diferencia entre los porcentajes no es muy elevada se puede notar el ligero cambio que ocurre de acuerdo con los tiempos de 0 a 90 min.

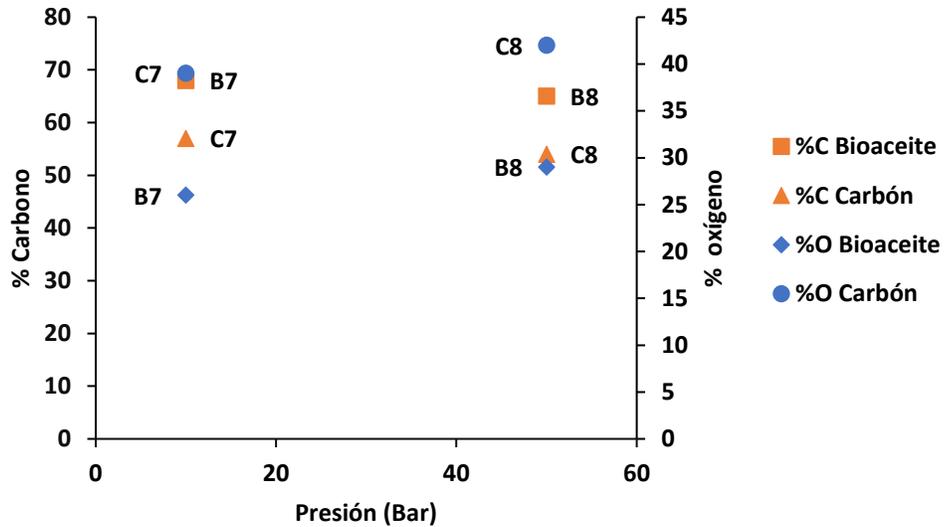


Figura 3.11: Diferentes condiciones de presión vs % de carbono y oxígeno.

Al aumentar la presión de 10 a 50 bar, podemos apreciar que el porcentaje de Carbono disminuye y el de oxígeno aumenta. En las muestras B7 y B8 pasamos de 68% de carbono a un 65% por otro lado el % de Oxígeno, pasa de un 26 a 29%.

### 3.2.3. Diagrama de Van Krevelen

El diagrama de Van Krevelen se emplea para la visualización de las características de composición de mezclas complejas. Se pueden utilizar para evaluar el petróleo crudo y sus productos refinados, así como la biomasa. Este diagrama se construye con las siguientes ecuaciones:

$$\frac{H}{C} = \frac{\frac{\%H}{M_H}}{\frac{\%C}{M_C}} \quad (2)$$

$$\frac{O}{C} = \frac{\frac{\%O}{M_O}}{\frac{\%C}{M_C}} \quad (3)$$

Donde %*H* es el porcentaje en masa de hidrógeno, %*O* es el porcentaje en masa de oxígeno, %*C* es el porcentaje en masa de carbono. *M<sub>H</sub>* , *M<sub>O</sub>* y *M<sub>C</sub>* es el peso atómico del hidrógeno, oxígeno y carbono, respectivamente. Rojas (2019) encontró que el poder calorífico superior disminuye con el índice de combustibilidad, además de que a mayor relación atómica H/C y O/C, menor es el poder calorífico de los residuos.

**Tabla 3.4.** Relaciones H/C y O/C del bioaceite para el diagrama de Van Krevelen.

<b>Bioaceite</b>	<b>H/C RA atm</b>	<b>O/C RA atm</b>
<b>B1</b>	1.14	0.36
<b>B2</b>	1.04	0.27
<b>B3</b>	1.36	0.58
<b>B4</b>	1.10	0.33
<b>B5</b>	1.2	0.42
<b>B6</b>	1.07	0.30
<b>B7</b>	1.06	0.29
<b>B8</b>	1.10	0.33

**Tabla 3.5.** Relaciones H/C y O/C del carbón para el diagrama de Van Krevelen

<b>Carbón</b>	<b>H/C RA atm</b>	<b>O/C RA atm</b>
<b>C1</b>	1.23	1.07
<b>C2</b>	0.69	0.64
<b>C3</b>	0.70	0.30
<b>C4</b>	0.88	0.58
<b>C5</b>	1.20	1.08
<b>C6</b>	0.84	0.51
<b>C7</b>	0.84	0.51
<b>C8</b>	0.88	0.58

**Tabla 3.6.** Relaciones H/C y O/C de la biomasa y carbones comerciales.

<b>Biomasa</b>	<b>H/C RA atm</b>	<b>O/C RA atm</b>
<b>Bagazo de Agave</b>	1.30	0.82
<b>Turba</b>	1.12	0.46
<b>Lignito</b>	0.84	0.21

### Diagrama de Van Krevelen

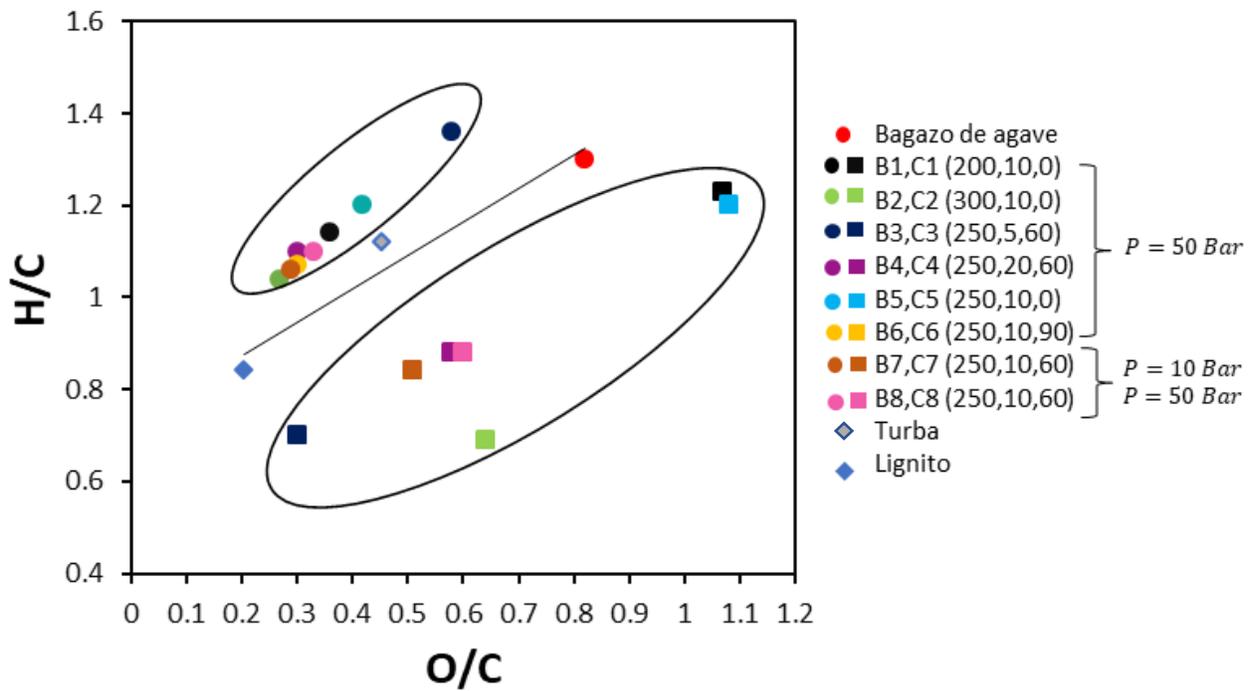


Figura 3.12: Diagrama de Van Krevelen para bagazo de agave, bioaceite y carbón.

La relación H/C y O/C para los carbones osciló entre 0.69-1.23 y 0.30-1.08, que fue significativamente menor que el bagazo de agave. El diagrama de Van Krevelen nos muestra que el carbón obtenido del procesamiento hidrotérmico solar presenta mejores características, tales como el %C, que otros carbones de bajo grado disponibles comercialmente (turba y lignito). Lo anterior se puede observar en la Figura 3.12 donde los carbones solares están por debajo de los puntos de la turba y el lignito. En el caso del bioaceite solar se puede apreciar que un incremento en la temperatura mejora las propiedades del crudo debido a que se tiene altos contenidos de carbono (%C) y bajos contenidos de oxígeno (%O). Lo anterior se debe a que en esas condiciones se favorecen las reacciones de deshidratación.

### 3.2.4. Microscopia electrónica de barrido del carbón (SEM)

En la Figura 3.13 se muestran las micrografías obtenidas por SEM del biocarbón obtenido después del procesamiento hidrotermal del bagazo de agave. De las cuatro muestras seleccionadas, tres cuentan con condiciones de operación similares variando únicamente la temperatura (a, b y c). Mientras que para el caso d) los parámetros que se manipularon fueron la concentración y el tiempo de residencia, manteniendo una temperatura de 250 °C y una presión inicial de 50 bar. En las cuatro micrografías se puede observar que cuentan con morfologías superficiales semejantes. En la superficie de la muestra b) se puede observar que se presenta una ligera porosidad mientras que en la figura c) y d) se aprecian barras de carbón a diferentes distancias; la sustancia cristalina que se observa en las micrografías corresponde a *Whewellita* ( $CaC_2O_4 \cdot H_2O$ ) especie mineral común en tejidos vegetales, ya que son productos del metabolismo celular, de reserva o de desecho que se acumulan. Se pueden observar diferentes tonalidades de gris, las tonalidades más oscuras pertenecen al carbón y las tonalidades más claras, casi blanquecinas, se refieren a la sal.

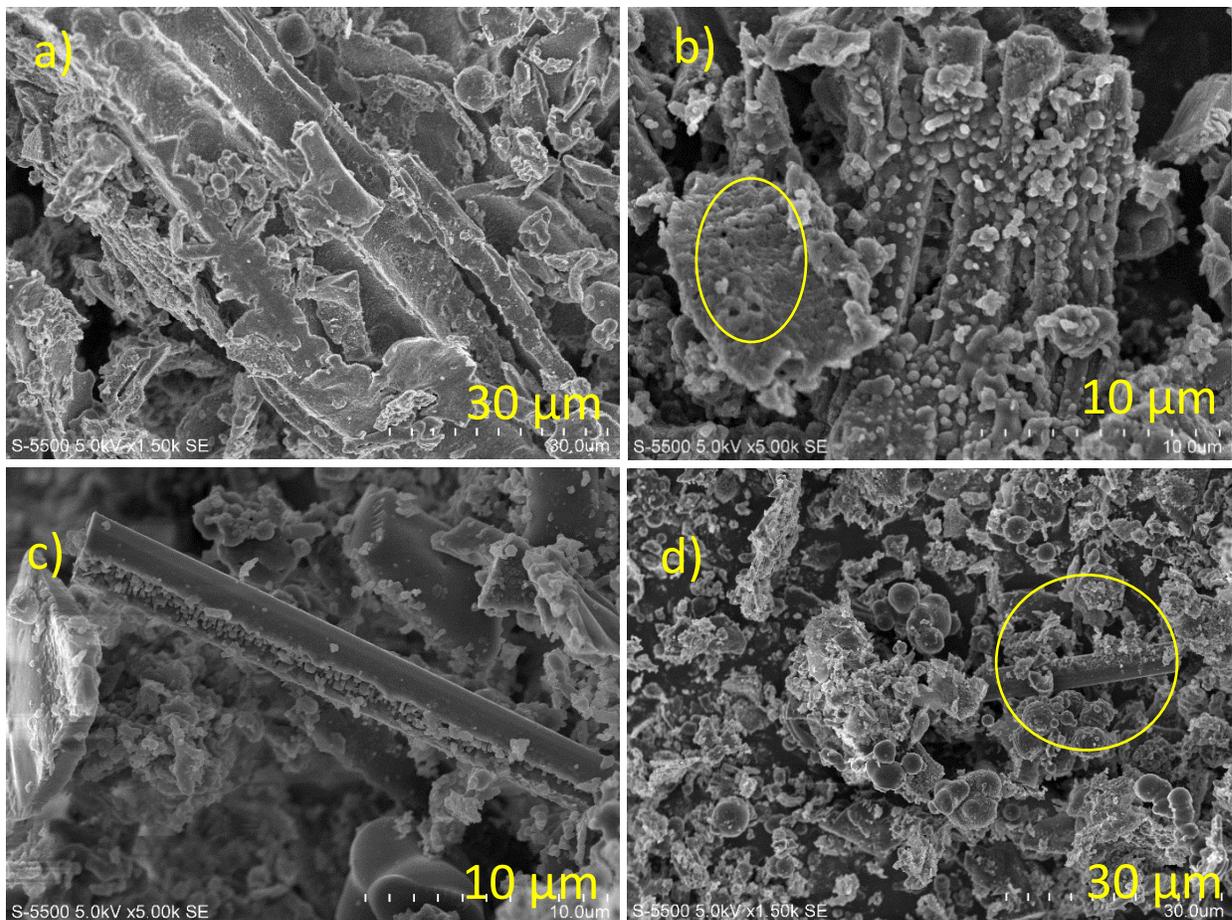


Figura 3.13: Micrografías de carbón a diferentes condiciones de operación: a) (300°C, 50bar, 10%w, 0min), b) (250°C, 50bar, 10%w, 0min), c) (200°C, 50bar, 10%w, 0min), d) (250°C, 50bar, 5%w, 60min) obtenidas con el microscopio electrónico de barrido MEB.

### 3.2.5. Poder calorífico

Las siguientes muestras se seleccionaron debido a las óptimas condiciones de operación con las que fueron obtenidas. La tabla 3.7 muestra los valores del poder calorífico obtenido con la ecuación (1) para bioaceites. Mientras que la tabla 3.8 representan una comparación del poder calorífico obtenido con el calorímetro y la ecuación (1) para los carbones.

**Tabla 3.7.** Poder calorífico de los bioaceites obtenidos a diferentes condiciones operacionales.

Muestra	T (°C)	Pi (bar)	Concentración (% w)	Tiempo de residencia (min)	a) Poder calorífico (MJ/kg)
B1	200	50	10	0	25.4
B2	300	50	10	0	28.3
B3	250	50	5	60	20.5
B4	250	50	20	60	26.3
B5	250	50	10	0	24
B6	250	50	10	90	27.3
B7	250	10	10	60	27.9
B8	250	50	10	60	26.3

a) Obtenido con la fórmula de Dulong modificada para combustibles líquido.

**Tabla 3.8.** Poder calorífico de los carbones obtenidos a diferentes condiciones operacionales

Muestra	T (°C)	Pi (bar)	Concentración (% w)	Tiempo de residencia (min)	a) Poder calorífico (MJ/kg)	b) Poder calorífico (MJ/kg)
C1	200	50	10	0	11.7	18.2
C2	300	50	10	0	17	25
C3	250	50	5	60	25.8	20.3
C4	250	50	20	60	18.9	23.9
C5	250	50	10	0	17.9	18.9
C6	250	50	10	90	20.4	20.6
C7	250	10	10	60	20.4	22.6
C8	250	50	10	60	18.9	23.2
*Turba	--	--	--	--	21.2	--
*Lignito	--	--	--	--	24.4	--

a) Obtenido con la fórmula de Dulong modificada para combustibles sólidos.

b) Obtenido con el calorímetro *Parr* modelo 6400.

\*Valores sacados de A. Mathanker, et al. (2020).

El poder calorífico es un parámetro importante en la caracterización de los biocarbones. El alto contenido de carbono contribuye a un poder calorífico elevado; sin embargo, el hidrógeno presente es el parámetro más importante ya que tiene el mayor poder calorífico entre los combustibles conocidos. Comparando las muestras de bioaceite B2 y B5 se puede observar que presentan las mismas condiciones de operación donde únicamente se modificó la temperatura; sin embargo, este parámetro dio como resultado valores caloríficos con una gran diferencia pasando de 24 MJ/kg a 28.3 MJ/kg. Para el caso de los experimentos B3 y B8 se muestra una disminución proporcional en el poder calorífico, es decir, mientras más disminuye la concentración también lo hace el poder calorífico. Caso contrario ocurre en los carbones ya que mientras más disminuye el porcentaje de biomasa más aumenta el poder calorífico tal y como se observa en los experimentos C3 y C4 de la Tabla 3.8.

## CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El propósito del presente trabajo fue la producción de aceite y carbón a partir de desperdicio de agave, utilizando un reactor solar prototipo cuyas características permitieron la reacción deseada. Las características de los productos se vieron afectadas significativamente en función de las principales condiciones de operación como temperatura, % de sólidos, tiempo de residencia y presión inicial.

Se determinó la composición química del bagazo de *Agave Angustifolia*. El contenido de lignina fue de 13.7%. el cual es menor a los reportados para otras especies de agave. Caso contrario para su contenido de cenizas que es de 11.05%, lo que indica que el bagazo de agave contiene un alto porcentaje de minerales en comparación con otros materiales lignocelulósicos.

El bioaceite de la muestra B2 en las condiciones de: 300 °C, 10 %W y 0 min de tiempo de residencia tuvo el %C más alto, es decir, 69% en peso, así como una relación atómica H/C y O/C de 1.04 y 0.27, respectivamente, dando como resultado a su vez el valor HHV más alto de 28.3 MJ/kg. Para el caso del carbón las mejores condiciones de operación fueron para la muestra C3 donde: 250 °C, 5 %W y 60 min, ya que se obtuvo un 68% en peso de carbono, mientras que el porcentaje de hidrógeno y oxígeno disminuyeron hasta 4% y 28% de forma respectiva. El aumento en el contenido de carbono puede deberse a la deshidratación y descarboxilación, las cuales son reacciones que ocurren durante el proceso hidrotermal para la transformación del bagazo de agave a carbón. Las relaciones atómicas H/C de 0.70 y O/C de 0.30 con un valor HHV de 25.8 MJ/kg demuestra que es comparativamente mayor que la turba y el lignito.

Se hacen las siguientes recomendaciones para futuros trabajos derivados de esta tesis:

- Se necesita de un estudio más detallado para conocer la composición del bioaceite y evaluar su estabilidad, así como para mejorar la calidad del mismo. Aunado a esto, se deben buscar alternativas para la manipulación

del bioaceite en ciertos equipos, tal es el caso del calorímetro ya que su poder calorífico no pudo ser evaluado por sus características físicas.

- Analizar el área superficial de los biocarbones para conocer su uso como absorbente o fertilizante, ya que las micrografías presentadas en la presente tesis solo muestran las morfologías superficiales, pero no los valores del área específica y el diámetro de poro.
- Se requiere de ciertas modificaciones en el reactor para obtener temperaturas más homogéneas.

## REFERENCIAS

- Abril, A., & Navarro, E. (2012), *Etanol a partir de biomasa lignocelulósica*.
- Abreu Sherrer, J. S., (2013), *Aprovechamiento de bagazo de Agave tequilana Weber para la producción de bio-hidrógeno*. Tesis de maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT).
- Akhtar, J. & Amin, N. A. S. (2011), 'A review on process conditions for optimum bio-oil yield in hydrothermal liquefaction of biomass', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(3), pp: 1615–1624.
- Alfaro R.G., Legaria SJP., Rodríguez PJE. (2007), *Diversidad genética en poblaciones de agaves pulqueros (Agave spp.) del nororiente del Estado de México*. Revista Fitotecnia Mexicana.
- Álvarez, C. (2009), 'Biofuels: historical and technological development, current markets, and international trade', pp: 63-65.
- Amin, S. (2009), 'Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae', *Energy conversion and management* 50(7), pp: 1834–1840.
- Arancibia Bulnes, C. & Best y Brown, R. (2010), 'Energía del sol', *Ciencia - Academia Mexicana de Ciencias* 61(2), pp: 10-17.
- Ayala-Cortés, A., Lobato-Peralta, D. R., Arreola-Ramos, C. E., Martínez-Casillas, D. C., Pacheco-Catalán, D. E., Cuentas-Gallegos, A. K., Arancibia-Bulnes, C. A. & Villafán-Vidales, H. I. (2019), 'Exploring the influence of solar pyrolysis operation parameters on characteristics of carbon materials', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 140, pp:290–298.
- Balam-Cocom, R. J.; Duarte-Aranda, S.; Canché-Escamilla, G. (2006) 'Obtención y caracterización de materiales compuestos de fibras de la "piña" de henequén y polipropileno' Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa Distrito Federal, México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 5, pp: 39-44.
- Baloch H. A., Sabzoi Nizamuddin, M.T.H. Siddiqui, Sajid Riaz, Abdul Sattar Jatoi, Deepa K. Dumbre, N.M. Mubarak, M.P. Srinivasan, G.J. Griffin, (2018) 'Recent advances in production and upgrading of bio-oil from biomass: A critical overview', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 6, Issue 4, pp: 5101-5118.

- Barreiro, D. L., Prins, W., Ronsse, F., & Brilman, W. (2013), 'Hydrothermal liquefaction (htl) of microalgae for biofuel production: state of the art review and future prospects', *Biomass and Bioenergy* 53, pp: 113–127.
- Barroso Casillas, M. (2010), Pretratamiento de biomasa celulósica para la obtención de etanol en el marco de una biorrefinería. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica forestal, Universidad politécnica de Madrid, pp: 11-13.
- Bautista JM, García OL, Barboza CJE, Parra NLA. 2001. El Agave tequilana Weber y la producción de tequila. *Acta Universitaria*, vol. 11, núm. 2, pp: 26-29.
- Bilbao, J., De Miguel, A., Pérez-Burgos, A., Román, R. (2008). *Energía Solar Térmica y Aplicaciones en la Edificación*.
- Brown, TM, Duan, P. y Savage, PE (2010). Licuefacción hidrotermal y gasificación de *Nannochloropsis* sp. *Energía y combustibles* 24 (6), pp: 3639-3646.
- Camarillo, H. I. G., & Rábago, D. C. A. P. (2018), 'Desarrollo de un Concentrador Anidólico tipo Horno Solar para la Caracterización de Celdas Fotovoltaicas con Concentración Solar', Trabajo de Grado de Maestría, Instituto de energías renovables, Universidad Nacional Autónoma de México. Temixco, Morelos.
- Cedeño, C.M. 1995 Tequila production. *Crit. Rev. Biotchno* 15 (1), pp: 1-1.
- Demirbas, A. (2009a), 'Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review', *Applied energy* 86, pp: S108–S117.
- Demirbas, M. F. (2009b), 'Biorefineries for biofuel upgrading: a critical review', *Applied Energy* 86, pp: 151–161.
- Durán, M. E. (2014), 'Reactores de lecho fluidizado y lecho burbujeante en la gasificación de biomasa residual', *Revista Fuentes: El Reventón Energético* Vol. 12 N° 2, pp: 35-43.
- Ellabban, O., Abu-Rubb, H., Blaabjerg, F. (2014), 'Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39, pp: 748–764.
- Flores Ríos P., A. (2009), Compostaje de dos materiales de bagazo de maguey tequilero (*Agave tequilana* Weber) y su determinación física y fisicoquímica. Centro interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional unidad Oaxaca. Instituto Politécnico Nacional.
- García Alba L, Torri C, Samori C, van der Spek J, Fabbri D, Kersten SRA, et al. Hydrothermal treatment (HTT) of microalgae: evaluation of the process as

conversion method in an algae biorefinery concept. *Energ Fuel* 2012; 26(1), pp: 642-657.

- Gurrola Armendáriz, D. L. (2016), *Aprovechamiento integral del bagazo de agave mezcalero cocido para su uso en la agricultura y ganadería* (Doctoral dissertation).
- Hosokai, S., Matsuoka, K., Kuramoto, K., & Suzuki, Y. (2016). Modification of Dulong's formula to estimate heating value of gas, liquid and solid fuels. *Fuel Processing Technology*, 152, pp: 399-405.
- Huang, H.-j. & Yuan, X.-z. (2015), 'Recent progress in the direct liquefaction of typical biomass', *Progress in Energy and Combustion Science* 49, pp: 59–80.
- Kambo, H., Dutta, A. (2015), 'A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45, pp: 359-378.
- Kan, T., Strezov, V. et al. (2014), Hydrothermal processing of biomass, in 'Biomass Processing Technologies', CRC Press, pp: 168–189.
- Klug, M. (2012), 'Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa', *Revista de Química PUCP*, vol. 26, pp: 1-2.
- Liang L, Mao Z, Li Y, Wan C, Wang T, Zhang L. Liquefaction of crop residues for polyol production. *BioResources* 2006; 1: 248–56.
- Licurgo-Pedraza, J. (2012), *Diseño, construcción y puesta de operación de una pantalla lambertina para el horno solar de alto flujo radiactivo*.
- Manjarrez Nevárez, L. A. (2007), 'Síntesis de carbón activo a partir de Bagazo de Agave Tequilana Weber Var. Azul y su caracterización superficial y funcional'. Centro de investigación en materiales avanzados, S.C. Chihuahua, México.
- Moragues, J. A., Rapallini, A. T. (2003), 'Energía de la BIOMASA', *Energías renovables*, pp: 18-21.
- Ponce Ballester, E. (2012), 'El proceso de carbonización hidrotermal aplicado a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos', Trabajo de Grado de Maestría en Química Sostenible, Universidad politécnica de Valencia. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Valencia, España.
- Remón J., Latorre J., Pinilla J. L., Suelves I. (2019), 'Producción de bio-combustibles y productos de valor añadido mediante licuefacción hidrotermal de pericarpios de almendra', *Jornadas Nacionales de Ingeniería Química*, Instituto de Carboquímica (ICB). Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Zaragoza, España.

- Riveros-Rosas, D., Herrera-Vazquez, J., Perez-Rabago, C., Arancibia-Bulnes, C., Vazquez-Montiel, S., Sanchez-Gonzales, M., Granados-Agustin, F., Jaramillo, O., & Estrada, C. (2010), Optical desing of a high radiative flux solar furnace for mexico, *Solar Energy* 84(5), pp: 792-800.
- Romero Salvador, A. (2010), Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. XII Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica. *Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)* Vol. 104, Nº. 2, pp: 331-345.
- Romero M. & Steinfeld A. (2012), Concentrating solar thermal power and thermochemical fuels. *Energy Environ. Vol. 5, Nº. 11*, pp: 9234-9245.
- Sánchez Riaño, A., Gutiérrez Morales, A. I., & Muñoz Hernández, J. A. (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. *Revista Tumbaga*, 61-90.
- Secretaría de Energía. (2008), 'Energías Renovables-Energía Biomasa'. República Argentina.: Autor.
- Tekin, K., Karagöz, S. & Bektas, S. (2014), 'A review of hydrothermal biomass processing', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40, pp: 673–687.
- Toor, S. S., Rosendahl, L. & Rudolf, A. (2011), 'Hydrothermal liquefaction of biomass: a review of subcritical water technologies', *Energy* 36(5), pp: 2328–2342.
- Vardon, D. R., Sharma, B. K., Blazina, G. V., Rajagopalan, K. & Strathmann, T. J. (2012), 'Thermochemical conversion of raw and defatted algal biomass via hydrothermal liquefaction and slow pyrolysis', *Bioresource Technology* 109, pp: 178–187.
- Vázquez-García, J. A.; Cházaro, B. M. de J.; Hernández, V. G.; Vargas-Rodríguez Y. L. y Zamora, T. Ma. del P. 2007. Taxonomía del género Agave en el Occidente de México: una panorámica preliminar. In: Vázquez-García, M. J.; Cházaro, G.; Hernández, V. E.; Flores, and Vargas-Rodríguez Y. L. (Ed.) *Los Agaves del Occidente de México*. (Ed.) by J. A. Universidad de Guadalajara CUCBA-CUCSH, México.
- Xue, Y., Chen, H., Zhao, W., Yang, C., Ma, P., & Han, S. (2016). A review on the operating conditions of producing bio-oil from hydrothermal liquefaction of biomass. *International Journal of Energy Research*, 40(7), 865-877.
- Zhang, L., Xu, C. C. & Champagne, P. (2010), 'Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass', *Energy Conversion and Management*, pp: 969–982.

## REFERENCIAS EN INTERNET

- Barrientos Rivera, G., Esparza Ibarra, E., Segura Pacheco, H., Talavera Mendoza, O., Sampedro Rosas, M., & Hernández Castro, E. (2019). Caracterización morfológica de *Agave angustifolia* y su conservación en Guerrero, México. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 10(3), pp: 655-668. [fecha de Consulta 17 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1554>
- Energías renovables. (s.f) [fecha de Consulta 02/03/2021]. Disponible en: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-energia-solar/>
- González García, Yolanda, & González Reynoso, Orfil, & Nungaray Arellano, Jesús (2005). Potencial del bagazo de *Agave tequilero* para la producción de biopolímeros y carbohidrasas por bacterias celulolíticas y para la obtención de compuestos fenólicos. *e-Gnosis*, (3),0. [fecha de Consulta 13 de enero de 2022]. ISSN: Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73000314>
- Kuchelmeister, C., Bauer, S. (2015), Rapid Small-Scale Determination of Extractives in Biomass. *Bioenerg. Res.* 8, pp: 68–76 [fecha de Consulta 13 de enero de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12155-014-9493-x>
- Lucas Herguedas, A.I. & Del Peso Taranco C. (Sin fecha), *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad: Materias Primas*. Ministerio de educación, cultura y deporte. España: Fondo Social Europeo. [fecha de Consulta 07 de enero de 2021. Disponible en: <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>
- Martín Esqueda Valle M., Coronado Andrade M. L., Gutiérrez Saldaña A. H., Fragoso Gadea T. (Sin fecha), 'Agave angustifolia Haw. Técnicas para el trasplante de vitroplantas a condiciones de agostadero'. [fecha de Consulta 07 de enero de 2021. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/168835/Agave\\_angustifolia\\_Haw.\\_Tcnicas\\_para\\_el\\_Transplante\\_de\\_Vitroplantas\\_a\\_Condiciones\\_de\\_Agostadero.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/168835/Agave_angustifolia_Haw._Tcnicas_para_el_Transplante_de_Vitroplantas_a_Condiciones_de_Agostadero.pdf)
- Rojas Gonzalez, A. F., & Flórez Montes, C. (2019). Valorización de residuos de frutas para combustión y pirólisis. *Revista Politécnica*, 15(28), 42-53. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v15n28a4>
- Salinas Callejas, E. & Gasca Quezada, V. (2009), Los biocombustibles. *El Cotidiano*, (157),75-82. [fecha de Consulta 12 de octubre de 2020]. ISSN: 0186-1840.

Disponible en: <https://biblat.unam.mx/es/revista/el-cotidiano/articulo/los-biocombustibles>

Sedigas, (2013), Guía sobre aplicaciones de la energía solar térmica. [Libro electrónico]. Asociación Española del Gas. Obtenido de: [http://www.sedigas.es/dochome/Guia\\_solar\\_Sedigas.pdf](http://www.sedigas.es/dochome/Guia_solar_Sedigas.pdf)

Torres, R. R., & Montero, A. G. (2015). Lignina obtenida de residuos agrícolas como biocombustible de tercera generación. [fecha de Consulta 11 de enero de 2021] Disponible en de Ciencia y Tecnología: <file:///C:/Users/hp/Downloads/caña%20de%20maiz/DialnetLigninaObtenidaDeResiduosAgricolasComoBiocombutibl-5762658.pdf>

## TABLAS Y ANEXOS

Poder calorífico de los carbones a diferentes condiciones obtenido del calorímetro Parr

Fecha de la muestra	Nombre en el calorímetro	T (°C)	Pi (bar)	Concentración	Residencia (min)	Peso (g)	Poder calorífico (MJ/Kg)
14-ene-20	BIO14171	250	10	10%	60	0.25	23.30
20-ene-20	BIO20173	250	14	10%	60	0.25	24.18
27-ene-20	BIO20175	400	10	10%	0	0.25	24.15
29-ene-20	BIO20178	281	30	10%	0	0.25	23.13
31-ene-20	BIO20211	250	11	10%	60	0.25	21.26
03-feb-20	BIO20183	250	11	10%	60	0.25	20.70
04-feb-20	BIO20184	291	34	10%	0	0.25	23.27
07-feb-20	BIO20185	291	76	10%	0	0.25	26.67
10-feb-20	BIO20187	250	116	10%	60	0.25	23.42
11-feb-20	BIO20189	297	117	10%	0	0.25	21.75
12-feb-20	BIO20190	250	50	10%	90	0.25	21.42
13-feb-20	BIO20195	250	50	10%	30	0.25	20.59
14-feb-20	BIO20193	215	50	10%	0	0.25	18.19
17-feb-20	BIO20209	250	50	10%	0	0.25	18.94
18-feb-20	BIO20197	250	50	20%	60	0.25	23.92
19-feb-20	BIO20199	250	50	15%	60	0.25	21.92
20-feb-20	BIO20212	250	50	5%	60	0.25	20.31
01-oct-20	BIO20218	180	50	10%	0	0.25	16.46
05-oct-20	BIO20201	250	50	10%	60	0.25	20.88
0-oct-20	BIO20204	250	50	10%	60	0.25	21.92
07-oct-20	BIO20203	250	50	10%	90	0.25	24.24
13-oct-20	BIO20205	250	50	20%	60	0.25	22.99
14-oct-20	BIO20214	300	50	10%	60	0.25	24.86
15-oct-20	BIO20207	300	50	10%	0	0.25	21.16
22-oct-20	BIO20217	200	50	10%	0	0.25	15.77
23-oct-20	BIO20220	150	50	10%	0	0.25	16.15
26-oct-20	BIO20215	250	30	10%	60	0.25	23.26
23-nov-20	BIO20221	250	10	10%	60	0.25	22.66
25-nov-20	BIO20222	300	50	10%	0	0.25	25.08