

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA BIORREFINERÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE  
HIDRÓGENO**

**OSCAR ANDRÉS VÁSQUEZ GARZÓN**

**Proyecto integral para optar al título de  
INGENIERO QUIMICO**

**Director:**

**Orlando Castiblanco Urrego**

**Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BOGOTÁ**

**2023**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

---

Nombre

Firma del director

Nombre

Firma del Presidente Jurado

---

Nombre

Firma del Jurado

---

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá D.C. agosto 2023

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA PEÑA

Vicerrector Académico de Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretario General

Dr. JOSÉ LUIS MACIAS RODRÍGUEZ

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO

Directora de programa de Ingeniería Industrial

Dra. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN</b>	<b>12</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>13</b>
<b>OBJETIVO</b>	<b>16</b>
<b>1. MARCO LEGAL</b>	<b>17</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Proyección del hidrogeno como vector de energía</b>	<b>18</b>
<i>2.1.1 Oferta del hidrógeno</i>	<b>18</b>
<i>2.1.2 Demanda de hidrógeno</i>	<b>24</b>
<b>2.2 Biorrefinerías</b>	<b>30</b>
<i>2.2.1 Biorrefinerías de fase I</i>	<b>31</b>
<i>2.2.2 Biorrefinerías de fase II</i>	<b>32</b>
<i>2.2.3 Biorrefinerías de fase III</i>	<b>32</b>
<b>2.3 Cultivos de Maíz en Colombia como fuente de biomasa para la producción de hidrógeno en Colombia</b>	<b>33</b>
<b>2.4 Caracterización Biomasa lignocelulósica</b>	<b>45</b>
<b>2.5 Propiedades</b>	<b>47</b>
<i>2.5.1 Propiedades físicas</i>	<b>47</b>
<b>2.6 Propiedades termofísicas</b>	<b>49</b>
<b>2.7 Biomasa lignocelulósica del maíz</b>	<b>51</b>
<b>2.8 Estructura de la biomasa lignocelulósica</b>	<b>60</b>
<i>2.8.1 Celulosa</i>	<b>61</b>
<i>2.8.2 Hemicelulosa</i>	<b>62</b>
<i>2.8.3 Lignina</i>	<b>67</b>

2.8.4	<i>Extractivas</i>	67
2.9	Pretratamientos biológicos	72
2.10	Fermentación oscura	84
3.	TRANSPORTE DE HIDROGENO CON GAS NATURAL	91
4.	DISEÑO CONCEPTUAL	93
4.1	Capacidad de producción y tipo de proceso	96
5.	ANÁLISIS FINANCIERO	128
5.1	Inversiones	128
5.1.1	<i>Inversiones fijas</i>	128
6.	CONCLUSIONES	135
	BIBLIOGRAFÍA	136
	GLOSARIO	145
	ANEXOS	146

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Diferencia de costes entre métodos de obtención</i>	19
Figura 2 <i>Capacidad de producción de hidrógeno en diferentes regiones del mundo</i>	21
Figura 3 <i>Producción de hidrógeno gris y azul a partir de gas natural y carbón</i>	22
Figura 4 <i>Separación de Colombia por zonas de recurso renovable</i>	23
Figura 5 <i>Trayectorias de competitividad de costes de las aplicaciones del hidrógeno</i>	27
Figura 6 <i>Aplicaciones actuales y futuras del hidrógeno</i>	28
Figura 7 <i>Desarrollo de las aplicaciones del hidrógeno de bajas emisiones en Colombia</i>	29
Figura 8 <i>Proceso de la refinería</i>	30
Figura 9 <i>Proceso de la biorrefinería</i>	31
Figura 10 <i>Concepto de una biorrefinería fase 1</i>	32
Figura 11 <i>Principales productores de maíz en el mundo</i>	34
Figura 12 <i>Los cinco motores del plan maíz para Colombia</i>	36
Figura 13 <i>Variedades de maíz en la región Caribe</i>	37
Figura 14 <i>Variedades de maíz en Antioquia</i>	39
Figura 15 <i>Variedades de maíz en la Región Andina Central</i>	40
Figura 16 <i>Variedades de maíz en la Región Pacífica</i>	41
Figura 17 <i>Variedades de maíz en la Región Andina Sur</i>	42
Figura 18 <i>Variedades de maíz en la Región Andina nororiental</i>	43
Figura 19 <i>Representación de métodos de conversión para la Biomasa</i>	51
Figura 20 <i>Partes del rastrojo de maíz</i>	54
Figura 21 <i>Estructura de la cadena molecular de la celulosa</i>	62
Figura 22 <i>Representación de Hawort de las principales hexosas presentes en las hemicelulosas</i>	63
Figura 23 <i>Representación de Hawort de las principales hexosas presentes en las hemicelulosas</i>	64
Figura 24 <i>Enlaces que componen la hemicelulosa</i>	65
Figura 25 <i>Estructura de la hemicelulosa</i>	66
Figura 26 <i>Estructura de la biomasa lignocelulósica</i>	68

Figura 27 <i>Estructura de la pared celular</i>	70
Figura 28 <i>Ciclos catalíticos de las enzimas peroxidases (LiP y MnP)</i>	75
Figura 29 <i>Ciclo catalítico</i>	76
Figura 30 <i>Sistema de degradación de los hongos</i>	77
Figura 31 <i>Radicales formados por la acción de la MnP</i>	78
Figura 32 <i>Oxidación de alcohol veratrílico</i>	79
Figura 33 <i>Catalización por la enzima Lacasa</i>	80
Figura 34 <i>Paso a paso de la glucólisis por fermentación oscura</i>	85
Figura 35 <i>Reactor UASB</i>	90
Figura 36 <i>Rosa de los vientos municipio del Espinal</i>	94
Figura 37 <i>Ubicación del municipio de Espinal</i>	95
Figura 38 <i>Mecanismo de difusión en metales densos</i>	120
Figura 39 <i>Poros de la membrana de zeolita</i>	122
Figura 40 <i>Diagrama PI&amp;D de la planta</i>	126
Figura 41 <i>Diagrama de la planta</i>	127

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Rendimientos de maíz 2017-2018 en Colombia</i>	45
Tabla 2 <i>Análisis base seca base húmeda</i>	53
Tabla 3 <i>Composición química de las fracciones de rastrojo de maíz</i>	55
Tabla 4 <i>Cantidad de residuo respecto al producto</i>	57
Tabla 5 <i>Propiedades físicas de la biomasa triturada</i>	58
Tabla 6 <i>Densidad aparente, el poder calorífico y el contenido de cenizas del rastrojo de maíz</i>	59
Tabla 7 <i>Composición física del rastrojo de maíz</i>	60
Tabla 8 <i>Composición del rastrojo de maíz</i>	60
Tabla 9 <i>Propiedades estructurales y funcionales de las celulasas</i>	71
Tabla 10 <i>Rendimiento y Áreas sembrada de maíz por municipio</i>	93
Tabla 11 <i>Composición de salida en la molienda</i>	98
Tabla 12 <i>Composición en peso de salida en la molienda</i>	98
Tabla 13 <i>Composición de la entrada en la molienda</i>	99
Tabla 14 <i>Escalamiento de la entrada y salida de la molienda</i>	100
Tabla 15 <i>Enzimas y su actividad</i>	106
Tabla 16 <i>Composición de entrada en el pretratamiento</i>	108
Tabla 17 <i>Capacidades caloríficas de los compuestos del pretratamiento</i>	110
Tabla 18 <i>Capacidades caloríficas de las biomosas utilizadas</i>	112
Tabla 19 <i>Composición de entrada al proceso SBS</i>	113
Tabla 20 <i>Condiciones ideales</i>	115
Tabla 21 <i>Medio de inoculación</i>	116
Tabla 22 <i>Concentración en flujos</i>	117
Tabla 23 <i>Índice de precios actuales</i>	129
Tabla 24 <i>Costo de equipos</i>	129
Tabla 25 <i>Costo m<sup>2</sup> terreno</i>	130
Tabla 26 <i>Gasto Intangibles</i>	131
Tabla 27 <i>Costo materia prima</i>	131
Tabla 28 <i>Costo mano de obra directa</i>	133

Tabla 29 <i>Costo mano de obra indirecta</i>	133
Tabla 30 <i>Costos servicios públicos</i>	134
Tabla 31 <i>Cálculo de la totalidad del costo</i>	134

## ABREVIATURAS

- APPL: lignina polimérica precipitable en ácido
- D y P: peroxidasas que decoloran el tinte
- LiP: Lignina peroxidasa
- MnP: Peroxidasa de Magnesio ( $Mn^{2+}$ ;  $Mn^{3+}$ )
- $H_2O_2$ : Peróxido de hidrógeno
- ADNc: ADN complementario
- KDa: Kilo daltons

## **RESUMEN**

A partir de un estudio bibliográfico profundo se estudia la producción de hidrogeno como combustible sostenible y las posibles soluciones que podría dar a nivel medio ambiental y de sostenibilidad, se estudian las políticas a nivel global y local además de ello se investigaron las proyecciones y metas que se tienen a nivel mundial para el desarrollo de la industria, se revisaron los diferentes tipos de maíz que existen en Colombia y los diferentes factores que afectan la producción de hidrogeno a partir de dicha biomasa como lo son el tamaño de partícula, cantidad de humedad, contenido de material volátil, contenido de cenizas, sorción de humedad, fluidez, densidad aparente y densidad de partículas entre otras. Se realizo un análisis de los diferentes pretratamientos ya sean químicos, biológicos o físicos esto con el fin de que la lignina que es el compuesto más recalcitrante y por lo tanto el que menos permite la obtención de los azucres fermentables afecte la obtención de los mismos, así mismo se hizo un estudio de los diferentes tipos de producción de hidrogeno entre ellosla más productiva la cual es la fermentación oscura ya que genera un buena rentabilidad teniendo en cuenta los gastos y las ganancias.

Se hizo un análisis conceptual basado en artículos científicos los cuales nos dan bases para la investigación de una planta de hidrogeno verde sostenible teniendo en cuenta que los métodos biológicos como pretratamiento son el centro de la investigación.

El análisis conceptual no solamente tomo en cuenta las diferentes unidades para el desarrollo óptimo del pretratamiento y la producción del hidrogeno, si no también de las diversas formas de separación para la obtención de forma pura de nuestro producto de interés el cual es el hidrogeno.

### **Palabras clave**

Biomasa, Desarrollo ambiental, combustibles, sostenibilidad, hidrogeno, maíz, biomasa, hongos, bacterias, pretratamiento, biológico.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diferentes formas de producir hidrógeno. Según el investigador Antonio Pino Priego el hidrogeno es un elemento diatómico el cual es bastante difícil de conseguir por sí solo, normalmente se consigue ver en componentes químicos como el agua o los hidrocarburos, actualmente existen tres fuentes principales. La primera fuente proviene de la energía nuclear y la materia prima de esta fuente es el calor. El segundo método es a través de recursos no renovables/limitados donde las materias primas son gas natural, petróleo y carbón. Por último, la tercera fuente de obtención de hidrógeno proviene de las energías renovables donde las formas de obtención pueden ser a partir de la energía solar, energía Eólica, energía hidráulica, energía geotérmica y biomasa [9].

Para el primer método, según el investigador Yildiz Bilge la energía nuclear se utiliza como fuente primaria en la producción de hidrógeno a través de procesos termoquímicos de alta temperatura, ya sea electrólisis de agua o electrólisis de vapor de alta temperatura, algunas de las metas en una planta de este tipo es lograr una alta eficiencia de conversión de energía térmica a eléctrica lo cual ayuda a la eficiencia, por lo tanto, a la economía sobre todo por el hidrógeno electroquímico [10].

Para el segundo método, según el investigador Javier Dufour el reformado con vapor de hidrocarburos como el metano, la gasificación del carbón o fracción de petróleo pesado y electrólisis de agua son las principales formas de obtención del Hidrógeno, las cuales son insostenibles no solo económicamente ya que consume demasiada energía, pero además, ambientalmente también es inviable debido a la emisión de gases de efecto invernadero [11].

Para el último método, según el investigador Gheorghe Badea una forma de producir hidrógeno es por medio de la energía solar que permite la electrólisis del agua [12]. Para la energía eólica, según el investigador Honnery Damon, se estima que con una turbina se alcanza a obtener 2 MW/km<sup>2</sup>, con lo que se puede obtener hidrógeno mediante electrólisis a baja presión y transmitirse a través de gasoductos de alta presión [13]. Para la energía geotérmica, según el investigador Ghazvini Mahyar, se puede obtener hidrógeno mediante electrólisis [14].

Para el investigador Seyed Ehsan Hosseini hay diferentes formas de aprovechar la biomasa para la producción de hidrógeno, algunas de ellas son la biofotólisis, la foto fermentación y por último la fermentación oscura, estos métodos han mostrado tener un gran potencial para ser un sustituto de los combustibles fósiles. El proceso de fermentación oscura tiene un futuro prometedor, ya que

es un método simple que utiliza una gran variedad de sustratos y no requiere luz como fuente de energía [15].

“Los residuos agrícolas han sido estudiados a nivel mundial desde hace más de 60 años y la investigación sobre este tema ha cobrado mayor relevancia desde 1998” [16]. “Sin embargo, en los últimos 13 años se ha generado más del 60% de la producción científica, algunos de los países con mayor número de estudios son Estados Unidos, India y China, cuyo eje central ha sido el uso y explotación de residuos agrícolas, derivados de cultivos de cereales, principalmente de trigo y maíz, ya que son los principales productores de este tipo de cultivos” [16].

“Durante la segunda guerra mundial (1939-1945), cobró importancia la necesidad de mejorar la producción y distribución de alimentos, con el fin de garantizar la adecuada nutrición y salud de las personas del mundo” [16]. “Las proyecciones futuras predicen un mayor crecimiento en la producción agrícola, donde los propósitos finales no solo se limitan a los alimentos para la población mundial” [16]. “El rápido crecimiento de la producción de bioenergía a partir de biocombustibles es un ejemplo de la diversificación de cultivos agrícolas en los últimos años, especialmente aquellos cultivos con altos contenidos de almidón y celulosa. Por ejemplo, el almidón de cereales, derivado principalmente del maíz y el trigo, se utiliza principalmente como materia prima para producir etanol. Los desechos vegetales agrícolas, conocidos como biomasa, tienen un potencial importante para producir energía sostenible a partir de combustibles renovables” [16].

En diferentes estudios se ha realizado el análisis de la utilización del maíz como materia prima, un ejemplo de ellos es el artículo realizado por el investigador Hernán Darío Castaño Castrillón, donde se desarrolla un análisis con base a la reincorporación de los residuos asociados al maíz para el desarrollo de papel/cartón [17], otro usos como “los ramnolípidos, los cuales se definen predominantemente por la presencia de restos de azúcar ramnosa y cadenas de ácidos que contienen varias longitudes de carbono” [18]. Los ramnolípidos ya “se utilizan en varias áreas de aplicación, incluidas las industrias medioambiental, sanitaria, alimentaria, cosmética y petrolera, son candidatos atractivos para sustituir a los tensoactivos sintetizados químicamente porque se derivan de una fuente natural de alta pureza y tienen bajos niveles de toxicidad” [17].

La biorefinación lignocelulósica procesa la biomasa de origen vegetal en una gama de bio productos [13]. Según la investigadora Shady S. Hassan, existe un flujo de trabajo para las

biorrefinerías. El primer paso para este flujo de trabajo es saber qué biomasa lignocelulósica se va a utilizar como materia prima, residuos derivados de la silvicultura, de la agricultura hasta residuos agroindustriales. Algunos desafíos en este proceso son la marcada descentralización de fuentes, las fluctuaciones de calidad y cantidad, además de la humedad del material; dependiendo la cantidad de humedad se utiliza el secado, sobre todo si se utilizan residuos agroindustriales los cuales contienen un alto nivel de humedad, estos procesos pueden ser naturales o por calentamiento convencional. Otro factor importante es la eficiencia del transporte, ya que entre más cerca esté el área de recolección el proceso es más viable económicamente, el almacenamiento varía entre la cantidad y la disponibilidad estacional de los residuos agrícolas o desechos agroindustriales [13]. En las biorrefinerías, como ya se había mencionado, existen diferentes tipos de materias primas, cuando se trata de biomasa lignocelulósica la cual “es una matriz compleja que es relativamente refractaria a la degradación. Los azúcares están encerrados en una estructura recalcitrante que requiere un paso de pretratamiento para liberarlos. Actualmente se utilizan muchos métodos convencionales” [13] como tratamientos biológicos, químicos, fisicoquímicos y físicos. “Los métodos biológicos para la producción de hidrógeno se pueden clasificar según la disposición de las etapas de pretratamiento, hidrólisis y fermentación, que se pueden realizar simultáneamente en el mismo reactor o secuencialmente en recipientes separados” [19]. Según la investigadora Monika Yadav, los tres enfoques para la producción de hidrógeno a partir de biomasa lignocelulósica son la hidrólisis y fermentación separadas (SHF), sacarificación y fermentación simultáneas (SSF) y bio procesamiento consolidado (CBP) [19].

El hidrógeno producido se puede utilizar como vector de energía, insumo en procesos de fabricación/refinación de petróleo, y materia prima para procesos químicos, hidrogenación de grasas, productos nitrogenados (amoníaco y urea), etc [20]

## **OBJETIVO**

### **Objetivo general**

Analizar los diferentes pretratamientos y procesos biológicos utilizados para la producción de biohidrógeno desde la biomasa lignocelulósica residual del maíz.

### **Objetivos específicos**

1. Definir las características del pretratamiento respecto a los hongos y bacterias estudiadas.
2. Examinar el efecto del pretratamiento en la producción de hidrógeno.
3. Diseñar conceptualmente la producción de hidrógeno partiendo de la biomasa lignocelulósica.
4. Determinar la viabilidad económica del proceso.

## **1. MARCO LEGAL**

En Colombia aún existe poca regulación para la producción y regulación del mercado del hidrógeno verde o azul; sin embargo; la ley 2099 de 2021 fue modificada y aprobada el 10 de julio de 2021, [16] dicha modificación tiene por objeto modernizar las disposiciones para la transición y dinamizar el mercado energético. [14]

La ley 1715 de 2021 tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía a través del beneficio tributario en el cual tiene derecho a deducir hasta un 50% del valor de las inversiones; sin embargo; el valor a deducir anualmente no puede ser superior al 50% de la renta líquida del contribuyente, también tiene derecho a la exención del pago de los derechos arancelarios de importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos destinados exclusivamente para labores de pre inversión y de inversión de proyectos con FNCE.[15]

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Proyección del hidrógeno como vector de energía

El hidrógeno es el principal objetivo en materia energética y de descarbonización de la economía, para lograr dicho objetivo se hace importante estudiar el desarrollo del mercado del hidrógeno ya que con dicho desarrollo se puede facilitar el mejoramiento tecnológico e industrial, ello incluye nuevas tecnologías de producción, transporte y almacenamiento. [17]

#### 2.1.1 Oferta del hidrógeno

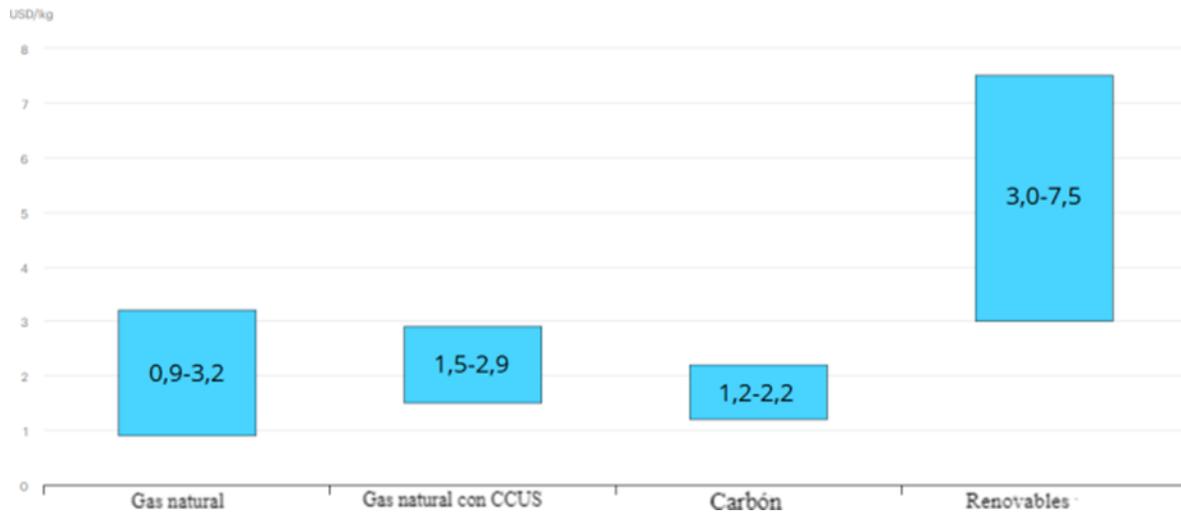
En [17] Alrededor del 95% del hidrógeno se produce a partir de combustibles fósiles es decir, a partir de gas natural (48%), petróleo (30%) y carbón (18%), la producción de “hidrógeno verde”(a partir de recursos 100% renovables) e “hidrógeno azul” (hidrógeno gris con captura, almacenamiento y uso del CO<sub>2</sub>) es testimonial en la actualidad y se limita a proyectos de demostración de pequeño tamaño debido a su alto precio, actualmente se estima que la producción de hidrógeno azul tiene un coste de 2 €/kg, para el caso de hidrógeno verde un 2,5 – 5,5 €/kg y para el hidrógeno gris un coste de 1,5 €/kg.

El principal factor de coste del hidrógeno es la energía necesaria para su producción en el caso de hidrógeno verde en específico hablando del método de obtención por electrólisis es costoso debido a que los electrolizadores tienen un precio actual estimado de 900 €/KWh, aunque en la última década su precio ha descendido en un 60% y según pronósticos realizados por la European commission se estima de descienda hasta un 50% o menos en 2030 y en el 2040 a un precio menor de 180 €/KWh. En la figura 1 se muestra la diferencia de costos entre los diferentes métodos de obtención del hidrógeno. [17]

La fuente de producción principal de hidrogeno es el reformado de metano el cual contiene impurezas como el azufre lo cual requiere una etapa de eliminación, la corriente limpia de metano se hace reaccionar en un reactor con un catalizador de níquel, el resultado es una corriente de salida rica en hidrogeno, pero contiene cierta fracción de CO, el cual se transforma en hidrogeno por medio de la reacción con vapor de agua.

**Figura 1**

*Diferencia de costes entre métodos de obtención*



**Nota.** La figura muestra una comparación de costes entre los diferentes métodos de producción de hidrógeno y sus costes en usd/kg. Tomado de J. F. Gómez, r. á hermana and J. M. Sánchez, "Perspectivas De Desarrollo De Un Mercado Global De Hidrógeno" instituto vasco de competitividad - fundación deusto, pp. 1-91, 2021.

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) la producción de hidrógeno verde para el año 2030 puede alcanzar niveles cercanos a los 1,5 \$/kg-H<sub>2</sub> debido al mejoramiento de tecnologías las cuales aumentarían la eficiencia en los procesos de conversión [17].

Al final, la producción de hidrógeno se debe direccionar a emisiones nulas o muy bajas, para lo cual se utilizarán dos métodos diferentes el primero es el reformado de gas natural el cual debe tener captura de carbono y el segundo método la electrólisis de agua mediante electrolizadores alimentados por fuentes renovables [17]. "Los electrolizadores comerciales actuales presentan de manera general un tamaño demasiado reducido para las necesidades futuras (< 1 MW). Existen plantas en operación de 10 MW (Japón) y pilotos en desarrollo de hasta 20 MW (Canadá, España), y se pretende llegar en los próximos años a más de 100 MW" [17]. Según el investigador José Moya y co. se estima que para producir 2.000 Tera vatio-hora (TWh) de hidrógeno en 2050 se necesitarán 625 giga watt (GW) de electrolizadores y 110 GW de capacidad para el reformado de metano con vapor (SMR) con tecnología de captura, almacenamiento y uso del carbono (CCUS) u otra opción puede ser 100 GW de electrolizadores y 475 GW de SMR [21]. «En función del número de horas de operación de los electrolizadores serían necesarios entre 290 y 900 GW de

capacidad de producción de energía renovable y capturar entre 85 y 460 Mt CO<sub>2</sub> (en unas 150 instalaciones grandes dedicadas). El gasto de agua sería de 1.200 a 1.400 Mm<sup>3</sup>, un tercio del consumo actual del sector energético en la UE. Para alcanzar esta capacidad de producción.» [22] Según la investigación de José Moya y co. la comisión europea deberá invertir un valor aproximado de 140.000 a 400.000 millones de euros (M€) en el proceso de desarrollar el hidrógeno como fuente sustentable [21].

La Unión Europea (UE) según Fernández et al. [17] ha planteado una solución para el desarrollo investigativo e industrial el cual compone de un proceso gradual y continuo para alcanzar escalas industriales de hidrógeno verde para el año 2050, este plan está dividido en tres fases. La primera fase (2020-2024) la cual tiene como objetivo tener una capacidad mínima de 6 GW de electrificadores los cuales van a tener un tamaño 100 MW, en esta primera fase también incorpora la captura de carbono en instalaciones de producción por medio de combustibles fósiles. En la segunda fase (2025-2030) se va a caracterizar por la integración del hidrógeno al sistema energético con un mínimo de 40 GW y con una producción de hasta 10 millones de toneladas (Mt). En la tercera fase (2031-2050) un 25% de la generación de energía eléctrica debe ir a la producción de Hidrógeno, adicionalmente se utilizarían tecnologías de captura y uso de carbono para sustituir gradualmente los combustibles fósiles por otros tipos de combustibles como combustibles sintéticos y el gas natural, debido a este plan se piensa que el coste de hidrógeno pueda descender hasta un rango entre 1,1 – 2,4 €/kg en 2030 [17].

Para la siguiente figura se presentan la capacidad para la obtención de hidrógeno según el país, como se muestra a continuación:

USA: Condiciones favorables para la energía fotovoltaica y el viento [22]. Chile: Condiciones híbridas fotovoltaicas/eólicas favorables [22].

EU (Reino Unido): Es probable que sea una ubicación de alta demanda con restricciones renovables debido a las curvas de carga variables y la disponibilidad limitada de espacio [22].

Medio oriente: Alto potencial híbrido fotovoltaico / eólico debido a un buen recurso local [22].

Japón/Corea: estrategia para escalar el espacio de consumo de hidrógeno y las limitaciones de recursos; puede importar hidrógeno [22].

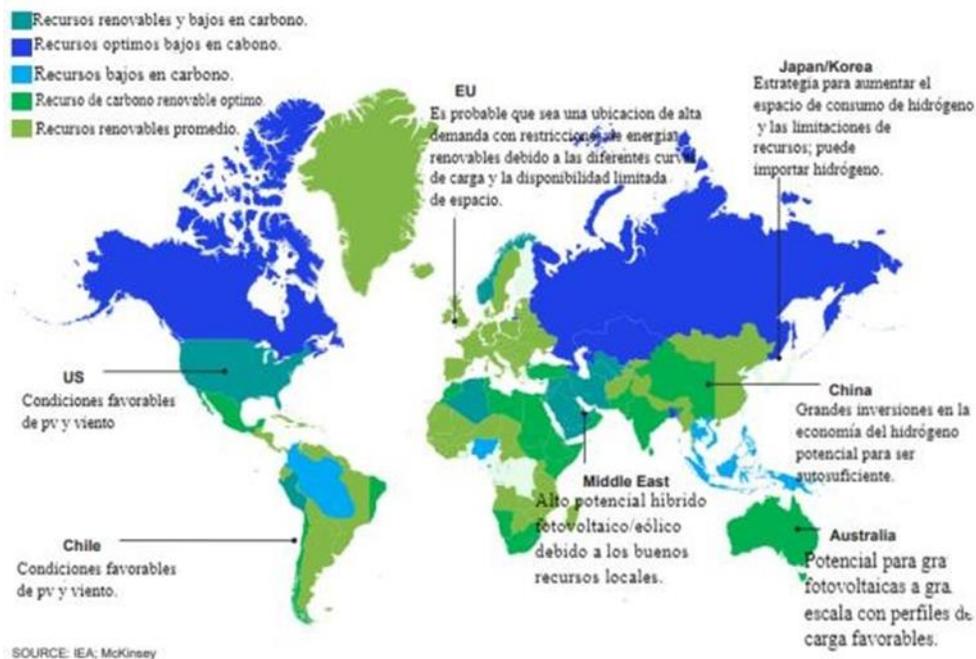
China: Grandes inversiones en la economía del hidrógeno, potencial para ser autosuficientes [22].

Australia: Potencial para granjas fotovoltaicas a gran escala con perfiles de carga favorables [22].

## Figura 2

### Capacidad de producción de hidrógeno en diferentes regiones del mundo

#### La mejor fuente de hidrógeno bajo en carbono en diferentes regiones.

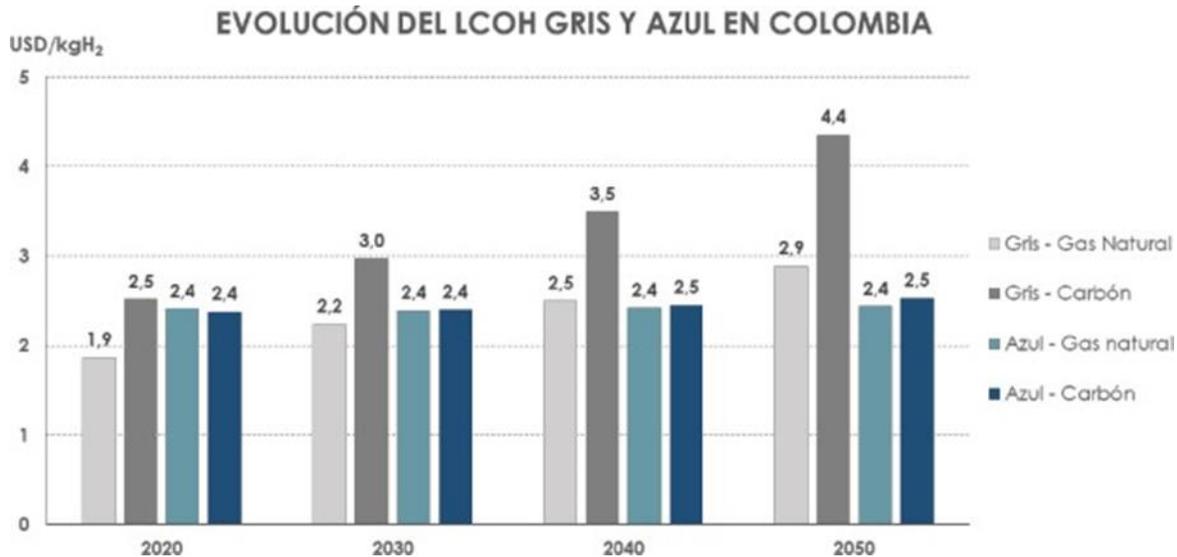


**Nota.** En esta imagen se puede ver los diferentes tipos de producción dependiendo de la región. tomado de J. F. Gómez, R. A. hermana and J. M. Sánchez, "Perspectivas De Desarrollo De Un Mercado Global De Hidrógeno" Instituto Vasco de Competitividad - Fundación Deusto, pp. 1-91, 2021.

2.1.1.a Oferta de hidrógeno en Colombia. En cuanto a Colombia, se cuenta con una hoja de ruta realizada por el ministerio de minas y energías según se cuenta con recursos como las reservas de gas, petróleo y carbón las cuales llevan casi a la autosuficiencia energética a Colombia a partir de estos recursos se podrá obtener el hidrógeno azul el cual tendrá una huella de CO<sub>2</sub> de 1 y 2 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>. Estas reservas de gas natural se estiman que están alrededor de 2.949 giga pies cúbicos (Gpc) es decir unos 7,7 años de reservas, estas reservas las podemos encontrar en los Llanos orientales, el Valle inferior del Magdalena y la Guajira. Para las reservas de carbón Colombia tiene un estimado de 4.500 Mt y estas reservas se encuentran principalmente en La Guajira y Cesar [16].

**Figura 3**

*Producción de hidrógeno gris y azul a partir de gas natural y carbón*



**Nota.** Se ha planteado un costo de 20 USD/tCO<sub>2</sub> a partir del año 2023, aumentando dicho precio un 5% anualmente. Tomado de M. de Energía, “Hoja De Ruta Del Hidrogeno en Colombia”, [https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf). [En línea]. Disponible en: [https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf).

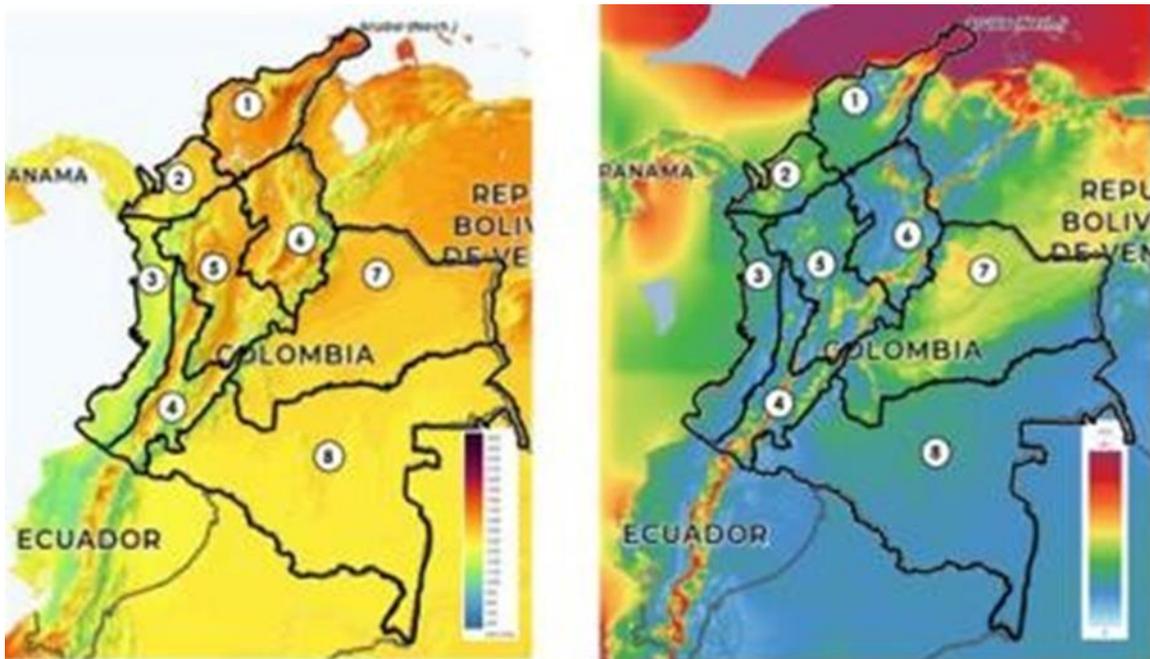
Según la hoja de ruta del hidrógeno en Colombia se deberá implementar un mecanismo el cual grave el costo de las emisiones de CO<sub>2</sub>, además de ellos se deberán identificar locaciones que estén preparadas para el almacenamiento del CO<sub>2</sub> [16].

Por el lado del hidrógeno verde, Colombia tendría un claro potencial debido a la energía eólica y solar ya que se tiene que al año 2022 estas dos energías suministrarán el 12% de la energía total de Colombia, las zonas que se ven y se verán o hoy en día favorecidas de estas energías son la Guajira, Magdalena y el Atlántico lo que asegura que la producción de Hidrógeno pueda ser competitiva [16].

Para la producción de hidrógeno verde, Colombia impulsará su producción de hidrógeno verde mediante fuentes no convencionales de energía renovable, como las ya nombradas energía solar y energía Eólica [16].

#### Figura 4

*Separación de Colombia por zonas de recurso renovable*



**Nota.** Se analiza la energía solar y energía eólica por regiones. Tomado de M. de Energía, “Hoja De Ruta Del Hidrogeno en Colombia”, [https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf). [En línea]. Disponible en: [https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf).

Cada una de estas regiones está compuesta por varios departamentos o particiones de estos:

1. Caribe Norte: Guajira, Magdalena, Atlántico, Norte de Bolívar, Norte de Sucre [16].

2. Caribe Sur: Córdoba, Norte de Antioquia, Norte de Chocó [16].
3. Pacífico: Sur de Chocó, Oeste de Valle del Cauca, Oeste de Cauca y Oeste de Nariño [16].
4. Andes Sur: Huila, Este de Valle del Cauca, Este de Cauca y Este de Nariño, Quindío [16].
5. Andes Centro: Tolima, Cundinamarca, Antioquia, Risaralda [16].
6. Andes Norte: Boyacá, Santander, Norte de Santander, Sur de Bolívar, Sur de Sucre [16].
7. Orinoquia: Vichada, Meta, Casanare, Arauca [16].
8. Amazonia: Guainía, Guaviare, Vaupés, Caquetá, Putumayo, Amazonas [16].

Los costos de la producción de hidrógeno verde por medio de energía eólica en el Caribe Norteson de 1,7 USD/kg lo cual es comparable con los otros países de referencia como Chile (1,5 USD/kg) y Australia (1,6 USD/kg) para el año 2030 [16].

Algunas de las conclusiones para el período 2020 - 2050 presentadas en la hoja de ruta del hidrógeno en Colombia son:

- “A corto plazo, el H<sub>2</sub> azul es la mejor opción de bajas emisiones. Sin embargo; ya en 2030, la producción de H<sub>2</sub> verde en las zonas con mejor recurso eólico del país (Guajira) comienza a presentarse como la alternativa más competitiva” [16].
- «Entre 2030 y 2040, se espera la coexistencia del hidrógeno azul y verde según el recurso natural disponible para su producción en cada región de Colombia. De hecho, a partir de 2035, el H<sub>2</sub> azul (a partir de gasificación de carbón o reformado de GN) resultaría más competitivo incluso que el H<sub>2</sub> gris debido al aumento de los precios del CO<sub>2</sub> y el descenso de costos de las tecnologías de captura» [16].
- A partir de 2040, el H<sub>2</sub> verde se impondrá como la alternativa más competitiva en todo el territorio colombiano [16].

### **2.1.2 Demanda de hidrógeno**

La demanda de hidrógeno a finales de 2018 fue de unos 110 Mt o 14.4 EJ [17]. Estas cifras se dan debido a la variabilidad de usos del hidrógeno, algunos de los principales mercados son; la industria química, termodinámica, refinación de combustibles, minería, combustible, electromovilidad generación de electricidad y microrredes [18].

Según el investigador Fredy Ladislao Jiménez Sáez en la industria química se requiere el hidrógeno en diversos procesos como en la producción de amoníaco (NH<sub>3</sub>) el cual sirve como

catalizador y estabilizador de reacciones; a nivel termodinámico el hidrógeno puede ser utilizado como fluido de reacciones termodinámicas, dichas reacciones termodinámicas se dan en procesos de refrigeración como por ejemplo en los radiadores, en turbinas o motores; en la industria de la refinación de combustibles el hidrógeno se requiere en dos procesos constantemente el primer proceso es llamado Hydrotreating el cual consiste en un proceso de purificación catalítica, dicho en otras palabras además de los reactivos interviene uno o más catalizadores que regulan la velocidad de la reacción [18], “en éste caso el hidrógeno se usa como reactivo en conjunto con el hidrocarburo a refinar y como catalizador suele utilizarse aluminio y otros metales. Mediante este proceso se busca eliminar impurezas”[18] el segundo proceso llamado hidrocraqueo “en el cual el hidrocarburo pesado se le inyecta el hidrógeno a alta temperatura y presión para romper los enlaces entre átomos de carbono y obtener combustibles livianos”[18]; otra aplicación según el investigador Fredy Ladislao Jiménez Sáez es el combustible ya que tiene buenos niveles de densidad energética por lo tanto puede adicionarse a diferentes tipos de combustibles lo cual va a mejorar el rendimiento, en este tipo de aplicación el hidrógeno también se puede utilizar de forma pura como se ha visto anteriormente donde se puede utilizar como forma de energía en industrias extensivas como el transporte y la minería [18]; «La electromovilidad es una industria que está en aumento, acompañada de un fuerte crecimiento y grandes cantidades de investigación e innovación. Para nadie es sorpresa a estas alturas los beneficios que traería combinar los automóviles eléctricos, tradicionalmente alimentados por baterías, con la posibilidad de generar electricidad mediante celdas electroquímicas de alta eficiencia a base de hidrógeno, de este modo la autonomía y flexibilidad de los vehículos eléctricos aumentaría significativamente. Aunque esta industria aún presenta importantes desafíos y requiere bastante más investigación, la idea ya se presenta como plausible –incluso probable– y muchas investigaciones actuales alrededor del mundo apuntan a viabilizar el desarrollo de vehículos eléctricos híbridos a base de hidrógeno y baterías o inclusive alimentados exclusivamente por hidrógeno» [18].

Como se referenció anteriormente la demanda de hidrógeno en el año 2018 llegó a ser de 110 Mt, los cuales se distribuyeron en 74 Mt de hidrógeno puro y el resto mezclado con diferentes gases, a su vez el hidrógeno puro se utiliza en la industria de la refinación (38 Mt, 33% del total), en producción del amoniaco (32 Mt, 27% del total), como ya se había mencionada también se mezcla con metanol (12 Mt, 11% del total) y la reducción del mineral de hierro (4 Mt, 3% del total) [17].

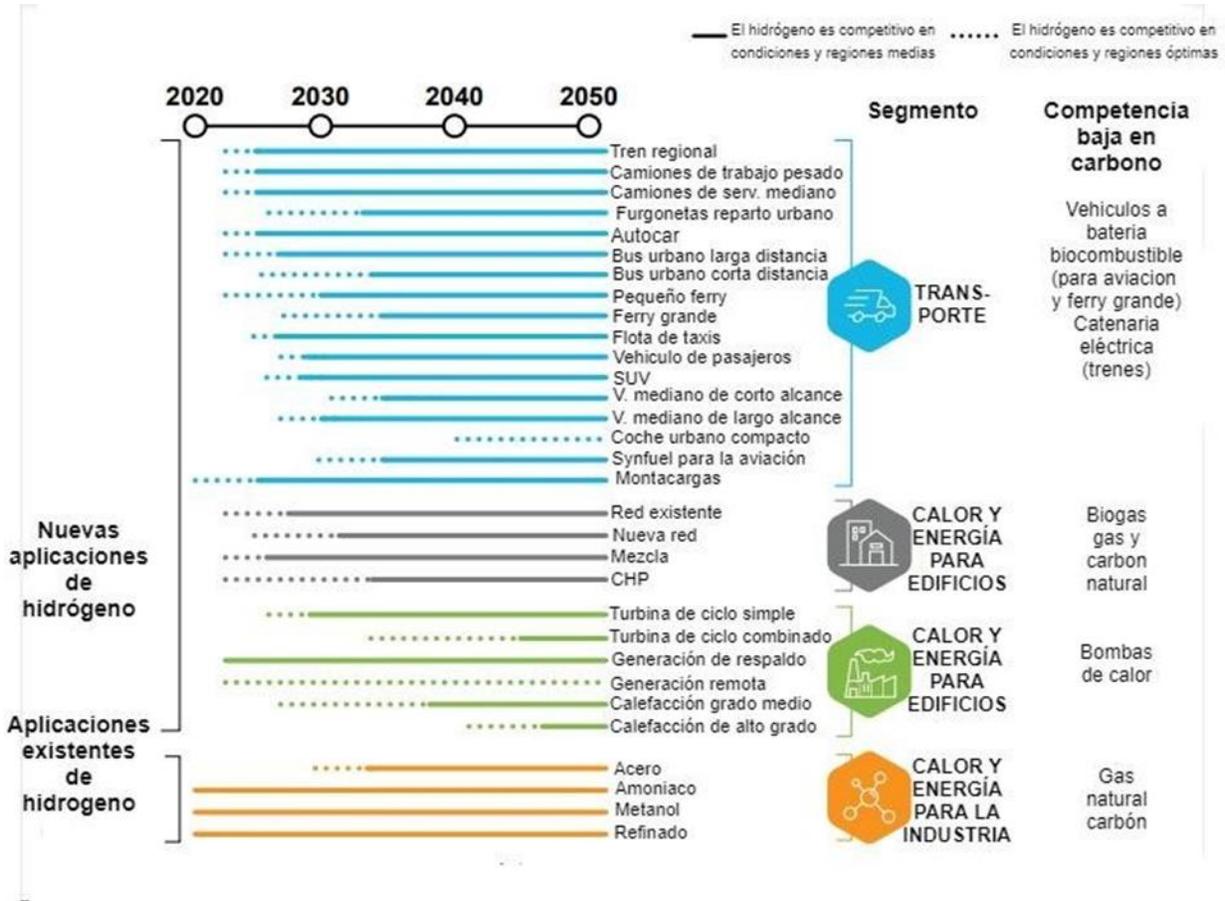
Según Fernández et al. [17] las perspectivas de evolución de la demanda son de gran incertidumbre sobre el tamaño que tendrá la demanda del hidrógeno en un futuro a largo plazo además de la forma de obtención del hidrógeno es decir si se va a potenciar el hidrógeno azul o el hidrógeno verde. Según la empresa Fuel Cells and Hydrogen Joint undertaking (FCHJU) la proyección en la demanda de Europa para el año 2050 estará alrededor de los 8 EJ, es decir cubrirá aproximadamente el 25% de la demanda de energía, [23] para la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) se obtendrá un total de 19 EJ para el año 2050 lo que cubrirá el 6% de la energía total [24], para la empresa Hydrogen council el cual es una iniciativa global liderada por un CEO de empresas tiene como estimación que se va a presentar una demanda de 80 EJ lo que es aproximadamente el 18 % de la energía total.

Las conclusiones que se pueden tomar de las perspectivas del hidrógeno es que existen algunos escenarios favorables para la potenciación de esta industria como lo son el transporte y la energía; sin embargo; esta industria será competitiva a finales de la década de los 20's e incluso para que sea aceptada en vehículos de transporte de gran tamaño como los son los trenes y aviones tomará una década más como mínimo [17], a continuación, se muestra una imagen donde se puede ver que en ciertos segmentos de la industria el hidrógeno puede ser competitivo en regiones medias y óptimas dependiendo del año [22].

Fernández et al. [17] plantea un escenario el cual tomará la Unión Europea, como ya se había mencionado en la oferta del hidrógeno que consistirá en las tres fases, básicamente con estas tres fases se le apuesta al desarrollo en el suministro de hidrógeno a nivel local, un ejemplo de ello es algunos países como Alemania y España que tiene la línea de proyecto del corredor vasco de hidrógeno, a partir del suministro suficiente de hidrógeno a los “valles” se puede incluir aplicaciones industriales y de transporte. La idea de generar esta clase de valles en la interconexión entre ellos por toda Europa, a parte de la generación de desarrollo para la producción de hidrógeno puro se hará paralelamente un mix energético con el gas natural donde se podrá utilizar la infraestructura de las redes del gas natural, esta mezcla estará alrededor de un 5-15%. [17]

**Figura 5**

*Trayectorias de competitividad de costes de las aplicaciones del hidrógeno*



*Nota.* Por segmentos se hace un estudio de los momentos del hidrógeno del 2020-2050. Tomado de M. de Energía, “Hoja De Ruta Del Hidrogeno en Colombia”, [https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf). [En línea]. Disponible en: [https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf).

2.1.2.a Demanda de hidrógeno en Colombia Según el ministerio de minas y energía en la hoja de ruta del hidrógeno en Colombia la demanda de hidrógeno se encuentra estimada en 150 Kt los cuales se producen mediante reformado de gas natural, es decir hidrógeno gris el cual se consume en su mayoría en las refinerías, además también se usa en la producción de fertilizantes y otros usos industriales menos utilizados [21].

**Figura 6**

*Aplicaciones actuales y futuras del hidrógeno*



**Nota.** En la figura podemos observar en qué industrias se puede utilizar el Hidrógeno actualmente y en un futuro.

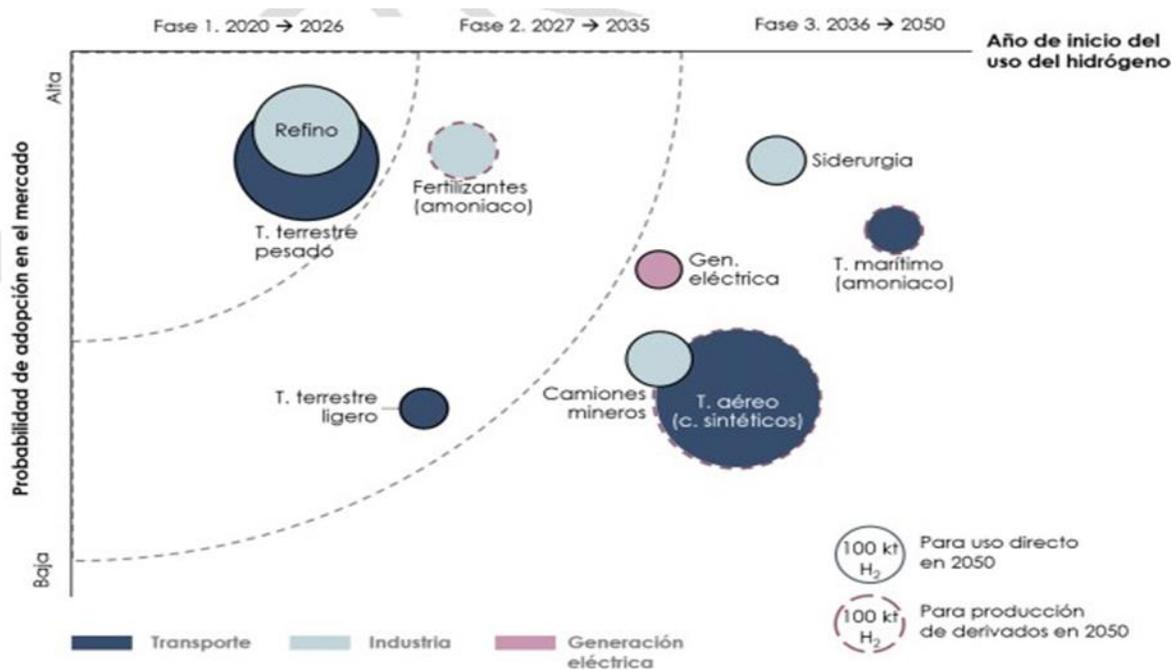
**Tomado de** M. de Energía, “Hoja De Ruta Del Hidrogeno en Colombia”, [https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf). [En línea]. Disponible en: [https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf).

La perspectiva en la hoja de ruta del hidrógeno en Colombia tiene como meta el aumento exponencial de la producción de hidrógeno en bajas o nulas cantidades de CO<sub>2</sub> por lo cual se ha estimado que la nueva demanda de hidrógeno esté llegando a unos 120 Kt en el año 2030, la demanda de hidrógeno favorecerá principalmente a la descarbonización de industrias como la refinación de combustibles y fertilizantes, para el sector de transporte (autobuses y camiones) se estima que a partir del año 2026 se tendrá demanda de hidrógeno. Para el año 2040 habrá un alza en la demanda que permitirá consolidar la industria y entre la década de 2040 y 2050 se estima una producción de 1180 Kt del cual el 64% del hidrógeno va a ser consumido por el sector del transporte este aumento considerable se deberá tanto a la irrupción del hidrógeno de bajas emisiones en el transporte aéreo el cual tendrá una demanda del 40% y marítimo como al crecimiento de su demanda en el transporte por carretera [21].

demanda de hidrógeno favorecerá principalmente a la descarbonización de industrias como la refinación de combustibles y fertilizantes, para el sector de transporte (autobuses y camiones) se estima que a partir del año 2026 se tendrá demanda de hidrógeno. Para el año 2040 habrá un alza en la demanda que permitirá consolidar la industria y entre la década de 2040 y 2050 se estima una producción de 1180 Kt del cual el 64% del hidrógeno va a ser consumido por el sector del transporte este aumento considerable se deberá tanto a la irrupción del hidrógeno de bajas emisiones en el transporte aéreo el cual tendrá una demanda del 40% y marítimo como al crecimiento de su demanda en el transporte por carretera [21].

**Figura 7**

*Desarrollo de las aplicaciones del hidrógeno de bajas emisiones en Colombia*



**Nota.** En la figura se puede ver por períodos como las industrias van adoptando el hidrógeno en sus procesos.

**Tomado de** M. de Energía, “Hoja De Ruta Del Hidrogeno en Colombia”, [https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf). [En línea]. Disponible en: [https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf).

Para el sector industrial los usos estarán distribuidos entre los sectores de los fertilizantes en el cual sobresale el amoniaco lo cual hará que las importaciones de dicho producto decaigan a su vez

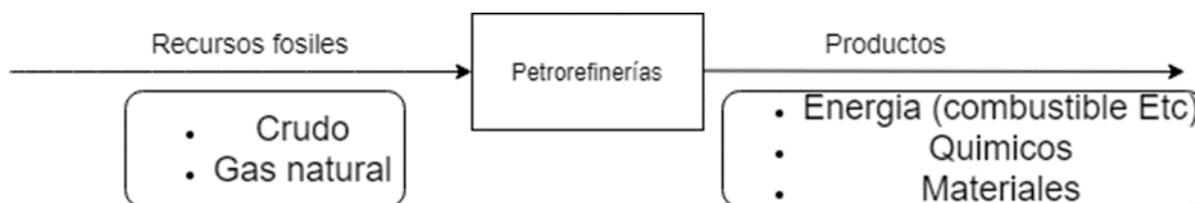
se impulsaría la demanda de hidrogeno en industrias como la minería, siderurgia y refinerías donde en el último sector se verá mayor demanda de hidrógeno y por último está el sector eléctrico el cual consumirá un 3% de hidrógeno total producido [21].

## 2.2 Biorrefinerías

Las biorrefinerías son instalaciones que tienen como objetivo convertir la biomasa, incluidos los desechos a productos como biomateriales y energía un ejemplo de ello son los combustibles para el transporte (por ejemplo, biodiésel, bioetanol), productos químicos y materiales básicos y productos de alto valor y bajo volumen o productos químicos especiales como cosméticos nutracéuticos. El concepto de las biorrefinerías es análogo a las refinerías petroleras como se muestra en la siguiente Figura.

**Figura 8**

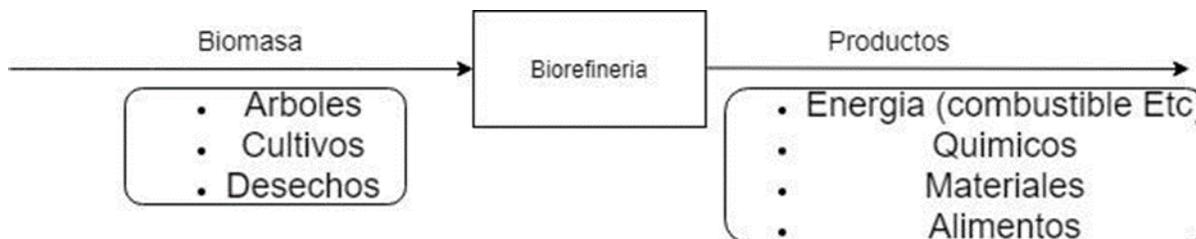
*Proceso de la refinería*



*Nota.* En la figura se muestra un diagrama básico de un proceso de biorrefinería **Tomado de** J. H. Clark and F. E. I. Deswarte, "The Biorefinery Concept–An Integrated Approach, In *Introduction To Chemicals From Biomass*, 2008" Available:<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470697474.ch1>. DOI: 10.1002/9780470697474.ch

**Figura 9**

*Proceso de la biorrefinera*



*Nota.* En la figura se muestra un diagrama básico de un proceso de biorrefinera **Tomado de** J. H. Clark and F. E. I. Deswarte, "The Biorefinery Concept–An Integrated Approach, In *Introduction To Chemicals From Biomass*, 2008" Available:<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470697474.ch1>. DOI: 10.1002/9780470697474.ch

La composición química de la biomasa es compleja y contiene carbohidratos, lignina, proteínas y las grasas que se encuentran en grandes cantidades, con cantidades menores de varios otros productos químicos como vitaminas, colorantes y aromatizantes. Estas biomásas se clasifican en tres según su naturaleza química [21].

1. Materia prima de triglicéridos (TGF) como aceites vegetales, grasas animales, aceites decocina usados y aceites de microalgas.
2. Azúcar y materia prima con almidón (SSF).
  - 2.1 Biomasa que contiene sacarosa (por ejemplo, remolacha azucarera, sorgo dulce, caña de azúcar, etc.),
  - 2.2 Biomasa con almidón como trigo, maíz, cebada, maíz, etc.
  - 2.3 Materia prima lignocelulósica (LCF) como madera, paja, pastos, etc.

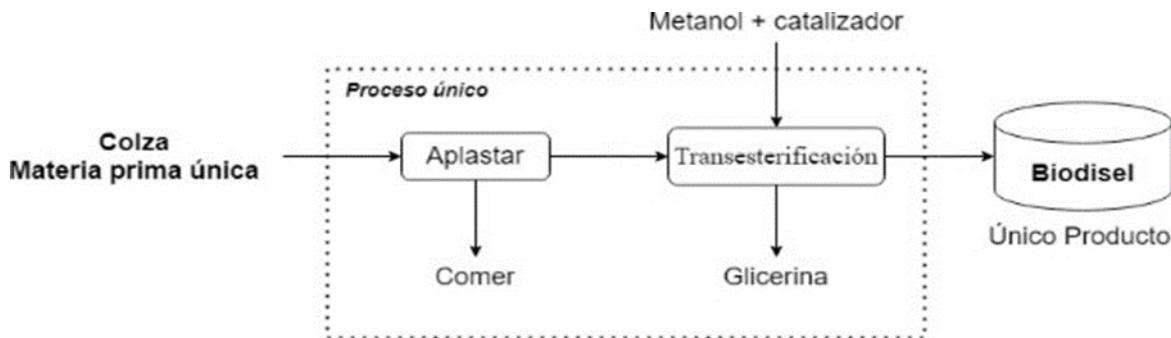
Las biorrefinerías se clasifican en biorrefinerías de fase I, biorrefinerías de fase II y biorrefinerías de fase III.

### **2.2.1 Biorrefinerías de fase 1**

Las biorrefinerías de fase I se caracterizan por tener una materia prima única, proceso único y un único producto, un ejemplo que sintetiza este tipo de biorrefinerías son las que se encuentran en Europa las cuales producen biodiesel a partir de aceite vegetal y producen una cantidad fija de biodiesel y glicerina por medio del proceso de transesterificación [21].

**Figura 10**

*Concepto de una biorrefinería fase I*



*Nota.* En la figura se muestra un diagrama básico de un proceso de biorrefinería fase I **Tomado de** J. H. Clark and F. E. I. Deswarte, "The Biorefinery Concept—An Integrated Approach, In *Introduction To Chemicals From Biomass* 2008" Available:<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470697474.ch1>. DOI: 10.1002/9780470697474.ch

### **2.2.2 Biorrefinerías de fase II**

Las biorrefinerías de fase II se caracterizan por producir más de un producto; sin embargo; son similares debido a que solo utilizan una materia prima, las biorrefinerías de este tipo normalmente integran biocombustibles y productos químicos ofrecen un mayor rendimiento. Un ejemplo de este tipo de biorrefinerías es Roquette de Lestrem en Francia la cual produce más de 600 derivados de los carbohidratos en todo el mundo, dicho programa tiene como objetivo desarrollar biorrefinerías a base cereales [21].

### **2.2.3 Biorrefinerías de fase III**

Este tipo de biorrefinerías, aunque no son comerciales prometen bastante debido a que tienen un alto grado flexibilidad en la materia prima así mismo también proporcionan una gran cantidad de productos lo que facilita maximizar la rentabilidad. Este tipo de biorrefinerías se subdividen en cinco sistemas [21]:

- **Biorrefinerías de materia prima de lignocelulosa**

Este tipo de biorrefinerías utiliza materias primas como la madera, paja y rastrojo de maíz, este tipo de materia prima se pasa por diferentes procesos con el fin de fraccionar y convertir la materia prima en productos de interés sean productos químicos o energéticos. En Estados Unidos se ha implementado este tipo de biorrefinería por la empresa Zea 2 Bioworks la cual produce

biocombustibles, sustancias químicas como el ácido acético, acetato de etilo, etanol, etileno, ácido propiónico, propanol y propileno [21].

- **Biorrefinería de cultivo integral**

Las biorrefinerías de este tipo utilizan trigo, maíz, colza, etc. lo cual hace necesario la separación de la semilla de la paja para luego procesarla y producir una amplia gama de productos, un ejemplo de estas refinerías es la construida en Iowa la cual pertenece a POET, esta biorrefinería utiliza tecnologías las cuales permiten producir etanol a partir de mazorcas de maíz, hojas, cáscara y algunos tallos [21]

- **Biorrefinerías verdes**

Para este caso se utilizan materias primas como pasto verde, alfalfa, trébol, cereales inmaduros, etc este tipo de biorrefinería utiliza fermentación para la obtención de productos. Para el primer tratamiento se debe pasar por una compresa la biomasa para separar el agua que contiene la biomasa y obtener una torta rica en fibra. El agua que contiene la biomasa contiene sustancias como aminoácidos, ácidos orgánicos y colorantes. [21].

### **2.3 Cultivos de Maíz en Colombia como fuente de biomasa para la producción de hidrógeno en Colombia**

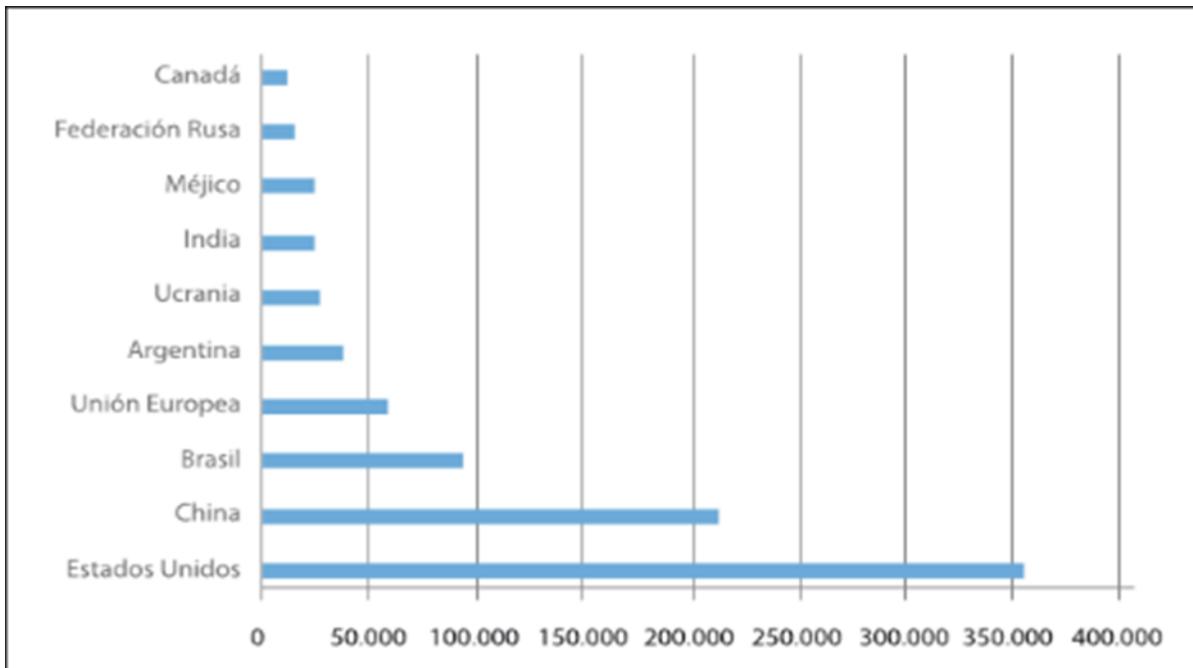
El mercado a nivel mundial del maíz se encuentra compuesto por dos tipos, el maíz amarillo es el tipo de maíz más cultivado a nivel mundial los principales productores de maíz en el año 2016 fueron Estados Unidos, China, Unión Europea, Brasil, Argentina y México.

Estados Unidos, China y Brasil son los países que alimentan tres cuartos de la producción mundial.

Para el año 2016-2017 se alcanzó la producción más alta de maíz a nivel mundial con 1079 millones de toneladas de este periodo se denota que la producción se concentró en cinco países los cuales fueron; Estados Unidos (37%), China (21%), Brasil (8%) [25].

**Figura 11**

*Principales productores de maíz en el mundo*



*Nota.* Principales productores de maíz a nivel mundial en el año 2017. **Tomado de** G. M. Gómez Hoyos and E. J. Ocampo, 2018: “*Algunos Componentes Generales, Particulares Y Singulares Del Maíz En Colombia Y México.*” Fondo Editorial Biogénesis, 2018.

El creciente aumento en el consumo del maíz de forma sostenida hizo que se tuviera una proyección que entre el año 2016 y 2025 se aumentará el consumo de maíz en un 1,2% y la relación inventarios/consumo serán del 17,8, el cual es muy bajo y peligroso debido a que el consumo en la proyección será más alto que los inventarios de maíz.

Según la investigación hecha por el Centro internacional de Agricultura Tropical (CIAT) el cultivo de maíz es el tercer cultivo con mayor superficie de siembra después del café y el arroz, esto convierte a Colombia en el país con mayor volumen de importaciones en Suramérica y el séptimo en el mundo [26].

«El maíz es uno de los cultivos más relevantes en el sector agroalimentario en Colombia. La producción de maíz aumentó 76% entre 1961 y 2016, mientras la demanda creció a un ritmo más acelerado que la producción. En 2012, se alcanzó un máximo histórico de producción de 1.8 Mt (millones de toneladas). De acuerdo con los datos más recientes, la producción cayó a 1,6 Mt en

el año 2016. En ese mismo año, se importó el 74% de la demanda nacional, es decir, 4,6 Mt de las 6,2 Mt que se requieren en el país» [26], por esta razón el investigador Carlos David Grande Tovas insiste que se necesita de cultivos tecnificados los cuales emplean agroquímicos, maquinaria agrícola para la recolección y procesamiento del maíz, este tipo de cultivo se caracteriza por las semillas certificadas. La práctica de dichos cultivos ha obtenido un rendimiento de 3,9 t/ha en el año 2010 cuando antes de practicarlos en el año 2000 se obtenía un rendimiento de 3,6 t/ha [27], aun con el comienzo de la tecnificación se necesita un aumento de dichos cultivos y de mantenerse dicha tendencia, se espera que la producción crezca alrededor de 6% y la demanda en 9% entre 2018 y 2030, lo que fomenta la producción de maíz de forma competitiva» [26].

La investigación hecha por el Centro internacional de Agricultura Tropical (CIAT) plantea un plan estratégico llamado Maíz para Colombia (MpCo) el cual parte de la necesidad de presentar y ejecutar un plan que potencie la cadena productiva del maíz Colombiano, en este plan se identificaron 5 motores los cuales son adopción de semilla mejorada, seguridad nutricional, agricultura sostenible adaptada al clima, redes de acompañamiento a la innovación y vinculación de productores competitivos al mercado como se ve en la figura 12, dicho plan estratégico tiene como objetivo lograr rendimientos más altos y estables, al igual que mayores ingresos para los agricultores colombianos [26].

En Colombia hay dos tipos de maíz que se consumen mayoritariamente el primero es el amarillo y el segundo es el blanco esto se demostró entre los años 2007 y 2016 cuando el aumento total de la demanda de ambos tipos de maíz fue de 25%, creciendo con una tasa anual del 3%; sin embargo; el predominante fue el amarillo con un 85% y el maíz blanco se estimó en un 15% [26].

Las proyecciones que se hacen demuestran que este producto no es sensible a los cambios socioeconómicos no así a los cambios de efecto climático, para hacer dichas proyecciones el Centro internacional de Agricultura Tropical (CIAT) tomo como tres localizaciones; Cereté (Córdoba), El Espinal (Tolima) y La Uribe (Meta), las cuales mostraron una productividad promedio por encima de 8 t/ha (toneladas por hectárea) [26].

**Figura 12**

*Los cinco motores del plan maíz para Colombia*

Motor	Objetivo	Acciones a corto, mediano y largo plazo
 Adopción de semilla mejorada	Adopción de semilla mejorada por el 100% del área bajo sistema tecnificado y al menos 10% de área con sistema tradicional para 2030.	1A. Documentar necesidades del mercado de semillas. 1B. Implementar esquemas de financiamiento e incentivos que brinden apoyo y dinamismo a la adopción de semilla mejorada. 1C. Desarrollar recursos para la investigación en mejoramiento de maíz.
 Seguridad nutricional	Alcanzar un consumo nacional humano del 50% de maíz blanco biofortificado con alto contenido de zinc para 2030.	2A. Aumentar el volumen de producción de semilla de maíz biofortificado y su consumo. 2B. Identificar y abordar las necesidades de acopio y almacenamiento de productores de maíz biofortificado. 2C. Desarrollar una estrategia de difusión nacional para aumentar la demanda de maíz biofortificado en el país.
 Agricultura sostenible adaptada al clima	Conversión a agricultura sostenible adaptada a la variabilidad y cambio climático en al menos 100 mil hectáreas de sistemas de producción de maíz en 2030.	3A. Desarrollar un sistema de información agroclimática, para una mejor toma de decisiones y uso de tecnologías. 3B. Escalar el uso de tecnologías, prácticas y herramientas ASAC, incluyendo agricultura de conservación. 3C. Implementar esquemas de financiamiento e incentivos para incrementar la inversión en tecnologías y sistemas para la agricultura sostenible adaptada al clima.
 Redes de acompañamiento a la innovación	Cobertura de redes de innovación como el estándar de extensión y asistencia técnica en al menos 30% en el entorno rural.	4A. Desarrollar una estrategia de redes de acompañamiento técnico con base en el diagnóstico y categorización productiva regional. 4B. Establecer los mecanismos necesarios para la implementación de un sistema de redes de acompañamiento técnico a la innovación. 4C. Incorporar mecanismos de financiamiento institucional público y privado.
 Vinculación de productores competitivos al mercado	Aumentar la vinculación para un comercio de productores competitivos del mercado local, regional y nacional.	5A. Crear un Observatorio de Maíz para facilitar el acceso a información de mercado. 5B. Vincular agricultores en asociaciones para la comercialización a nivel local, regional y nacional. 5C. Mejorar la infraestructura existente y sistemas de producción, para asegurar la competitividad en el mercado.

*Nota.* Los cinco motores son los que permitirán pasar de los escenarios a la acción.

**Tomado de "Cultivaciones De Maíz"**

En Colombia existen 23 razas de maíz, las cuales se encuentran distribuidas en por todo el país las cuales han sido conservadas por comunidades indígenas, negras y campesinas, las cuales se presentan a continuación [28].

**Figura 13**

*Variedades de maíz en la región Caribe*

<b>Organización</b>	<b>Variedades</b>	
<p>Resguardos indígenas Zenú en Córdoba, Sucre y Urabá (Antioquia) Recar 0-200 m</p>	<p>Azulito Berrendo Blanco criollo Brisa blanca Cacho de buey Cariaco amarillo Cariaco rayado Cariaco rojo Cuba hoja blanca Cuba hoja prieta Cucaracho Guajiro Huevito Javao Lomo bayo amarillo Manteca</p>	<p>Minga Negrito Ojo de gallo Pano Piedrecita o piedrita Pira Pocho Pompo Sangre toro Tucita amarillo Tacaloa Amarillo Tacaloa mohoso Vela amarilla Vela blanco Venezolano</p>
<p><b>Campesinos e indígenas de la ciénaga grande del bajo Sinú (Córdoba)</b>  <b>Asprocig</b></p>	<p>Azulito Berrendo Blanco Carlaco Criollo blanco Criollo blanco  Cuba criollo Cucaracho</p>	<p>Huevito Mejicano blanco Negrito Panó Setentano amarillo Tacola</p>

<b>0-500 m</b>		
----------------	--	--

*Nota.* Se presentan las variedades según la región **Tomado de** Vélez, G. A., 2004). "No AlMaíz Transgénico."  
Semillas En La Economía Campesina.

**Figura 14**

*Variedades de maíz en Antioquia*

<b>Organización</b>	<b>Variedades</b>
<p style="text-align: center;"><b>Campeños del noroccidente de Antioquia: CIER</b></p> <p style="text-align: center;"><b>1800-2200 m</b></p>	<p><b>Variedades presentes en veredas aledañas a Medellín:</b></p> <p style="text-align: center;">Amagaceño Campeño amarillo Caturro Cuba amarillo Ciba blanca Limeño Limoñeño Montañero amarillo Montañero blanco Pira Puya amarilla</p> <p><b>Variedades presentes en otros municipios:</b></p> <p style="text-align: center;">Amaceño (Municipio: Buriticá) Amagaseño, puya, madreño, Caturro Blanco y pintado (Municipio: Giraldo) Blanco criollo (Municipio: Olaya) Capiro (Municipio Uramita) Puya (Municipio: Sopetran)</p>

*Nota.* Se presentan las variedades según la región **Tomado de Vélez, G. A., 2004).**" No Al Maíz Transgénico."  
Semillas En La Economía Campesina

**Figura 15**

*Variedades de maíz en la Región Andina Central*

<b>Organización</b>	<b>Variedades</b>	
<p><b>Campesinos de los municipios de Riosucio y supía (Caldas): Asproinca</b></p> <p><b>1700-2000 m</b></p>	<p>Amagaceño Amarillo pequeño Blanco Capacho Capiro Chami Clavito Colorado Común amarillo Común blanco</p>	<p>Criollo Diente de caballo Mancio Montañero Morado Ondano Pira Puya RevolturaUrradeño</p>
<p><b>Campesinos de los municipios de enteroios y Calarcá (Quindío): Corpocam</b></p> <p><b>1300-1600 m</b></p>	<p>Blanco crital Amarillo Combinado Amarillo claro Amarillo clarito Amarillo criollo</p>	<p>Blanco puro Caturro blancocriollo Maíz morado (cruce del blanco con amarillo)</p>
<p><b>Campesinos del municipio de Riofrío (Valle del Cauca): Fedena</b></p> <p><b>1800 m</b></p>	<p>Capiro Común Curizara</p>	
<p><b>1350 m</b></p>	<p>Diente de Caballo</p>	

<b>Comunidades indígenas de Tierradentro (Popayán, Cauca) Páez Belalcázar.</b>  <b>1800 -2500 m</b>	Amarillo patojo Calentano común Calentano diente burro Capiro batata Capiro	Capiro blanco Capiro montano Capiro propio Montaña amarilla Montaña larga
---	---	---

*Nota.* Se presentan las variedades según la región **Tomado de Vélez, G. A., 2004).**" No Al Maíz Transgénico."  
Semillas En La Economía Campesina

### Figura 16

*Variedades de maíz en la Región Pacífica*

Organización	Variedades	
<b>Comunidades Emberá del Medio Atrato</b>  <b>0-500 m</b>	Negro Rojo Café	Amarillo Blanco Anaranjado
<b>Comunidades negras de la zona baja del río Anchicayá</b>  <b>0-1000m</b>	Amarillo Blanco Capiro	Cucaracho Negrito

*Nota.* Se presentan las variedades según la región **Tomado de Vélez, G. A., 2004).**" No Al Maíz Transgénico."  
Semillas En La Economía Campesina

**Figura 17**

*Variedades de maíz en la Región Andina Sur*

<b>Organización</b>	<b>Variedades</b>	
<b>Campesinos e indígenas de Pasto  1600-1800 m</b>	Amarillo Criollo Clavo Nieve Primitiva	Amarillo del año Candelo Capia amarilla Capia azul Capia blanca
<b>Campesinos e indígenas de Pasto  1800-2500 m</b>	Capia brillante Capia chulpe Capia misada Capia morado Capia pálida Capia rayado Capia rojo yema de huevo Capia yema de huevo Chulpe Clarito blanco Diente de caballo rojo	Diente de caballo blanco Gnonsico Grandote Granizo Gualmisan amarillo Gualmisan blanco Gualmisan rojo Maizena blanco Maizena amarillo Tabla blanca Tabla amarilla

*Nota.* Se presentan las variedades según la región **Tomado de Vélez, G. A., 2004).**" No Al Maíz Transgénico."  
Semillas En La Economía Campesina

**Figura 18**

*Variedades de maíz en la Región Andina nororiental*

<b>Organización</b>	<b>Variedades</b>	
<b>Campesinos del municipio de Cerrito (Santander): Agrovida</b>	Amarillo Blanco Cacaito pequeño Colorado Cuarentavo	Porva Roita blanco o maíz de leche Roita rojo Tonero
<b>Campesinos de Duitama</b>	Blanco Chinato Porva	

*Nota.* Se presentan las variedades según la región **Tomado de Vélez, G. A., 2004).**" No Al Maíz Transgénico." Semillas En La Economía Campesina

Según la investigadora Gloria Hoyos el 37% del total de maíz en Colombia se destina a sectores industriales como en la fabricación de pegantes, almidones y cosméticos; el 63% restante es destinado al consumo humano. El maíz es actualmente considerado como el principal cultivo de ciclo corto ocupando el 15% del área agrícola y generando un 4% de los empleos agrícolas además de ellos se le atribuye un 3% al PIB agropecuario [29].

Para el año 2018 se sembraron 399.497 hectáreas de maíz en el año lo que representa una variación positiva de 0,2%, esta variación se dio gracias a la tecnificación de los cultivos, en el departamento donde más se vio reflejado dicho aumento fue en el departamento de Cauca el cual tuvo un aumento de 33% en los cultivos tecnificados lo que significa que se aumentó de 2.600 hectáreas a 3.450 hectáreas; sin embargo; se evalúa en un periodo semestral se obtuvo que los departamentos con mayor área en cultivos tecnificados fueron Meta, Córdoba, Tolima y Valle del Cauca, con áreas de 27.800 Ha, 18.365 Ha, 14.950 Ha y 7.700 Ha. Para el segundo semestre del año 2018 se encontró que los departamentos de Meta, Tolima, Valle del Cauca y Huila fueron los que más cultivos tecnificados tenían, cada uno con un área de 23.7500 Ha, 18.050 Ha, 8.750 Ha y 7.450 Ha [29].

Uno de los departamentos en donde se observó esta disminución en el sembrado fue en el departamento de Nariño, en donde se enfrentaron a un escenario limitante debido a factores de comercialización.

Visto desde la producción se encontró que para el año 2018 se produjeron entre maíz blanco y maíz amarillo un total de 1.524.979 toneladas, lo que muestra que hubo una disminución frente al año 2017 en el cual se obtuvieron 1.624.981 toneladas de maíz, habiendo así una disminución del 5,6%, para este caso lo que se pudo reflejar fue una disminución del maíz tecnificado y además una disminución del maíz blanco; para el factor del maíz tecnificado se tiene que para el año 2017 se produjeron 1.246.677 toneladas lo que disminuyó en un 7,6% dando como resultado que para el año 2018 se obtuvieron 1.151.930 toneladas de maíz. En el caso del maíz blanco hubo una reducción porcentual del 12,9%, es decir, de producir 622.450 toneladas en el año 2017 se pasaron a 542.335 toneladas de maíz blanco en el año 2018 [29].

Para el caso de la producción los departamentos con mayor producción del primer semestre del año 2018 fueron Meta, Córdoba, Tolima y Valle del Cauca, con producciones de 163.800 Ton, 100.408 Ton, 83.705 Ton y 65.450 ha [21].

Para el segundo semestre se tuvo que los departamentos fueron Meta, Tolima, Valle del Cauca y Huila, con producciones de 119.500 Ton, 103.075 Ton, 75.250 Ton y 35.618 Ton respectivamente [21].

El caso del departamento de Meta y Tolima fue especial debido a que por parte del departamento del Meta se presentaron fuertes lluvias para Julio y el departamento del Tolima tuvo altas temperaturas para el segundo semestre del año 2018 [21].

Teniendo en cuenta los aspectos anteriormente mencionados se obtuvo un rendimiento el cual se puede en la siguiente tabla:

**Tabla 1***Rendimientos de maíz 2017-2018 en Colombia*

<b>Cultivo</b>	<b>2017 Rend. (Ton/Ha)</b>	<b>2018 Rend. (Ton/Ha)</b>	<b>Var. 2017-2018 Rend. (Ton/Ha)</b>
Maíz amarillo tecnificado	5,8	5,2	-10.6%
Maíz amarillo tradicional	2,0	2,1	3.1%
<b>Maíz amarillo</b>	<b>4,1</b>	<b>3,8</b>	<b>-6.3%</b>
Maíz amarillo tecnificado	5,9	5,6	-5.2%
Maíz amarillo tradicional	1,9	2,0	0.7%
<b>Maíz amarillo blanco</b>	<b>4,1</b>	<b>3,9</b>	<b>-4.9%</b>
Maíz amarillo tecnificado	5,8	5,3	-8.8%
Maíz amarillo tecnificado	2,0	2,0	2.3%
<b>Maíz total</b>	<b>4,1</b>	<b>3,8</b>	<b>-5.8%</b>

*Nota.* En la tabla se muestran diferentes tipos de rendimiento de maíz según cada especificación Semillas En La Economía Campesina. **Tomado de** "Fondo Nacional Cerealista Informe De Gestión" Federación Nacional De Cultivadores De Cereales Y Leguminosas, pp. 1-160, 2018.

#### **2.4 Caracterización Biomasa lignocelulósica**

Para entender la producción de hidrógeno comenzaremos definiendo qué es la biomasa. Se entiende como biomasa toda la materia orgánica susceptible de ser utilizada como fuente de energía [30]. "El origen de la energía de la biomasa puede ser tanto animal como vegetal y puede haber sido obtenida de manera natural o proceder de transformaciones artificiales que se realizan en las centrales de biomasa" [30]. Según la definición se encontró que existen tres tipos de biomasa:

- Biomasa Natural:

«La biomasa natural es aquella que se genera en los ecosistemas naturales, sin ningún tipo de intervención por parte del ser humano. La leña o las ramas son un ejemplo de este tipo de biomasa. El problema es que la explotación intensiva de este recurso no respeta la protección del medio ambiente, por lo que ya no estaríamos hablando de un tipo de combustible renovable y ecológico» [30].

- Biomasa residual:

“La biomasa residual es aquella que se genera a partir de actividades que el hombre realiza, como, por ejemplo, actividades agrícolas, ganaderas, la industria maderera o agroalimentaria. Su eliminación a veces supone un problema, por lo que convertir estos residuos en un recurso para crear un combustible sostenible es una muy buena opción” [30].

“Este es el tipo de biomasa que más ventajas aporta a la hora de utilizarlo como combustible, ya que no genera contaminación, no se daña el medio natural, los costes de producción y transporte son bajos y, además, se generan puestos de trabajo gracias a esta actividad” [30].

- Excedentes agrícolas:

“Los excedentes agrícolas que, por distintos motivos, no se utilizan para la alimentación humana, pueden usarse como combustible en plantas de generación eléctrica y también como biocombustibles” [30].

- Cultivos energéticos:

“Se trata de cultivos exclusivamente dedicados a la producción de energía. Algunos cultivos tradicionales como los cereales o la caña de azúcar pueden formar parte de los cultivos de energía, así como otros menos comunes como la cynara, petaca o el sorgo dulce” [30].

Según el investigador Junmeng Cai y co. las propiedades fisicoquímicas son puntos de referencia para el diseño de procesos y plantas, estas propiedades se dividen en físicas, químicas y térmicas. “Las propiedades químicas y físicas de la materia prima de biomasa tienen un impacto significativo en cada uno de los pasos de procesamiento durante estos procesos de conversión” [26]. A continuación, se presenta dichas propiedades:

## 2.5 Propiedades

### 2.5.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de la lignocelulosa son el tamaño de partícula, densidad, fluidez, sorción de humedad.

a. El tamaño de partícula parametriza las instalaciones de alimentación, trituración y almacenamiento [31]. Según el investigador Junmeng Cai esta propiedad afecta la mezcla y fluidización, el área de superficie para la transferencia de calor y masa y el comportamiento de flujo de las partículas de biomasa, por esto mismo dependiendo de la materia prima según su forma y tamaño va a tener diferente eficiencia de conversión y así mismo va a requerir una mayor o menor energía en la entrada del proceso [32].

b. La molienda nos permite reducir el “tamaño de partícula, que está relacionada con otra propiedad física: la molturabilidad. La capacidad de trituración de un material es una medida de su resistencia al triturado. Los componentes lignocelulósicos de la biomasa, especialmente la celulosa y la lignina, son muy fibrosos y difíciles de moler” [31]. Según el investigador Junmeng Cai el BWI (BOND WORK INDEX) es un método con el cual se puede estimar la moldeabilidad de la biomasa, se define como la energía específica calculada aplicada para reducir tamaño de partícula al 80% pasando 100  $\mu\text{m}$ . Cuanto mayor sea el valor de BWI será necesaria aún más energía para moler el material además del tamaño de partícula también afecta el contenido de humedad, las propiedades del material, la velocidad de alimentación de la masa y las variables de la máquina como el tipo de equipo de molienda [32].

c. La densidad el cual genera parámetros para el almacenamiento y transporte, la fluidez que genera parámetros para la manipulación, alimentación y almacenamiento [31]. La densidad en este tipo de procesos se puede medir utilizando dos tipos de densidades: La densidad de partículas y la densidad aparente [32]. “Para un grupo de partículas de biomasa, la densidad de partículas es la masa de todas las partículas dividida por el volumen que ocupan las partículas excluyendo el volumen del espacio poroso” [32]. “Para las partículas de biomasa que no se pueden definir geométricamente, su volumen real se puede determinar por la diferencia de presión con una cantidad conocida de gas presurizado que fluye desde un volumen de referencia a una celda que contiene partículas de biomasa” [32]. «La densidad aparente es la relación entre la masa de partículas de biomasa y el volumen total de partículas de biomasa, incluido el volumen del espacio

poroso entre y dentro de las partículas de biomasa. Depende del tamaño y la forma de las partículas de la biomasa, el contenido de humedad, la densidad de partículas y las características de la superficie» [32].

Según el investigador Junmeng Cai y co. al medir las densidades aparentes de diferentes materias primas de biomasa se puede ver que hay una variación extrema, desde mínimos de 15 - 200  $Kg/m^3$  para pajitas de cereales hasta máximos de 280 - 480  $Kg/m^3$  para astillas de madera dura, normalmente

la densidad de la biomasa lignocelulósica es relativamente baja la densidad de esta depende principalmente del grado de estanqueidad del llenado [32]

d. La fluidez “Las propiedades de flujo de las materias primas de biomasa juegan un papel importante en el transporte, almacenamiento y manipulación”[31]. “La fluidez, como propiedad de flujo principal, es una medida de que tan bien fluye la biomasa de un punto a otro” [32].

«Se informa comúnmente de varios parámetros para caracterizar la fluidez de la biomasa: el ángulo de reposo, el coeficiente de cohesión, el índice de compresibilidad y el índice de flujo [59]. El ángulo de reposo es el ángulo más pronunciado en el que un montón de partículas de biomasa puede permanecer estable sin desplomarse [60]. Puede variar de 0 ° a 90 °» [25].

e. La sorción de humedad El contenido de humedad nos permite diseñar instalaciones de secado, manipulación, almacenamiento, alimentación y procesos de conversión [25]. “Por lo tanto, se requieren operaciones adecuadas de secado y almacenamiento para preservar la calidad de las materias primas de biomasa” [32]. Según el investigador C. Luke Williams el contenido de humedad es una de las propiedades que más problemas causa en las operaciones de biorefinación, ya que aumenta los costos del transporte del proceso debido a que la molienda en seco necesita mayor energía además de ello el valor calorífico de la biomasa se estima que se reduce en un 10% lo que afecta la conversión termoquímica [26].

Según el investigador Junmeng Cai y co. uno de los parámetros claves es la humedad de equilibrio (EMC) el cual es un parámetro clave para caracterizar el comportamiento de absorción de agua de la biomasa, la definición de la propiedad es el contenido de humedad que tiene un material en equilibrio con respecto a la temperatura y humedad relativa [32]. Dicha EMC depende de su composición, porosidad, microestructuras y área de superficie específica.

“La isoterma de adsorción de humedad se usa para obtener la relación entre el contenido de agua y la humedad de equilibrio en el equilibrio. Para cada humedad, una isoterma de sorción indica el valor correspondiente del contenido de agua a una temperatura constante dada” [32].

Se han realizado pruebas sobre los contenidos de humedad de equilibrio en diferentes tipos de biomasa y los resultados mostraron que el proceso de adsorción de biomasa se puede dividir en dos rangos: procesos de adsorción rápida y adsorción lenta y la EMC depende principalmente del tipo de biomasa y la humedad ambiental [32].

## **2.6 Propiedades termofísicas**

Entre las propiedades termoquímicas encontramos la conductividad térmica y calor específico.

### **a. Conductividad térmica**

Cuando la biomasa se calienta en procesos de conversión termoquímica, las partículas de biomasa están sujetas a conducción de calor a lo largo y a través de su fibra, lo que a su vez influye en su comportamiento de conversión termoquímica [25]. Según el investigador Junmeng Cai a raíz de métodos que se desarrollaron Manson y col. para determinar las conductividades térmicas de la biomasa a partir de dicho desarrollo se descubrieron algunas de las conductividades térmicas de diferentes tipos de biomasa, algunas de estas conductividades fueron los pellets de miscanto y el sauce los cuales están entre 0,10 y 0,12  $Wm^{-1}k^{-1}$ , mientras que los residuos agrícolas (como el trigo y las pajas de colza) tienen un valor relativamente bajo de 0,05  $Wm^{-1}k^{-1}$ . La conductividad térmica depende de la dirección del calentamiento, la humedad, la porosidad, la densidad y el contenido de humedad [32].

### **b. Calor específico**

“El calor específico, que es una indicación de la capacidad calorífica de un material, es otra propiedad térmica importante de la biomasa que a menudo se requiere para los cálculos termodinámicos” [25].

### 3.7 Propiedades químicas

Las propiedades químicas que podemos encontrar el contenido de cenizas, contenido de material volátil, contenido energético, cantidad de humedad, el carbono fijo.

a. El contenido de cenizas el cual permite estimar el potencial de problemas de formación de escoria e incrustaciones durante la combustión o gasificación esto dependerá del proceso [31]. Según el investigador Junmeng Cai y co. los principales compuestos de la ceniza de biomasa son el óxido de sílice, aluminio, hierro, calcio, magnesio, titanio, sodio y potasio [32].

b. El contenido de material volátil nos parametriza la eficiencia de conversión al igual que la composición elemental [31]. Según el investigadó la materia volátil de la biomasa es el vapor condensable y los gases permanentes (sin incluir el vapor de agua) liberados de la biomasa cuando se calienta, para Chouhan y Sarma un mayor contenido de materia volátil hace que se obtenga una alta cantidad de bioaceites, la cantidad [26].

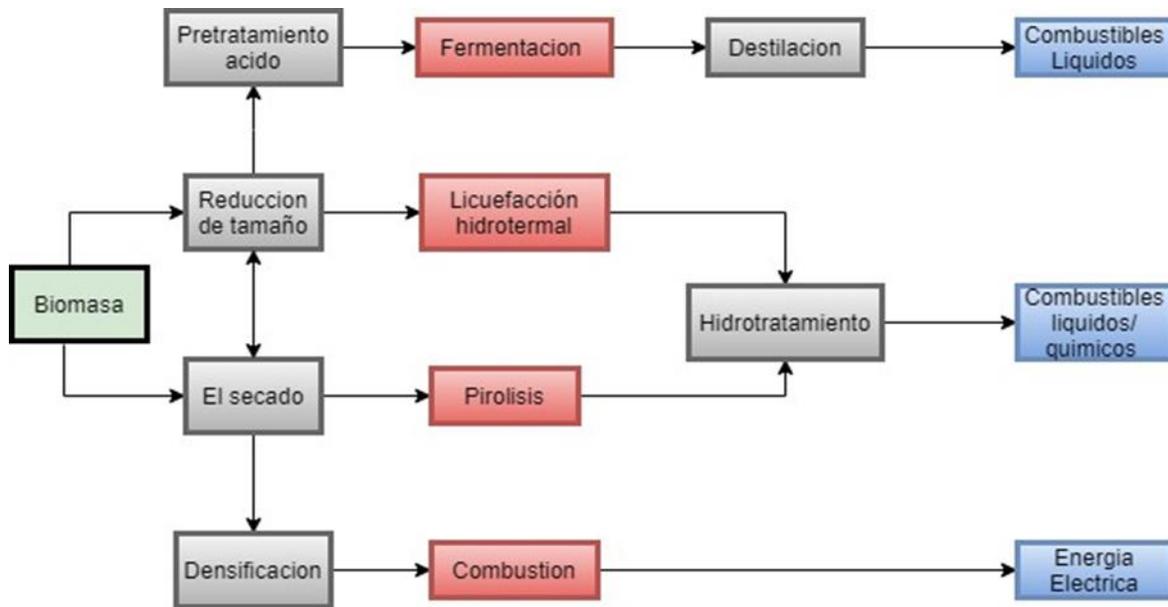
c. La cantidad de humedad «representa la cantidad de agua en la biomasa, expresada como porcentaje del peso del material. Tiene una fuerte influencia no solo en la cosecha y preparación, sino también en el transporte, almacenamiento, procesamiento y los productos resultantes. La humedad en la biomasa puede permanecer en formas externas e inherentes. La humedad externa es la que está por encima del contenido de humedad de equilibrio» [32]. “Generalmente reside fuera de las paredes celulares. La humedad inherente se absorbe con las paredes celulares” [32].

d. El carbono fijo según el investigador Junmeng Cai y co. es el residuo combustible sólido que sobra cuando se caliente algún tipo de biomasa y se expulsa la materia volátil [32].

Entender la propiedades químicas y físicas nos permite “la comprensión de cómo las operaciones de preprocesamiento y la variabilidad natural afectan las propiedades físicas y químicas y cómo esas propiedades alteradas mejoran la conversión en energía y combustibles es clave para desarrollar una producción optimizada y sostenible de combustibles renovables, productos químicos y otros productos biológicos” [31]. Para este tipo de industria hay cuatro tipos de conversión, fermentación, licuefacción hidrotermal (HTL), pirólisis y combustión / co-combustión. Esto se puede evidenciar en la Figura 1.

**Figura 19**

*Representación de métodos de conversión para la Biomasa*



*Nota.* La figura representa las formas de conversión como fermentación, licuefacción hidrotermal, pirólisis y combustión de la biomasa para la obtención de productos químicos y combustibles/co-cocción. Tomado de Williams, C. L. et al, (Nov 23,2015). "Sources Of Biomass Feedstock Variability And The Potential Impact On Biofuels Production." Bioenergy Research. Available: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1251425>.

Como se evidenció anteriormente existen factores que afectan el rendimiento del proceso tanto directa como indirectamente como dice el investigador C. Luke Williams un ejemplo de ello es el contenido de humedad el cual no sólo afecta directamente el rendimiento de la conversión, sino que también afecta el rendimiento de la molienda en seco y las distribuciones del tamaño de partícula [31].

## **2.7 Biomasa lignocelulósica del maíz**

Para realizar el diseño conceptual de una biorrefinería se debe tener en cuenta las características de la biomasa o biomasas que se vayan a utilizar como ya se vio existen muchas propiedades que pueden afectar el rendimiento de una biorrefinería lo que puede hacer que se presente una falla tecno económica, ahora bien, el rendimiento no solo se afecta por dichas propiedades sino también por el tipo de proceso que se utilice. En esta sección estudiaremos las características fisicoquímicas y morfológicas del residuo de maíz.

Según la investigadora Allison E. Ray las propiedades del maíz cultivado en Iowa han demostrado fuentes clave de variabilidad que provienen de factores ambientales y de producción las cuales afectan las propiedades de la biomasa, las evaluaciones preliminares que se le realizaron a los rastrojos del maíz se identificaron un rango de variabilidad en carbohidratos estructurales, lignina y cenizas, entre los factores ambientales están los cambios climáticos extremos, como la sequía ayudan a la reducción del rendimiento de la biomasa [33].

«Los azúcares extraíbles acumulados en respuesta a las presiones osmóticas experimentadas durante la sequía son propensos a degradarse durante el pretratamiento químico en detrimento de la fermentación y el rendimiento del producto. Las condiciones durante el almacenamiento imparten distintos cambios a lo largo del tiempo, donde la alta humedad junto con la exposición al oxígeno conduce a la degradación biológica que da como resultado la pérdida de carbohidratos valiosos, dejando la biomasa agotada en componentes fermentables. Es esta interacción compleja de muchos factores lo que crea desafíos significativos para procesos descendentes, que a menudo requieren materias primas física y químicamente consistentes. La variabilidad de la biomasa ha demostrado ser un desafío formidable para el procesamiento descendente en la industria emergente de biorefinación, impidiendo las operaciones de alimentación y reduciendo los rendimientos de conversión y la selectividad» [33].

Para la investigación colombiana liderada por el investigador Sergio D. Fonseca y co. el cual estudió la caracterización de residuos de maíz en el municipio de Ventaquemada el cual está ubicado en departamento de Boyacá, Colombia se encontró que tiene un poder calorífico de 17.965 MJ Kg<sup>-1</sup>, para esta prueba se utilizó 1 g de biomasa el cual fue molido y tamizado, el valor conseguido es bajo en comparación con la investigación hecha por Kumar et al (2008) la cual encontró que el poder calorífico es de 18,4 MJ Kg<sup>-1</sup>. Para el contenido de lignina se registró que la biomasa tiene un contenido de 14,7% al igual que en el poder calorífico se utilizó 1 g de biomasa. [34] En el análisis de base seca base húmeda se conocieron los porcentajes contenidos en la materia prima de los elementos químicos los resultados obtenidos los vemos en la siguiente tabla:

**Tabla 2***Análisis base seca base húmeda*

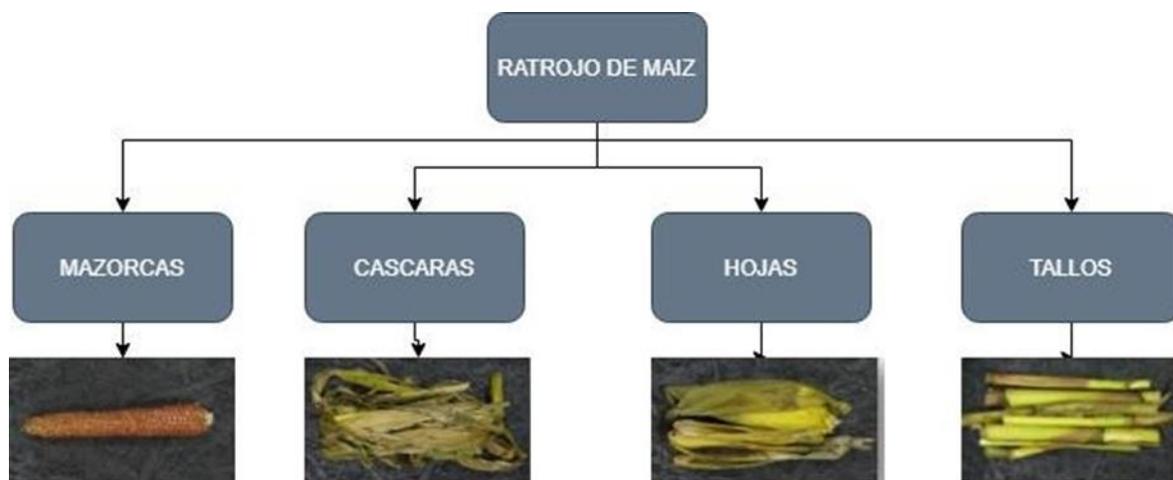
	<b>Base húmeda</b>	<b>Base seca</b>
<b>Humedad (%)</b>	4,39	-
<b>Análisis elemental</b>		
Carbono; C; %	40,05	41,89
Hidrógeno; H; %	5,34	5,58
Oxígeno; O; %	38,23	39,99
Nitrógeno; N%	0,76	0,80
Azufre; S; %	0,10	0,10

*Nota.* Esta tabla muestra los porcentajes de composición de la biomasa del maíz en Colombia (municipio Ventaquemada) en base seca y húmeda. **Tomado de** S. D. Fonseca, H. A. Rodríguez and G. Camargo, "Caracterización De Residuos De Maíz Del Municipio De Ventaquemada Colombia Characterization Of Waste Corn Of The Municipality Of Ventaquemada Colombia," 2017. Disponible

De acuerdo con el análisis realizado de la composición química del rastrojo de maíz (mazorca, cáscara, hojas de maíz y tallos) reveló que el contenido de carbono, nitrógeno y oxígeno depende de la fracción del maíz en cambio el contenido de Hidrógeno en todas las fracciones no fue significativo [35].

**Figura 20**

*Partes del rastrojo de maíz*



**Nota.** Los valores medios (n)  $\pm$  desviación estándar. **Tomado de** Woźniak, M. et al, (Mar 20, 2021). "Chemical And Structural Characterization Of Maize STOVERFRACTIONS In Aspect Of Its Possible Applications." Materials. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33804750>. DOI: 10.3390/ma14061527.

Según diferentes estudios se ha encontrado la composición de las fracciones que componen el rastrojo de maíz en diferentes países.

**Tabla 3***Composición química de las fracciones de rastrojo de maíz*

<b>Fracción</b>	<b>C (%)</b>	<b>N (%)</b>	<b>C: N</b>	<b>H (%)</b>	<b>O (%)</b>
Mazorca	44,81 ± 0,04	0,53 ± 0,04	84 ± 7	5,93 ± 0,04	45,03 ± 1,00
Cáscara	43,79 ± 0,17	0,53 ± 0,06	83 ± 8	6,00 ± 0,26	43,15 ± 0,92
Hojas	43,31 ± 0,06	0,96 ± 0,05	45 ± 2	5,72 ± 0,04	41,91 ± 0,49
Tallos	43,73 ± 0,11	0,30 ± 0,00	147 ± 1	5,55 ± 0,07	41,35 ± 0,78
n	3	3	3	3	3

**Nota.** Los valores medios (n) ± desviación estándar. **Tomado de** Woźniak, M. et al, (Mar 20, 2021). "Chemical And Structural Characterization Of Maize Stoverfractions In Aspect Of Its Possible Applications." Materials. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33804750>. DOI: 10.3390/ma14061527.

En la tabla anterior vemos el contenido de carbono en los tallos del maíz analizado (47,73%) fue menos que en la cascara del tallo (47,87%) y medula del tallo (44,69%) de maíz de los notificados en Story Country, IA, EE. UU. [36]. El contenido de nitrógeno en los tallos (0,30%) y las hojas (0,96%) del maíz estudiado fue menor en comparación con los del tallo (0,95 - 1,04%) y las hojas (1,21%) del maíz de Hernán, China [37]. El contenido porcentual de carbono en las mazorcas analizado (44,8%) fue similar al del maíz de Malasia (43,8%) y menor al de las mazorcas cosechadas en Turquía (49,0%) Serbia (47,6%), Hawai (47,0%) y China (48,1%) [38] [40], entretanto que el contenido de nitrógeno en las mazorcas analizadas (0,5%) fue equiparable al nivel en las mazorcas de Turquía (0,5%), Serbia (0,6%) y Hawai (0,5%) y es menor que en las mazorcas de maíz de Malasia (0,8%) o China (1,9%) [39][40][34][36]. El contenido de hidrogeno en las mazorcas de maíz de Polonia (5,9%) fue superior al de Turquía (5,3–5,6%) e inferior al de Malasia (6,5%), Serbia (6,3%), Hawaii (6,4%) y China (6,5%) [39][40][41][43]. Por otro parte, el contenido de oxígeno en las mazorcas estudiado (45,0%) fue mayor que en las mazorcas de Turquía (43,8-44,7%), Serbia (43,9%), Hawaiana (43,9%) y China (43,5%) y menor que en las

muestras de mazorcas de Malasia (48,2%) de maíz [39][40][41][43]. Las fracciones de rastrojo de maíz difieren en su composición elemental, que a su vez está relacionada con las condiciones climáticas, la variedad de maíz, el tiempo de cosecha y el tipo de suelo [41].

En cuanto a Colombia el análisis del investigador Sergio D. Fonseca y co. también se realiza el análisis Termogravimétrico (TGA) el cual mide la masa de una muestra mientras esta última se calienta o se enfría a una atmósfera determinada esto se hace para caracterizar materiales en lo que respecta a la composición, en este caso se utilizaron tres rampas de calentamiento las cuales estaban a 5, 10 y 20 °C  $min^{-1}$  con un rango de temperatura de 0 a 800°C y a una atmósfera oxidante con flujo 30 mL  $min^{-1}$ [34].

Estos instrumentos de análisis termogravimétrico estas compuestos por una balanza la cual debe ser capaz de pesar muestras de entre 1-100 mg con un margen de error de 10-4mg, este instrumento también contiene un horno el cual debe medir desde temperatura ambiente hasta 1500°C el cual debe ser programable, para estos instrumentos se utilizan sistemas de gases como lo son los inertes ( $N_2$ ,  $Ar$ ), oxidantes ( $O_2$ , *aire*) y reductores ( $N_2$ ) [34].

“Se dan tres etapas principalmente; la primera es la deshidratación, la segunda es el pirólisis activa que es donde se presenta una pérdida de peso muy rápida y por último la pirólisis pasivo donde se presenta una continua y lenta pérdida de peso. Estas etapas presentan una variación en la temperatura.” Además, a partir de dicho estudio de la investigación de Sergio D. Fonseca y co. se encontró que la energía mínima de activación de dicha biomasa es de 46,23 KJ  $mol^{-1}$  [34].

Según la Doctora Ana Isabel de Lucas Herguedas no todos los residuos disponibles deben ser utilizados como biomasa para uso combustible ya que hay motivos medioambientales y económicos en los cuales se puede utilizar dicha biomasa con mejor provecho, por lo tanto se hace necesario estimar cuánto residuo se puede obtener en una producción comercial, por ello se realiza un estudio en función de la variedad utilizada y el sistema de cultivo (secano o regadío) como se puede ver en la siguiente tabla [42]:

**Tabla 4**

*Cantidad de residuo respecto al producto*

<b>CULTIVO AGRÍCOLA</b>	<b>kg residuo / kg producto</b>
Trigo, cebada, avena	0,6-1,3
Centeno	1,0-1,5
Maíz	0,8-2,0
Arroz	0,5-1,0
Sorgo	1,0-2,0
Girasol	0,7-2,0
Hortícola	Muy variable

*Nota.* En esta tabla podemos ver la relación de kg de residuo respecto al kg de producción dependiendo del tipo de cultivo. **Tomado de** Lucas Herguedas Ana Isabel et al, "Biomasa, Biocombustibles Y Sostenibilidad," 2012.

Según la investigación hecha por Sudhagar Mani y co. en la que podemos encontrar las caracterizaciones de rastrojo como el tamaño de partícula, la densidad, la humedad. En la investigación se recogió el rastrojo de maíz dulce cultivado en Saskatchewan, Canadá las cuales tenían un contenido de humedad del 6,2%. En el análisis del tamaño de partícula donde el tamizado se realizó con una malla de 3,2 mm se encontró que el diámetro de partícula fue de 0,41 mm. Para otra muestra donde se utilizó un malla entre 1,6 y 0,8 mm se encontró que el diámetro de partícula medio geométrico fue de 0,34 y 0,28 mm, para este caso la distribución de partícula adecuada es el rango estrecho con más partículas finas debido a que favorece la hidrólisis enzimática de

lignocelulosas debido a que se genera más área de superficie y espacios porosos durante la molienda fina, al final del proceso se obtuvo que el rastrojo de maíz es una de las biomásas que menos cantidad de humedad tiene lo cual facilita moler dicha biomasa. La molienda de rastrojo de maíz tiene una densidad de partícula y de volumen altas [43], como se muestra a continuación:

**Tabla 5**

*Propiedades físicas de la biomasa triturada*

<b>Biomasa</b>	<b>Contenido de humedad (%wb)</b>	<b>Tamaño de la pantalla del molino de martillos (mm)</b>	<b>Diámetro de partícula medio geométrico (mm)</b>	<b>Desviación estándar geométrica (mm)</b>	<b>Densidad aparente (kg <math>m^{-3}</math>)</b>	<b>Densidad de partícula (mg <math>m^{-3}</math>)</b>
Rastrojo		3,2	0,41	0,26	131	1,17
de maíz	6,22	1,6	0,26	0,45	156	1,33
		0,8	0,19	0,31	1580	1,34

*Nota.* Se realizaron tres muestras con el fin de obtener diferentes tamaños de partículas y se midieron sus propiedades físicas. **Tomado de** Mani, S., L. G. Tabil and S. Sokhansanj, 2004). "Grinding Performance And Physical Properties Of Wheat And barley Straws, Corn Stover And Switchgrass." *Biomass & Bioenergy*. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.03.007>. DOI:10.1016/j.biombioe.2004.03.007.

Sin embargo, el investigador Zhang Kun y co. el cual realizó una investigación sobre la producción de hidrógeno fermentativo por medio de rastrojo de maíz donde se aconseja un tamaño de partícula de 0,2 a 0,4 mm [44]. "La composición principal del polvo de rastrojo de maíz contenía 38,7% de glucano, 20,3% de xilano, 18,2% de lignina y 4,2% de ceniza" [44].

Otro de los parámetros importantes es la densidad aparente el cual nos permite estimar los espacios de manipulación, transporte y almacenamiento lo cual afecta el transporte y por ello mismo los costos de almacenamiento como podemos ver la densidad aparente tiene gran influencia en la

transportabilidad. Hay una relación inversa entre la densidad aparente y contenido de humedad de la materia prima, por lo tanto, la densidad aparente de los biocombustibles sólidos debe identificarse utilizando el contenido de humedad [45].

**Tabla 6**

*Densidad aparente, el poder calorífico y el contenido de cenizas del rastrojo de maíz*

<b>Materia prima</b>	<b>Valor promedio</b>			
	<b>Densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Poder calorífico (MJ/kg)</b>	<b>Contenido de Cenizas (%)</b>	<b>Durabilidad Mecánica</b>
<b>Rastrojo de maíz</b>	111	16,4 – 17,4	5,9 a 7,3	75,2

*Nota.* Se tomó la densidad promedio y con ella el contenido de cenizas y la durabilidad mecánica. Tomado de J. Shojaeiarani, D. S. Bajwa and S. G. Bajwa, "Peer-Reviewed Review Article Properties Of Densified Solid Biofuels In Relation To Chemical Composition, Moisture Content, And Bulk Density Of The Biomass

A su vez esta densidad también afecta la densidad energética, esta relación es directamente proporcional, es decir, a mayor densidad aparente mayor densidad energética y a menor densidad aparente menor densidad energética [45].

La composición de sólidos totales, fijas y volátiles se presentan enseguida [46]:

**Tabla 7***Composición física del rastrojo de maíz*

<b>Variable</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor teórico</b>	<b>Valor práctico</b>
Sólidos Totales (ST)	g ST/g	0,94	0,913
Sólidos Fijos	g SF/g	-	0,135
Sólidos Volátiles (SV)	g SV/g	0,874	0,778

*Nota.* Comparación de valores teóricos y prácticos de algunas propiedades físicas **Tomado de** Simbaqueva Aguilera, A. M. and M. A. Urrego León, .2019."Evaluación De La Producción De Metano En La Digestión Anaerobia De La Especie Invasora Retamo Espinoso Y El Residuo Agrícola Rastrojo De Maíz Mediante El Uso De Un Biorreactor Batch." Universidad El Bosque.

Asimismo, es necesario conocer las composiciones químicas que contiene el rastrojo de maíz [47]:

**Tabla 8***Composición del rastrojo de maíz*

<b>Cultivo</b>	<b>Extraí bles</b>	<b>Lignina</b>	<b>Ácido Uronico</b>	<b>Arabi nano</b>	<b>Xilano</b>	<b>Manano</b>	<b>Galac tano</b>	<b>Celulosa</b>
Rastrojo de maíz	5,61	18,59	2,99	2,42	21,61	0,38	0,87	37,69

*Nota.* Composición de algunos cultivos energéticos prospectivos Tomado de Carroll, A. and C. Somerville, 2009)."Cellulosic Biofuels" Annual Review of Plant Biology. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19014348>. DOI: 10.1146/annurev.arplant.043008.092125

## **2.8 Estructura de la biomasa lignocelulósica**

La "biomasa en forma de residuos de cultivos es el recurso renovable más abundante y fácilmente accesible. El trigo, el arroz y el maíz son los principales cultivos de cereales en todo el mundo y se considera que son las principales fuentes de biomasa lignocelulósica residual" [41]. "La biomasa lignocelulósica se compone de madera, césped, hojas, rastrojo agrícola, residuos de cultivos, residuos forestales y fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. Se dice que la

producción de biomasa lignocelulósica ronda los 0,22 billones de toneladas” [19]. La biomasa lignocelulósica está compuesta de celulosa y hemicelulosa conocidas colectivamente como holocelulosa [19]. «Esta combinación de celulosa y hemicelulosa está rodeada de un material recalcitrante, la lignina. Para la producción de bio-hidrógeno, se necesita holocelulosa, ya que consta de polisacáridos C6 y C5 lineales y ramificados. Por ejemplo, glucosa, manosa, xilosa y arabinosa son ejemplos comunes de azúcar presente en la biomasa lignocelulósica. Sin embargo, la lignina muestra una naturaleza recalcitrante en la producción de bio-hidrógeno y disminuye la eficiencia de conversión y la eficiencia de la biomasa lignocelulósica en bio-hidrógeno» [19]. La naturaleza robusta de la lignina es responsable del bajo rendimiento de la conversión directa de biomasa lignocelulósica al bio-hidrógeno [19].

### **2.8.1 Celulosa**

La celulosa es un polímero el cual es amplio y estable que hace parte de la naturaleza, dentro de la biomasa lignocelulósica la celulosa es el 40% al 45% la estructura de la celulosa tiene una estructura cristalina y amorfa siendo la estructura cristalina mayor que la amorfa. Se prefiere la estructura amorfa en la celulosa que la cristalina debido a que la estructura cristalina dificulta la degradación [19].

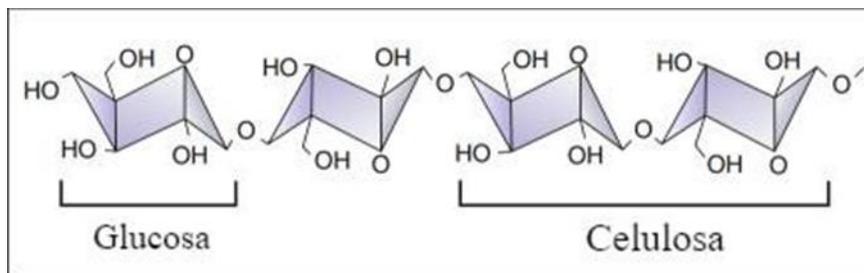
Debido a que los enlaces de hidrógeno la celulosa tiene una naturaleza recta, estos enlaces de hidrógeno que están entre cadenas presentes en la celulosa son los que deciden la disposición natural [19].

“Los enlaces de hidrógeno inter e intramoleculares que existen en la celulosa la hacen rígida por naturaleza. Esta naturaleza rígida de la celulosa se opone a cualquier solubilización en disolvente orgánico y se muestra resistente a ella [19].

La estructura química de la celulosa es un homopolímero lineal el cual a su vez está compuesto por unidades de D-glucopiranosas las cuales están unidas por enlaces  $\beta$  - 1,4- glicosídicos esta unidad repetitiva es llamada celobiosa, la celulosa está principalmente compuesta por el Carbono con un 44,44%, Hidrógeno con 6,17% y por último Oxígeno (49,39 %). La fórmula química de la celulosa es  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , donde n; es el grado de polimerización [48].

## Figura 21

### *Estructura de la cadena molecular de la celulosa*



**Nota.** Se muestra la composición de la Glucosa y la celobiosa la cual se compone de glucosa. Tomado de H. Chen, "Biotechnology Of Lignocellulose" in Anonymous Springer, Beijing: 2014, pp. 25-71.

Por la parte de la estructura física la celulosa está compuesta por; la estructura de la cadena y la agregación del polímero y la estructura de agregación del polímero, la primera también conocida como estructura primaria nos muestra la disposición geométrica de los átomos o grupos de la cadena molecular. La estructura de corto alcance es la estructura química o estructura estereoquímica. La estructura remota muestra el tamaño de un polímero de una sola molécula. La estructura de agregación o también llamada estructura secundaria es la estructura interna de todo el polímero, es decir, la estructura cristalina y no cristalina, estructura de orientación y la estructura de cristal líquido. La estructura de tercer nivel se refiere cómo las moléculas en un agregado polimérico se acumulan entre sí, como la estructura de eslabones tangibles y la estructura cristalina formada con cadenas de plegado ordenadas. La estructura de la cadena del polímero es la jerarquía estructural principal que refleja muchas características de un polímero, como el punto de fusión, la densidad, la solubilidad, la viscosidad, la adhesión, etc. La estructura de agregación de un polímero es el factor principal que determina el rendimiento de servicio de los productos compuestos macromoleculares [48].

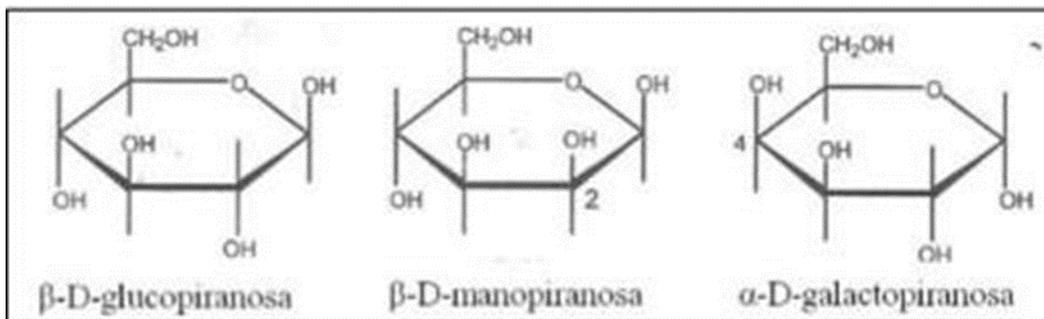
### **2.8.2 Hemicelulosa**

La Hemicelulosa tiene alrededor del 30% de la biomasa lignocelulósica lo cual hace que sea el segundo polímero más abundante en la tierra. La hemicelulosa tiene un peso molecular de 30000 g/mL y a diferencia de la celulosa está hecha de polímeros heterogéneos los cuales consisten en cadenas laterales de varios azúcares como pentosas hexosas y ácidos orgánicos [19], los

monosacáridos principales que encontramos en las hemicelulosas son cinco; tres hexosas: glucosa, manosa y galactosa (Figura 10), y dos pentosas: xilosa y arabinosa (Figura 11) [49]. Dependiendo del tipo de biomasa lignocelulósica puede contener menos o más hemicelulosa por ejemplo la hierba y los rastrojos agrícolas se componen principalmente de xilano, mientras que el glucomanano es el componente principal de las maderas blandas [19].

**Figura 22**

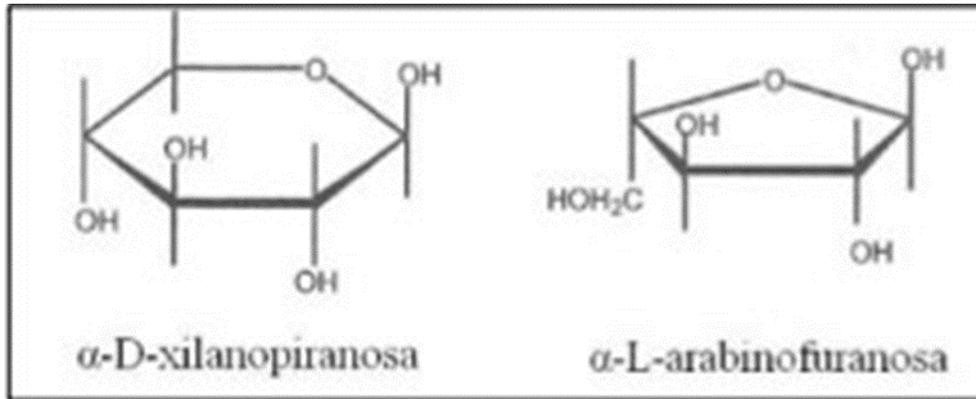
*Representación de Hawort de las principales hexosas presentes en las hemicelulosas*



**Nota.** Los monosacáridos que se presentan en la hemicelulosa son la glucosa, manosa y galactosa. Tomado de Palacios Bau, M. G., .2016."Caracterización Química De La Biomasa Procedente De Las Hojas, Pseudotallo, Raquis Y Pseudopécíolo De La Planta De Banano Y Su Relación Con El Poder Calorífico." Universidad de Cuenca.

### Figura 23

*Representación de Hawort de las principales hexosas presentes en las hemicelulosas*



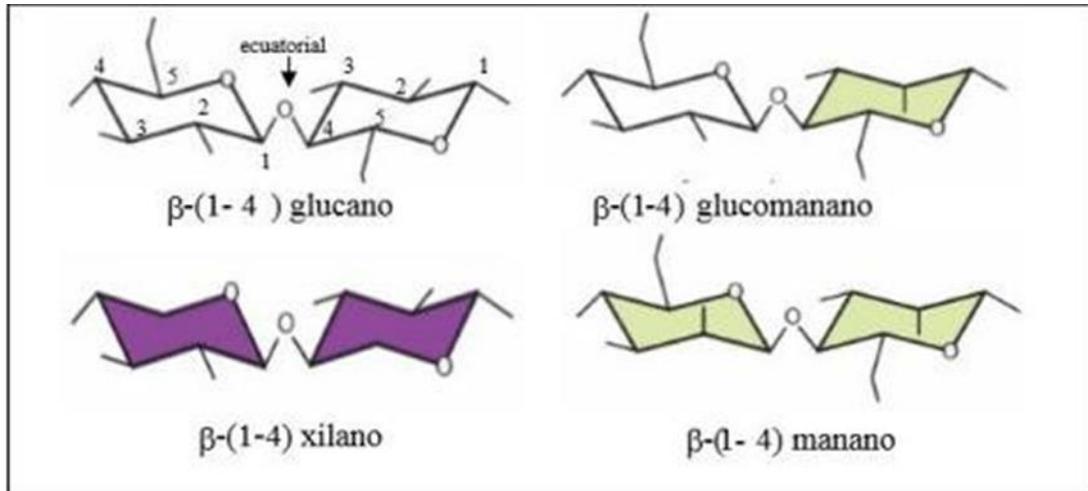
**Nota.** Los monosacáridos que se presentan en la hemicelulosa son la Xilano y Arabinosa.

**Tomado de** Palacios Bau, M. G., .2016."Caracterización Química De La Biomasa Procedente De Las Hojas, Pseudotallo, Raquis y Pseudopéculo De La Planta De Banano Y Su Relación Con El Poder Calorífico." Universidad de Cuenca.

Los principales componentes polisacáridos de la Hemicelulosa son el Xilano, Xiloglucano, glucomanano, maná, galactomano, calosa, etc.

**Figura 24**

*Enlaces que componen la hemicelulosa*



*Nota.* Los enlaces que se presentan en la hemicelulosa. Tomado de Palacios Bau, M. G., .2016."Caracterización Química De La Biomasa Procedente De Las Hojas, Pseudotallo, Raquis Y Pseudopécíolo De LA Planta De Banano Y Su Relación Con El Poder Calorífico." Universidad de Cuenca.

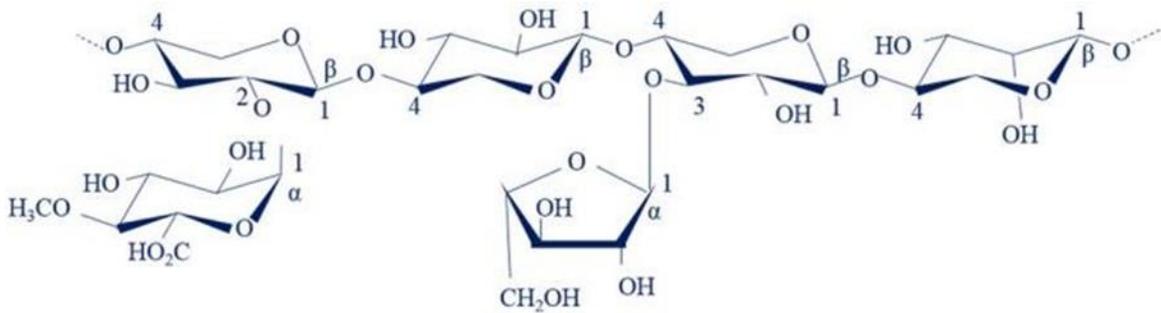
La Hemicelulosa de Xilano está compuesto por D-xilosilas los cuales se unen entre sí y forman cadenas lineales homopolímeras como cadena principal, esta cadena principal es llamada 1,4-β-D-xilopiranosaque a su vez tiene ramificaciones llamadas ácido 4-oximetilglucurónico, este compuesto es llamado xilano hemicelulosa el cual es un tipo de polisacárido y glucano que se encuentra en frondosas y gramíneas. Las gramíneas tienen una estructura la cual se compone β-1,4-xilopiranosilo los cuales están unidos por enlaces β-1,4-glicosídicos [48], para las cadenas ramificadas estas están compuestas por L-arabinofuranosilo y D-glucuronopiranosilo, estas están enlazadas a la cadena principal en el C3 y C2, aparte de estas dos cadenas existen cadenas compuestas por xilosilos y acetato de xilosilo [48].

Otro de los componentes polisacáridos de la hemicelulosa es el manano hemicelulosa el cual se presenta más en maderas blandas y en maderas duras se presenta un porcentaje más bajo, estructura química del manano tiene una cadena principal la cual tiene compuestos como la glucosa, xilosa y/o manosa los cuales tienen enlaces β-(1→4) [40], todos en posición ecuatorial en C1 y C4 y ocasionalmente α-1,6.[41]

La estructura del xiloglucano es similar a la celulosa, ambas están compuestas por D-glucopiranosas los cuales se enlazan por medio de enlaces  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4); sin embargo; el xiloglucano se diferencia en un 75% de la celulosa, los residuos de glucosilo se reemplazan por  $\alpha$ -D-xilopiranosas en O-6 en la cadena principal del primero. El xiloglucano está compuesto por los monosacáridos glucosa, xilosa y galactosa, la proporción residual de estos monosacáridos es de 4:3:1. [50]

**Figura 25**

*Estructura de la hemicelulosa*



*Nota.* Estructura de la hemicelulosa que consta de ramas laterales de ácido glucurónico y arabinofuranosa Tomado de O. Benaimche et al, “The Utilization Of Vegetable Fibers In Cementitious Materials.” 2015. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11596-6>. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11596-6.

La estructura química del manano incluye el manano, galactomanano, glucomanano, ácido glucurónico manano, etc. Los residuos de manosa están enlazados a través de enlaces  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) para formar manano, en el caso del galactomanano se produce mediante la unión de manosa y galactosa por medio de enlaces  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 6), para el glucomanano está compuesto de glucosa y manosa los cuales están unidos por enlaces  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) y por último el ácido glucurónico manano están unidos por enlaces  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 2) existen alternativamente en la cadena principal del ácido glucurónico, cuyas cadenas laterales no solo tienen  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 6) - xilosa o galactosa unidas pero también tienen  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 3) arabinosa unidas [50].

La estructura del galactano y arabinogalactano, para el galactano se tienen los residuos de galactosa los cuales tienen enlaces  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) lo cual forma la columna vertebral, la cadena lateral está unida a O-6 la cual está compuesta por residuos de galactosa hay dos tipos de arabinogalactano: el tipo común tiene residuos de galactosa terminales unidos en O-3 u O-6, residuos de galactosa unidos

en O-3 u O-6 y residuos de arabinofuranosa unidos en O-3 u O-5. Otro tipo tiene restos de galactosa unidos por enlaces O-4 o O-3 y O-4 y restos de arabinofuranosa unidos terminalmente o por un enlace O-5. El arabinogalactano también puede ser un oligosacárido constituido por varios residuos de arabinosa. Además, el ácido ferúlico puede estar unido a algunos residuos de arabinosa y galactosa [50].

“En la biomasa lignocelulósica, la hemicelulosa recubre la celulosa desde el exterior y para exponer la celulosa a las acciones enzimáticas, se debe desplazar el 50% de la hemicelulosa” [19].

### **2.8.3 Lignina**

«Después de la celulosa y la hemicelulosa, la lignina es un polímero heterogéneo el cual es el tercer polímero más abundante en la naturaleza. Los enlaces cruzados de los monómeros fenólicos hacen que la lignina sea compleja y grande. Los monómeros fenólicos que hacen la estructura impermeable de la lignina son los alcoholes de coniferilo, por enlaces alquil-alquilo, arilquilo, aril-arilo y aril-éter. La naturaleza compleja y robusta de lignina actúa como una barrera contra la degradación de la pared celular vegetal u estrés oxidativo causado por microbios» [19].

La composición de la lignina está llevada por unidades de fenilpropano las cuales están unidas por C-C o C-O, lignina tres monómeros básicos los cuales son; monómero p-fenilo, guayacilo y siringilo. Aunque estas tres estructuras son las básicas cada una de ellas varía mucho o poco dependiendo de la biomasa estudiada, las maderas duras están estructuradas en su mayoría por compuestos tipo siringilo (58.10%) que por compuestos tipo guayacilo (18,75%), Las unidades estructurales de la lignina de madera blanda son principalmente unidades de tipo guayacilo; queda una pequeña cantidad de unidades de tipo p-hidroxifenilo [51].

La forma en que se llegan a unir estas unidades básicas es;  $\beta$ -O-4,  $\beta$ -5 y  $\beta$ -1, la lignina tiene enlaces Éter los cuales incluyen enlaces fenol-éter, enlaces alquil-éter, enlaces dialquilo, enlaces diariléter, etc; este tipo de enlaces está en aproximadamente dos tercios a tres cuartos de unidades de fenilpropano, entre el 70 y 80% de estos enlaces son fenol-éter [26]

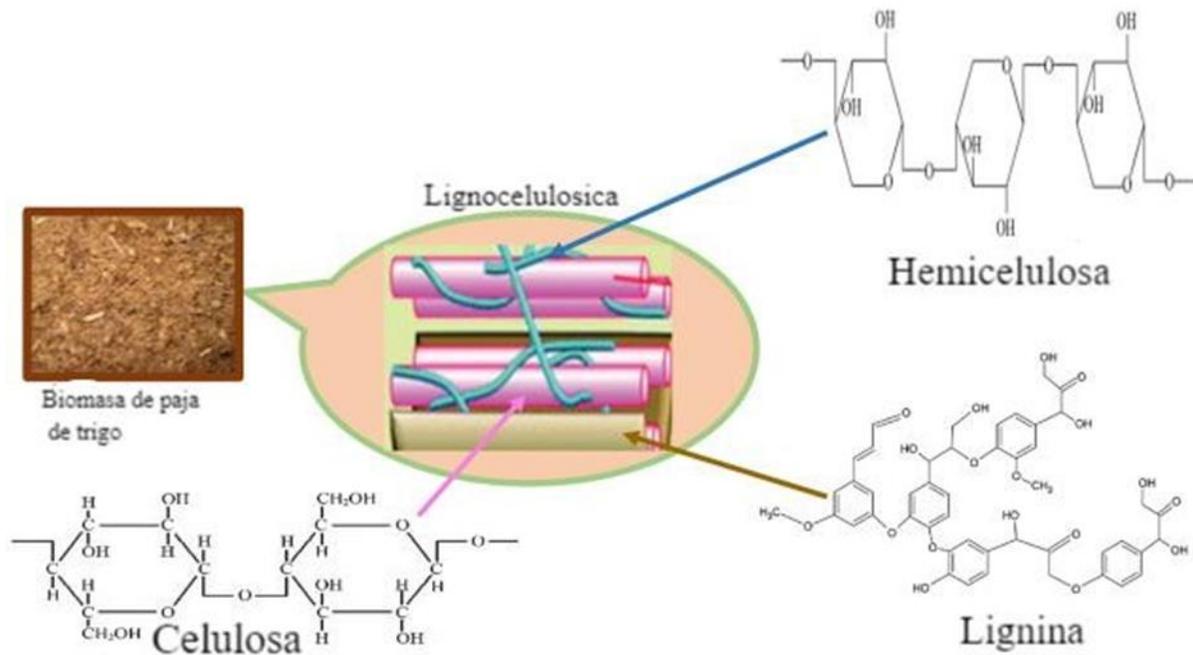
### **2.8.4 Extractivas**

«Los extractos son productos químicos que forman parte no polimérica de la biomasa lignocelulósica que pueden extraerse con la ayuda de disolventes. Pueden emplearse disolventes tales como acetona, agua, tolueno, hexano para la extracción de extractos. En general, la biomasa

consta de diversos extractos como proteínas, pectina, ceras, aceites esenciales, fenólicos, flavonoides, etc.» [51].

**Figura 26**

*Estructura de la biomasa lignocelulósica*



**Nota.** La figura representa los diferentes componentes que contiene la lignocelulosa (Celulosa, Lignina y Hemicelulosa). Tomado de M. F. Adegboye *et al*, "Bioprospecting Of Microbial Strains For Biofuel Production: Metabolic Engineering, Applications, And Challenges," *Biotechnol Biofuels*, vol. 14, (1), 2021. DOI: 10.1186/s13068-020-01853-2.

«Las paredes celulares de los distintos tipos de células, aunque no son homogéneas, están muy estructuradas y presentan profundas similitudes por lo que normalmente la estructura de las paredes de fibras de maderas blandas se suele utilizar como ejemplo general. Las células están cimentadas por una lámina media constituida por lignina exclusivamente. Esta lámina junto con las dos paredes primarias adyacentes, constituidas en las células maduras fundamentalmente por Lignina y pectinas y cantidades menores de hemicelulosas y celulosas, constituye la lámina media compuesta, cuyas dimensiones son más o menos constantes independientemente del tipo celular, clasificación de biomasa, dura o blanda, posición en el anillo de crecimiento, etc. Su contribución total de la fibra es baja. La mayoría de la biomasa de la madera se encuentra en la pared secundaria,

formada cuando finaliza el crecimiento longitudinal de la célula, y que está constituida por tres capas de formación consecutiva hacia el interior del lumen. Estas tres capas difieren en la proporción de sus componentes, celulosa, hemicelulosa y lignina, así como, en la orientación de las microfibrillas de celulosa. La capa intermedia o S2, es la predominante y supone aproximadamente el 75% del total de la pared celular y es la que presenta los grados de variación mayores. La contribución relativa de los elementos celulares dependiendo del tipo de biomasa se recoge en la Tabla 3» [19].

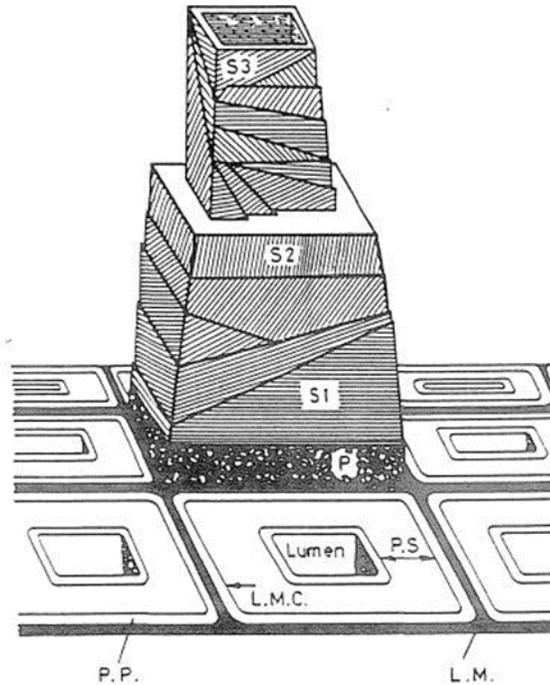
«Las fibras de maderas duras son más cortas que las traqueidas de blandas (1,2 mm frente a 4 mm como valores medios). La relación grosor/longitud de las fibras puede oscilar entre 1/100 y 1/400, correspondiendo los valores más altos a las traqueidas de maderas blandas, por lo que son muy apropiadas para la industria del papel. Las pajas de cereales y en general los materiales herbáceos tienen un contenido muy superior en células no fibrosas». [52]

“La deconstrucción de la lignina es un paso clave en el procesamiento de biomasa para obtener monómeros útiles. Los sistemas microbianos pueden proporcionar información molecular sobre la despolimerización de la lignina, ya que han evolucionado para descomponer la lignina utilizando rutas de radicales dependientes de metaloenzimas. Se ha observado que tanto los hongos como las bacterias metabolizan la lignina”. [44]

Las celulosas han sido categorizadas en tres tipos, (i) endoglucanasas, (ii) exoglucanasas también conocidos como celobiohidrolasa y (iii)  $\beta$ - glucosidasas, también llamada celobiasis. [17]

## Figura 27

### *Estructura de la pared celular*



**Nota.** Estructura de la pared celular de una fibra de madera blanda. PP: pared primaria, PS: pared secundaria, LM: Lámina media. Tomado de Martín, C. et al, .1994."Biomasa Lignocelulosa. Polímeros Constitutivos. Procesos Biológicos De Degradación De La Lignina.".

“Estas enzimas trabajan al unísono para hidrolizar la celulosa en la pared celular de las plantas. Las endoglucanasas actúan atacando aleatoriamente los sitios internos de la parte amorfa de la celulosa, allanando así el camino para la acción de la celobiohidrolasa en la región cristalina de la celulosa hidrolizando la celobiosa” [45]. “Luego los microbios utilizan la energía almacenada en la glucosa convirtiéndola en un combustible de hidrocarburos, mediante la transformación de la energía solar en energía química [53]. Las actividades de las diferentes celulosas están gobernadas por sus propiedades funcionales. La tabla 2 describe las diversas propiedades funcionales [53]

**Tabla 9***Propiedades estructurales y funcionales de las celulasas*

<b>TIPO DE CELULOSA</b>	<b>FUNCIONES</b>	<b>PROPIEDADES ESTRUCTURALES</b>
Endoglucanasas	Rompe los enlaces internos de las moléculas de celulosa, produce celobiosa y posee una rápida capacidad de disociación.	Poseen bucles cortos que se adhieren a las cadenas de celulosa para producir oligómeros de cadena larga.
Exoglucanasas o celobiohidrolasas	Escindir el mismo enlace glicosídico de los extremos terminales de las moléculas de celulosa, produciendo celobiosa	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Poseen bucles largos y se sienten atraídos por sitios cristalinos a lo largo de las cadenas de microfibrillas de celulosa y producen principalmente celodextrina.</li> <li>2. Existe en dos formas basadas en la parte de la cadena de oligosacáridos que es atacada. El extremo reductor y el extremo no reductor de la celobiohidrolasa.</li> </ol>
$\beta$ -glucosidasas o celobiasis	Escinde la celobiosa en dos moléculas de glucosa.	Existe en dos formas basadas en la parte de la cadena de oligosacáridos que es atacada. El extremo reductor y el extremo no reductor de la celobiohidrolasa.

*Nota.* Esta tabla muestra las propiedades estructurales de según el tipo de celulosa. Tomado de Martín, C. et al, .1994. "Biomasa Lignocelulosa. Polímeros Constitutivos. Procesos Biológicos De Degradación De La Lignina."

“Las enzimas que degradan la hemicelulosa son producidas por especies bacterianas y fúngicas. Por ejemplo, la endo  $\beta$ -1,4 xilanasas de la familia CAZy (GH5, GH7, GH8, GH10, GH11 Y GH43) son sintetizadas por hongos como *Trichoderma longibratum*, *Aspergillus Niger* y *Ustilago Maydis*” [53].

«La mayoría de la xilanasas pertenecen a las familias GH10 y GH11, que difieren en su especificidad de sustrato y la GH10 tiene una especificidad más amplia que la familia de endoxilanasas GH11. Otras enzimas hemicelulolíticas que trabajan en sinergia con la Xilanasas incluyen las  $\beta$ -mananas y las arabinofuranosidasas, que desempeñan un papel clave en la escisión de las hemicelulosas compuestas por manano o arabinofuranosilo, lo que facilita la acción catalítica de la xilanasas sobre el xilano» [53].

## **2.9 Pretratamientos biológicos**

El pretratamiento es la conversión de biopolímeros que contiene la biomasa a compuestos simples como (Hexosas, pentosas, oligómeros de carbohidratos). Generalmente el pretratamiento está compuesto por dos etapas; la primera etapa es el curado mecánico, como el triturado, esto se hace para proporcionar mayor área superficial y porosidad, lo que ayuda a la deslignificación. El segundo paso tiene más que ver con el tipo de tratamiento que se vaya a utilizar, por el método ácido (sulfúrico, clorhídrico o acético), bases (hidróxido de sodio o calcio) u oxidación (Ozono, peróxido de hidrógeno) [46].

Los hongos causan una gran variedad de tipos de descomposición, así como tasa de colonización, estos factores varían mucho entre los tipos de hongos como los hongos de podredumbre parda, los hongos de podredumbre blanca y los hongos de podredumbre blanda. La descomposición se da más frecuentemente a través de los rayos de la biomasa los cuales son tiras de células horizontales cortas que se extienden en dirección radial y sirven para almacenar alimentos y distribuirlos horizontalmente, algunos de estos alimentos como el almidón o azúcares solubles aceleran la colonización y la penetración por parte de los hongos a la madera. Una vez dentro de la madera los hongos penetran de una celda a la otra a través de aberturas naturales como hoyos o penetran directamente a través de la celda, pero produciendo perforaciones [47].

Los hongos de pudrición parda se caracterizan por la degradación de la hemicelulosa y celulosa; sin embargo; a diferencia de los hongos de pudrición blanca estos no logran la degradación la lignina si no que la modifican a través de una reacción de desmetilación, los hongos de pudrición

parda pueden despolimerizar la celulosa mediante reacciones oxidativas (Fenton) [48]. Morfológicamente los hongos de pudrición blanca se dividen en dos; los primeros degradan la lignina y polisacáridos de la madera y los segundos degradan selectivamente los componentes de la biomasa vegetal [49].

Los hongos de pudrición blanca tienen una alta capacidad de despolimerización, para el pretratamiento de biomasa con bacterias no se han realizado estudios tan profundos como con la especie fúngica; sin embargo; en estos últimos años se ha aumentado el número de estudios. Las enzimas ligninolíticas para las bacterias se dividen en dos categorías; enzimas modificadoras de lignina (LME) como Lignina peroxidasa, peroxidasa de magnesio, peroxidasa decolorante de tinte y lacasa y enzimas auxiliares de despolimerización de lignina (LDA) como éter  $\beta$ -arílico, bifenilo, fenilcumarano, ferulan enzimas degradantes, superóxido dismutasa, catalasa peroxidasa las cuales ayudan a las enzimas centrales a la degradación de la lignina debido a que degradan un dímero y monómero[54].

Los hongos de pudrición blanca tienen dos sistemas extracelulares para degradar la biomasa lignocelulósica:

- El primer sistema es hidrolítico, que produce celulasas y hemicelulosas que degradan polisacáridos [50].
- El sistema oxidativo degrada la lignina y abre los anillos de fenilo [55].

Este tipo de hongos se caracterizan por su capacidad de degradar la lignina a través de un sistema de enzimas las cuales son: Lignina peroxidasa (LiP), Manganeso peroxidasa (MnP) y Lacasa. [51] Las enzimas hemo peroxidadas (LiP, MnP y VP) se caracterizan por tener un alto potencial redox, las LiP se caracterizan por catalizar la despolimerización oxidativa de compuestos no fenólicos los cuales forman cationes aromáticos y compuestos fenólicos como el guayacol el alcohol vinílico y catecol. [54]

La acción de este sistema es celular en las que intervienen enzimas denominadas Lignina peroxidasa (LiP), Manganeso peroxidasa (MnP), un grupo de oxidasas (lacasas), alcohol veratrílico, magnesio y ácidos orgánicos como oxálico o malónico y por último un grupo de enzimas las cuales producen H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (glioxal oxidasa, aryl alcohol oxidasa, entre otras). [56]

“El descubrimiento del LiP inició la búsqueda de otras enzimas oxidativas y condujo al descubrimiento de la peroxidasa de Magnesio (MnP), una enzima que oxida de  $Mn^{2+}$  al oxidante  $Mn^{3+}$ ”. [53]

El sistema de degradación de lignina de los hongos de la pudrición blanca está compuesto por enzimas extracelulares, como las peroxidasas ligninolíticas, oxidasas generadoras de  $H_2O_2$  como la glucosa oxidasa, glioxal oxidasas y metanol oxidasas además de cofactores de bajo peso molecular como los mencionados anteriormente [56]. Se han investigado los parámetros nutricionales y de cultivo que influyen en el inicio de la producción de las típicas enzimas ligninolíticas lignina peroxidasa (LiP) y peroxidasa de Magnesio (MnP). Los estudios demostraron que la degradación de la lignina solo ocurre durante el metabolismo secundario, que se desencadena por el agotamiento de nitrógeno, el carbono o el azufre de los nutrientes; sin embargo; estudios han demostrado que no todas las especies y cepas de hongos de pudrición blanca están reguladas [53]. «La adición de  $NH_4^+$  y/o L-aminoácidos orgánicos al medio de crecimiento no reprimió la actividad ligninolíticas en *Bjerkandera adusta* ssp. y *Coriolus versicolor*. De hecho, los medios con alto contenido de nitrógeno estimularon los rendimientos de biomasa y la producción de peroxidasa en estas especies de hongos no regulados por nitrógeno. La degradación está muy influenciada por la presencia de nitrógeno» [53].

## Figura 28

*Ciclos catalíticos de las enzimas peroxidasas (LiP y MnP)*

Ciclo Catalítico MnP	Ciclo Catalítico LiP
$MnP + H_2O_2 \rightarrow MnP(I) + H_2O$	$LiP + H_2O_2 \rightarrow LiP(I)$ $\rightarrow LiP(I) + H_2O$
$MnP(I) + Mn^{+2} \rightarrow MnP(II) + Mn^{+3}$	$LiP(I) + AV \rightarrow LiP(II) + AV^+$
$MnP(II) + Mn^{+2} \rightarrow MnP + Mn^{+3}$	$LiP(II) + AV \rightarrow LiP(II) + AV^+$
$MnP(II) + H_2O_2 \rightarrow MnP(III)$ <i>inactivo</i>	$LiP(III) + H_2O_2 \rightarrow$ <i>LiP(III)inactivo</i>

**Nota.** Las reacciones de las enzimas con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para formar Mn<sup>+3</sup> y AV<sup>+</sup>. Tomado de Carlos Juan, D. Q., 2011). "Degradación De Plaguicidas Mediante Hongos De La Pudrición Blanca De La Madera." Available: <http://www.bibliothek.uni-regensburg.de/ezeit/?2703114>.

Otro factor importante es el oxígeno el cual tiene un efecto activador múltiple sobre la lignolisis, una buena explicación del efecto estimulante de los niveles elevados de oxígeno es el aumento de la producción endógena de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en cultivos de hongos. El H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es esencial para la actividad de las peroxidasas y se demostró que es el paso limitante de la velocidad de oxidación de hidrocarburos poliaromáticos catalizada por peroxidasa [57].

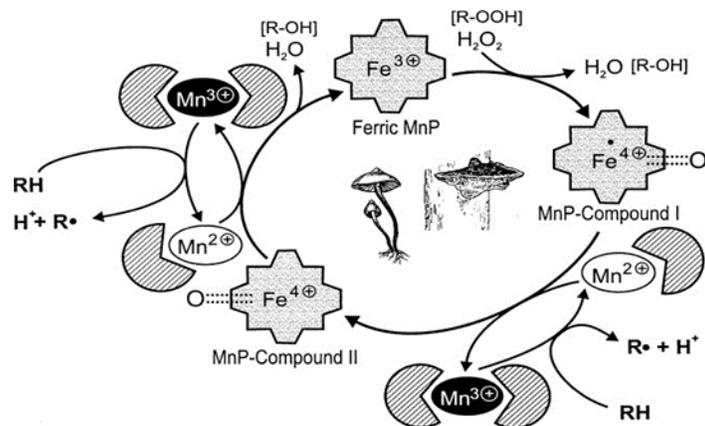
### **Peroxidasa de Magnesio:**

El ciclo catalítico empieza con la unión de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y la enzima férrica nativa con lo cual se forma un complejo de peróxido de hierro, el siguiente paso requiere de la transferencia de dos electrones desde el grupo hemo lo que da por resultado la formación del complejo radical Fe<sup>4+</sup>-oxo-porfirina (compuesto I), después de esto el enlace de dioxígeno se escinde heterolecitamente y una molécula de agua es expulsada.

La siguiente reducción procede a través del complejo Fe<sup>4+</sup>-oxo-porfirina (compuesto II) para lo cual se necesita un ion Mn<sup>2+</sup> el cual dona un electrón y por lo tanto se oxida a Mn<sup>3+</sup> lo cual conduce a la generación de la enzima y la liberación de la molécula de agua, para la reducción del compuesto II se produce de manera similar pero el Mn<sup>3+</sup> es inactivado por ácidos orgánicos como el oxalato como se ve en la figura 22.

**Figura 29**

*Ciclo catalítico*



**Nota.** Ciclo catalítico de la enzima mangneso peroxidasa.  
**Tomado de** Hofrichter, M. and M. Hofrichter, (-042002). "Review: Lignin Conversion BY Manganese Peroxidase (MnP)." *Enzyme and Microbial Technology*. DOI: 10.1016/s0141-0229(01)00528-2.

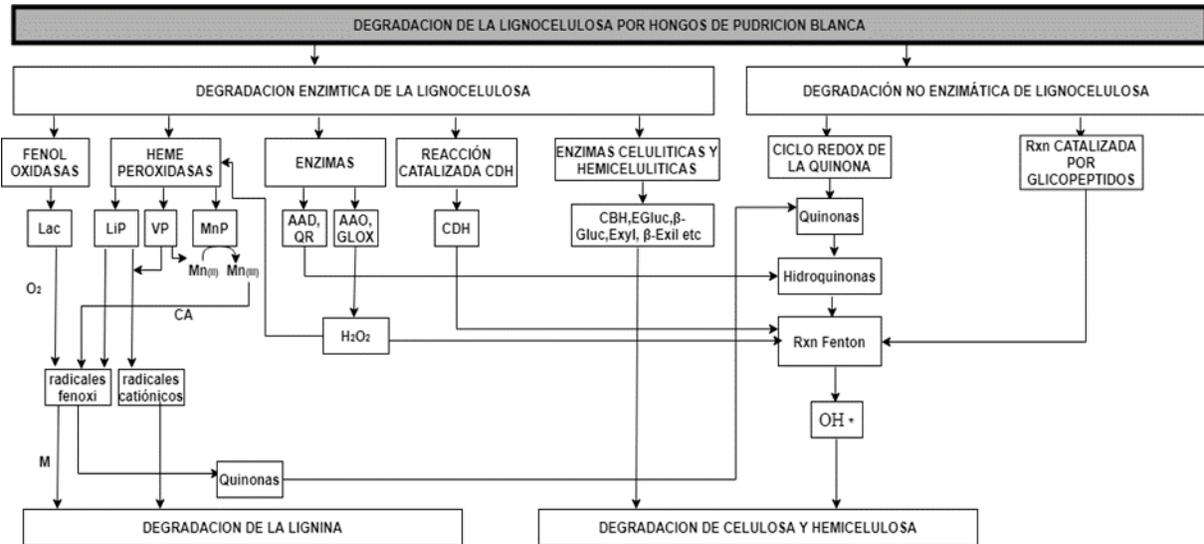
Los compuestos no fenólicos que tienen bajo potencial redox, como el tetrametoxibenceno o el antraceno, se oxidan por abstracción de un electrón del anillo aromático, dando lugar a radicales catiónicos arilos. [57]

Los quelatos anteriormente mencionados pueden reaccionar entre sí formando radicales alquilo los cuales a su vez pueden reaccionar con el dióxido de carbono formando el peróxido de hidrógeno. [57]

Los ácidos grasos y los compuestos orgánicos de azufre son oxidados por la MnP lo cual forma tilo como lo muestra la figura 23, el cual en presencia de dioxígeno puede suministrar al mecanismo peróxido de hidrógeno y radicales los cuales atacan la lignina. [57]

**Figura 30**

*Sistema de degradación de los hongos*



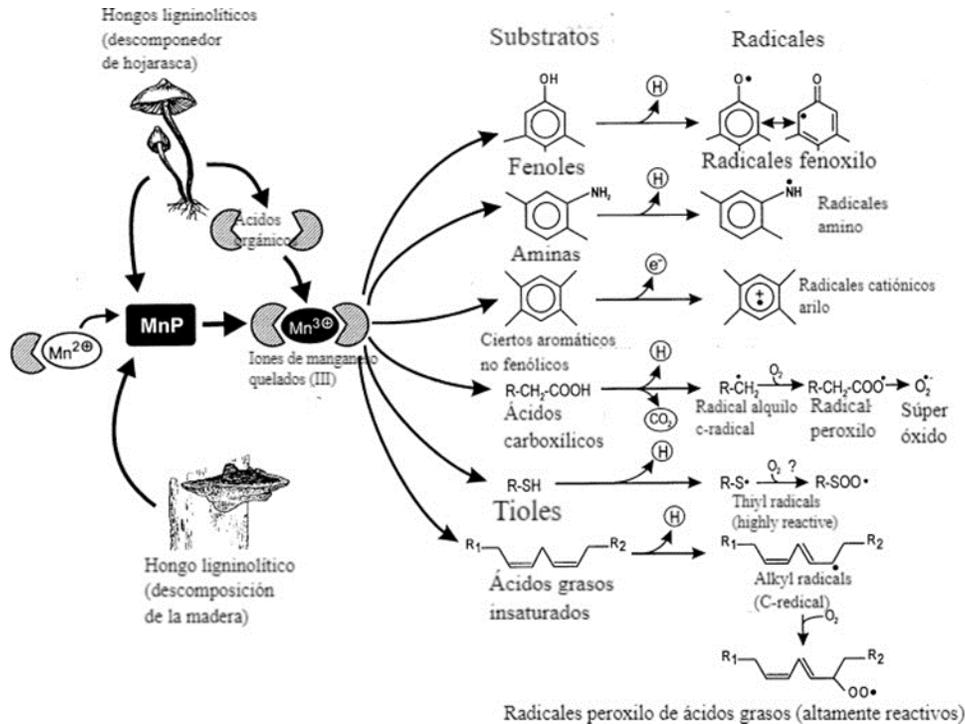
**Nota.** Diagrama esquemático de la degradación de la lignocelulosa por hongos de pudrición blanca.  $\beta$ -Gluc,  $\beta$ -glucosidasas;  $\beta$ -xil,  $\beta$ -xilosidasas; AAD, aril-alcohol deshidrogenasa; AAO, aril- alcohol oxidasa; CA, agente quelante; CBH, celobiohidrolasa; CDH, celobiosa deshidrogenasa; EGLuc, endoglucanasas; Exil, endoxilanasas; GLOX, glioxal oxidasa; Lac, lacasa; LiP, lignina peroxidasa; M, mediador; MnP, peroxidasa de manganeso; QR, quinona reductasa; VP, peroxidasa versátil. Tomado de T. A. Lu-Chau et al, "Application Of Fungal Pretreatment In The Production Of Ethanol From Crop Residues," Bioethanol Production from Food Crops, pp. 267, 2019. . DOI: 0.1016/b978-0-12-813766-6.00014-x.1

Entre los hongos más comunes se encuentran Meruliaceae, Coriolaceae y Polyporaceae, así como los colonizadores de la hojarasca del suelo como Strophariaceae y Tricholomataceae, expresan y secretan MnP. El peso molecular de la MnP es aproximadamente de unos 38 a 62,5 KDa. [57]

En el caso de las bacterias se conocen algunas que pueden producir dicha enzima y entre las bacterias se resaltan las gram negativas como Ralstonia sp., Pseudomonas sp., Enterobacter sp., Klebsiella sp., Ochrobactrum sp., Serratia sp., Citrobacter sp., Novosphingobium sp., Pandoraea sp., Aurantimonas sp., Erythrobacter sp., Salmonella sp. y pocas bacterias Gram positivas como Bacillus sp., Paenibacillus sp., Leucobacter sp., Streptomyces sp. y Mycobacterium sp. [50]

**Figura 31**

*Radicales formados por la acción de la MnP*



**Nota.** Formación de radicales por el sistema de peroxidasa de manganeso en presencia de diferentes sustratos. Tomado de Hofrichter, M. and M. Hofrichter, (-042002). "Review: Lignin Conversion By Manganese Peroxidase (MnP)." *Enzyme And Microbial Technology*" DOI: 10.1016/s0141-0229(01)00528-2.

### Lignina Peroxidasa:

El ciclo catalítico de la lignina peroxidasa comienza con la oxidación 2e<sup>-</sup> de la enzima férrica nativa lo cual produce un producto intermedio el cual es un catión radical de porfirina de hierro antes de llegar a la LiP(I), este catión rompe el enlace O-O del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, por lo tanto, se forma agua y la LiP(I).

La reducción consecutiva de dos 1e<sup>-</sup> de la LiP(I) gracias a los sustratos de la enzima nativa producen la oxidación férrica completando el ciclo catalítico de la enzima.

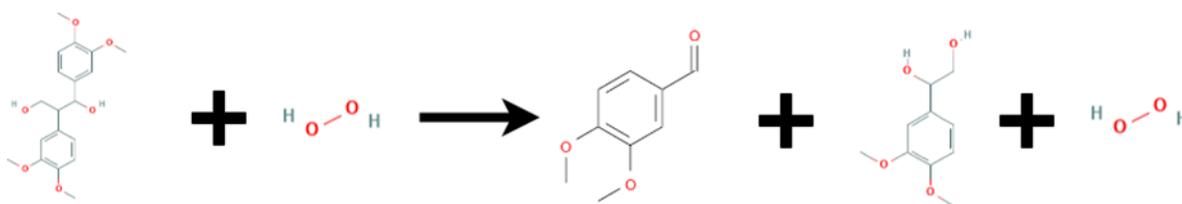
La enzima Lignina peroxidasa también ejerce una acción oxidativa ya sea por la enzima misma o por la producción de radicales libres los cuales los forman el alcohol veratrílico o el

dimetoxibenceno (DMB). [53] La LiP oxida compuestos con un potencial redox de hasta 1,4 Voltios en presencia de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

A la fecha se conocen que la enzima LiP las producen bacterias Gram negativas como Pseudomonas sp., Enterobacter sp., Shigella sp., Delftia sp., Klebsiella sp. Acientobacter sp., Comamonas sp., Ochrobactrum sp., Serratia sp., Citrobacter sp., Raoultella sp. y bacterias Gram positivas como Stenotrophomonas sp., Propionibacterium sp., Exiguobacterium sp., Bacillus sp., Nocardia sp., Leucobacter sp., Thermomonospora sp., Streptomyces sp., Ensifer sp. [50]

### Figura 32

#### *Oxidación de alcohol veratrílico*



**Nota.** 1,2-bis (3,4-dimetoxifenil) propano-1,3-diol + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> → 3,4-dimetoxibenzaldehido + 1- (3,4-dimetoxifenil) etano-1,2-diol + H<sub>2</sub>O. Tomado de Chauhan, P. S., (Jan2020). "Role Of Various Bacterial Enzymes In Complete Depolymerization Of Lignin: A REVIEW." Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101498>. DOI: 10.1016/j.bcab.2020.101498.

### Lacasa

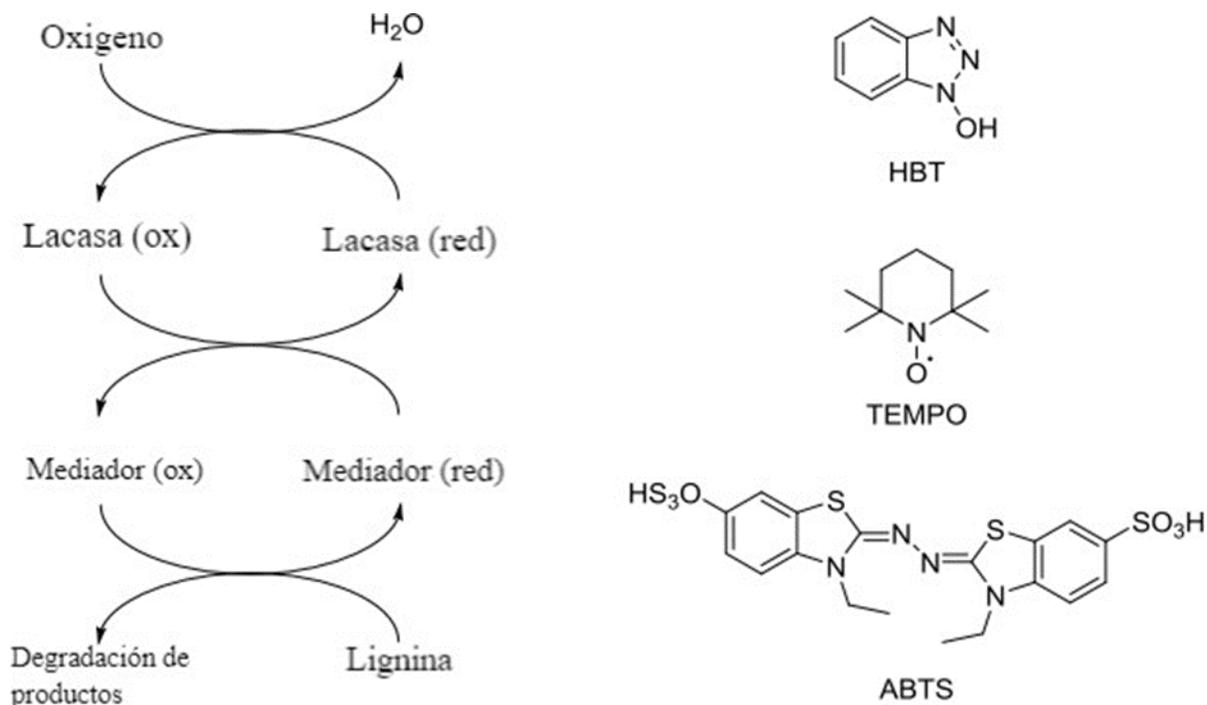
La tercera enzima es la lacasa la cual es una glicoproteína cúprica, para estas enzimas se encuentra un centro activo en el cual hay cuatro átomos de cobre en el que ocurren las transferencias de electrones además de tener los cuatro átomos de cobre se tienen también cisteínas y varias histidas, se distinguen 3 clases de Lacasas, la clase 1 contiene una metionina, la clase 2 contiene una leucina, mientras que las lacasas de clase 3 se caracterizan por una fenilalanina.[54] Las lacasas son oxidorreductasas, capaces de oxidar fenoles, polifenoles, aminas aromáticas y muchos otros compuestos, que utilizan oxígeno molecular y liberan agua como único subproducto.[55]

Para la producción de lacasas bacterianas se utiliza el sistema de secreción Tat, el cual exporta holoproteínas plegadas y a través de la membrana celular. La degradación de la lignina por parte de las lacasas requiere mediadores como N-hidroxibenzotriazol (HBT) y ABTS (ácido 2,2'-azino-

bis (3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) los cuales actúan como lanzaderas redox entre el sitio activo y la estructura de la lignina [51].

**Figura 33**

*Catalización por la enzima Lacasa*



**Nota.** Ciclo redox catalizado por lacasa para la degradación de la lignina en presencia de diferentes mediadores químicos (izquierda) y las estructuras de los mediadores más empleados Nhidroxibenzotriazol (HBT), (2,2,6,6 - tetrametilpiperidin-1-il) oxilo (TEMPO) y ácido 2,2'- azino-bis (3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico) (ABTS). Tomado de de Gonzalo,G. et al, (Oct 20,2016)."Bacterial Enzymes Involved In Lignin Degradation." Journal of Biotechnology.Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.08.011>. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2016.08.011.

Las lacasas fúngicas tienen un mayor potencial redox (+800 mV) en comparación de las lacasas vegetales o bacterianas. La catálisis de lacasa actúa con la reducción una molécula de Oxígeno a Agua acompañada de la oxidación de un electrón de los compuestos aromáticos los cuales incluyen polifenoles, monofenoles los cuales son sustituidos con metoxi y aminos aromáticas [56].

La producción de lacasas algunas veces se ven afectadas por el agotamiento de nitrógeno, aunque en algunas cepas el nitrógeno no afecta la producción de estas, este mismo comportamiento se ha podido ver con el carbono [58].

## Cofactores

Las enzimas como la lignina peroxidasa (LiP) y peróxido de Magnesio (MnP) las cuales son esenciales para la oxidación de la lignina no pueden acceder debido a que el tamaño de los poros de la pared celular es más pequeño que el tamaño de dichas enzimas, se han evaluado e identificado cofactores de bajo peso molecular que les permite ser más accesibles a la lignina de la madera y por lo tanto puedan realizar funciones muy importantes en el sistema enzimático ligninolítico [58].

Se han realizado estudios en los que se demuestra la importancia de los cofactores al no tener el mismo rendimiento la deslignificación. Algunos de los cofactores son el magnesio, alcohol veratrílico, oxalato, 2-cloro-1,4- dimetoxibenceno [53].

El magnesio es un compuesto de la madera natural que está presente en una concentración relativamente alta (aproximadamente 10-100 mg/kg de madera seca).[53] «El papel del  $Mn^{2+}$  es de gran evidencia ya que los precipitados de  $MnO_2$  se acumulan durante la descomposición de los hongos, debido a esta acumulación se presenta dos tipos de patrones de descomposición en la madera degradada por estos hongos: una deslignificación selectiva que resulta en la eliminación de lignina y hemicelulosa y una pudrición blanca típica que provoca la eliminación simultánea de todos los componentes de la pared celular, estas dos se caracterizan por que dejan regiones negras y manchadas» [59].

La degradación realizada por varios hongos de pudrición blanca es potenciada por  $Mn^{2+}$  debido a que estimula la producción de MnP y funciona como sustrato para MnP. El  $Mn^{3+}$  que es generado por MnP es mediador de la oxidación de varios compuestos fenólicos [53].

Según el investigador Venkataramanan y co. el segundo cofactor llamado alcohol veratrílico (alcohol 3,4-dimetoxibencilico, VA) es generado endógenamente, el alcohol veratrílico juega un papel importante debido a que se secreta durante la fase temprana del metabolismo secundario y su producción es paralela al inicio de la producción de LiP en respuesta a la limitación de Nitrógeno, él VA actúa como mediador en reacciones de transferencia de electrones (redox) [54].

Según el investigador Rimko Ten Have la producción de VA no siempre se ve afectada por la limitación de Nitrógeno, en el caso de *Bjerkandera sp* el regulador de la síntesis de VA es el  $Mn^{2+}$

a nivel endógeno. Los experimentos de captura de isótopos 14 carbonos mostraron que la fenilalanina, el cinamato, el benzoato, el benzaldehído pueden ser precursores de los biosintéticos de VA. [57]

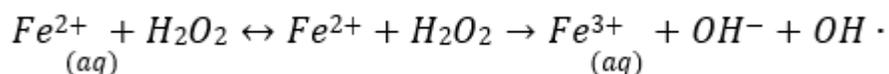
Una de las funciones del VA es que actúa como un mediador para reacciones de transferencia de electrones en la oxidación catalizada por LiP de compuestos que son difíciles de oxidar, debido a que algunos de estos compuestos no se unen fácilmente a LiP o que son más grandes como para caber en el sitio catalítico. En este caso el mecanismo que se ha propuesto es que la LiP cataliza la oxidación de un electrón de VA al radical catiónico VA, VA+•. Este último oxida el segundo sustrato por un electrón, reduciendo concomitantemente VA+• de nuevo a VA. [59]

Otro de los componentes clave para las delignificaciones es el Oxalato el cual es biosintetizado por el oxalacetato y glioxilato oxidasa la enzima responsable de la descomposición es el oxalato descarboxilasa la escisión del oxalato produce dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el radical anión formiato en condiciones aeróbicas. [59]

La reducción de VA+ o Mn<sup>3+</sup> por oxalato sugiere que mientras el oxalato coexiste con la degradación con sistemas enzimáticos que degradan la lignina, inhibiría la degradación de la lignina. [59]

El cofactor 2-cloro-1,4-dimetoxibenceno es producido entre una amplia gama de compuestos organohalógenos algunos de los más comunes son el metabolito anisilo clorado (CAM) y el metabolito de hidroquinona clorada (CHM), para el caso de CAM se demostró que tiene una función fisiológica en la degradación de la lignina debido a que sirve como sustrato para la aril alcohol oxidasa la cual está involucrada en la producción extracelular de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. [59]

La degradación de la lignocelulosa por parte de algunos hongos también implica un sistema no enzimático basado en la reacción Fenton. La reacción de Fenton es la oxidación catalizada por Fe (III/II) de sustratos orgánicos por peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). [55]



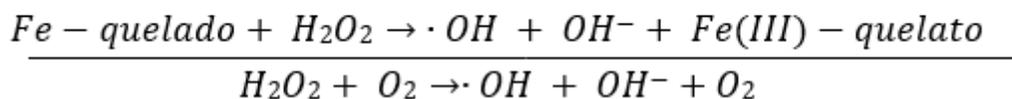
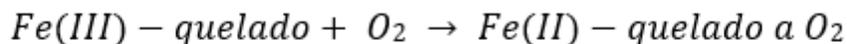
El peróxido de hidrógeno que se puede ver en la reacción se produce de las enzimas AAO, GLOX y CDH, las cuales reducen radicales fenoxi, manganeso y oxígeno molecular, la reducción Fe<sup>3+</sup>

se produce por medio del ciclo redox de la quinona, el cual se produce a través de la enzima celobiosa deshidrogenasa (CDH).[55]

Bar-Lev descubrió en 1981 que una atmósfera que contiene O<sub>2</sub> Y N<sub>2</sub> en una proporción de 80:20 mejoraba la degradación de la lignina 5 veces en comparación con el aire normal [55]. Una atmósfera de oxígeno puro mejoró notablemente la producción de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en estos cultivos de hongos. La producción de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mostró una relación temporal con la degradación de la lignina, lo que sugiere un papel del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en la degradación de la lignina. [55]

«La madera, el sustrato natural de crecimiento de los hongos de la pudrición blanca, contiene el ion ferroso Fe<sup>2+</sup> que junto con el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> genera el radical hidroxilo extremadamente reactivo (-OH), que pueden reaccionar con prácticamente todas las moléculas orgánicas disponibles. Por lo tanto, se llevaron a cabo estudios sobre una posible participación del -OH en la degradación de la lignina».[56]

La producción de -OH en reacciones que contiene ion ferroso Fe (II) y extracto celular procede a través de una reacción tipo Fenton [57]. “En la reacción Harber-Weiss catalizada por hierro, el superóxido (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) reduce el Fe (III) a Fe (II) que a su vez reduce el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para formar OH de una manera similar a la de la Reacción 1” [57].



En 1983, Tien descubrió que los hongos de pudrición blanca excretan lignina peroxidasa (LiP). La enzima utiliza H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para su actividad y es capaz de oxidar y escindir lignina [58]. La enzima celobiosa deshidrogenasa puede oxidar una variedad de di y oligosacáridos y puede transferir los electrones liberados a una gran serie de electrones. Los productos de reducción generan -OH, que reaccionan con compuestos de la lignina no fenólicos, lo que da como resultado la desmetilación y la introducción concomitante de sitios fenólicos. Esta reacción es importante porque la inserción de grupos fenólicos adicionales en la lignina facilita la oxidación del polímero [58]

## 2.10 Fermentación oscura

La producción de hidrógeno por lignocelulosa como ya se ha demostrado requiere de pretratamiento, hay dos métodos para realizar la producción de hidrógeno, la primera es hidrólisis y fermentación separadas (SHF) fermenta los azúcares de 5 y 6 carbonos, donde estos dos procesos ocurren en tanques diferentes y el segundo sacarificación y fermentación simultáneas (SSF) donde la hidrólisis y la fermentación de azúcares de 6 carbonos se realizan en el mismo tanque.

Existen factores que afectan la fermentación oscura como el tipo de microorganismos utilizados ya que los cultivos bacterianos pueden ser puros o mixtos, esto afecta el método de preparación del inóculo y la composición del medio. El modo y condiciones del proceso de fermentación también controlan el metabolismo, es decir, temperatura, pH inicial o bajo dependiendo si es el proceso es continuo, tiempo de retención hidráulica (TRH) y presión parcial de hidrógeno a su vez estos factores afectan el tipo de reactor y su forma de funcionamiento, es decir, continuo, discontinuo y semicontinuo.

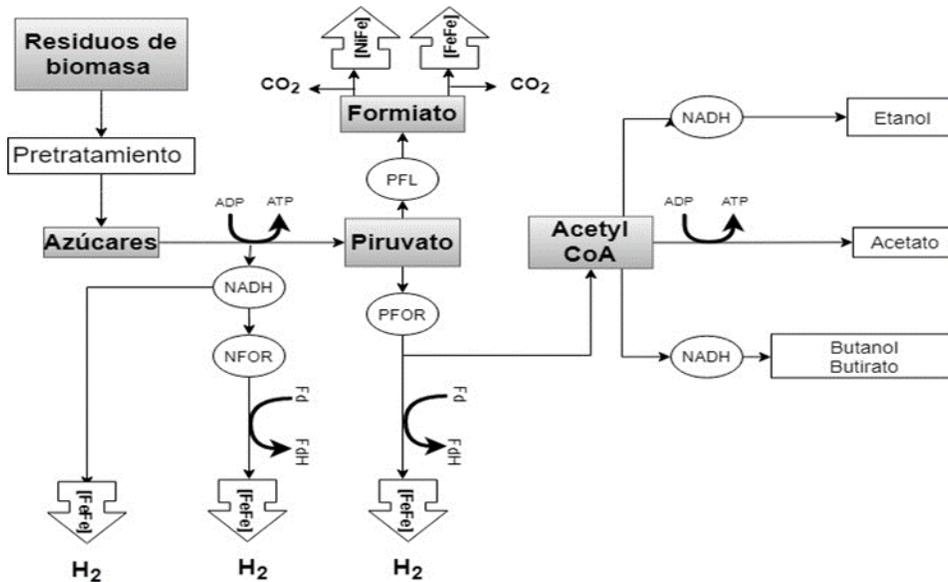
Para la producción de hidrógeno por fermentación oscura se utilizan microorganismos estrictamente anaerobios, anaerobios facultativos y arqueas. La fermentación oscura presenta varias ventajas frente a otros métodos como la capacidad de producir más hidrógeno debido a una rápida tasa de crecimiento de las cepas, amplia gama de sustratos que tiene un costo razonable, no tiene necesidad de luz y el diseño de los reactores es más simples, los microorganismos utilizados en este tipo de fermentación operan a 55°C, todo esto conduce a que es mucho más fácil la industrialización de este proceso siendo sustentable [51].

La producción de hidrógeno a través de la fermentación oscura presenta 4 tipos de cepas; enterobacter, clostridium, escherichia y bacillus ssp, estas cepas utilizan un gran número de sustratos como el ácido fórmico, ácido láctico, ácido pirúvico, ácidos grasos de cadena corta, glucosa, almidón, xilosa, celobiosa, sulfuro y otros [60].

Las enzimas reguladoras del metabolismo en las bacterias son las hidrogenasas, de las cuales existen en este caso dos; [FeFe]- hidrogenasa y [NiFe]- hidrogenasa, las primeras son bastante sensibles al oxígeno además son más activas en producción de hidrógeno molecular en cambio el segundo tipo de enzima cataliza principalmente la oxidación de hidrógeno molecular [60].

**Figura 34**

*Paso a paso de la glucólisis por fermentación oscura*



**Nota.** Mecanismo de fermentación por medio de la glucosa a partir de la biomasa. **Tomado de** Lukajtis, R. *et al*, (Aug2018). "Hydrogen Production From Biomass Using Dark Fermentation." *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.043>. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.043.

El mecanismo de fermentación se da a través de la glucólisis en la cual se parte a partir de la glucosa para la obtención del hidrógeno como se puede ver en la figura anterior.

En este mecanismo podemos ver que comienza con desechos de biomasa los cuales pasan por un pretratamiento para obtener los azúcares, después se produce la glucólisis la cual transforma la glucosa en piruvato, en este caso el intermedio clave es el dinucleótido de nicotinamida y adenina (NADH), el siguiente paso en el metabolismo llega cuando el piruvato se convierte en acetil-CoA esta reacción es catalizada por la piruvato ferredoxina oxidoreductasa (PFOR), los productos que se obtienen son acetil-CoA, CO<sub>2</sub> y también ferredoxina reducida, la cual está implicada en la reducción de [FeFe]- hidrogenasas y que después reducen protones produciendo hidrógeno [60].

Paralelo a este segundo paso también hay otra vía en la cual el piruvato se puede convertir tanto en formiato como en Acetil-CoA, esta reacción es catalizada por la enzima piruvato formiato liasa (PFL). Para el caso del formiato, este compuesto se puede convertir fácilmente en hidrógeno y dióxido de carbono en presencia de [FeFe]- hidrogenasa y [NiFe]- hidrogenasa [60].

El rendimiento teórico de la fermentación oscura es que por cada mol de glucosa se produce 12 de hidrógeno, pero al analizar de forma más realista la reacción podemos ver que se generan subproductos como los ácidos acéticos, propiónico y butírico, así como el metanol, el butanol o la acetona lo cual hace que se baje la producción de hidrógeno, lo cual reduce el rendimiento a 1-2,5 mol de hidrógeno por mol de glucosa [60].

Enfocándose en los microorganismos se encontraron los clasificados como anaerobios facultativos los cuales producen ATP por respiración aeróbica si hay oxígeno y en caso de que no puedan fermentar, esto los hace más fáciles de trabajar además de ello una alta presión parcial no afecta el rendimiento de fermentación, este grupo de anaerobios facultativos se encuentran entre las bacterias gram negativas que no forman esporas y más específicamente en las Enterobacteriaceae. La descomposición del ácido fórmico es la más importante debido a que produce Hidrógeno, para este caso se alcanza un rendimiento máximo de 2 moles de Hidrógeno por mol de glucosa [60].

Para las bacterias anaerobias estrictas se tienen a las Clostridia, Metylotrophs, Bacterias metanogénicas, Archaea. En la práctica el género más utilizado son las Clostridium las cuales producen hidrógeno en la fase exponencial debido a que en la fase estacionaria se produce compuestos orgánicos líquidos, una de sus principales ventajas es que produce hidrógeno a una tasa más eficiente que las facultativas ya que en la teoría se llega a producir aproximadamente 4 mol/mol glucosa; sin embargo; en la práctica se puede producir de 1,61 a 2,36 moles de hidrógeno por mol de glucosa y siendo más específico el género Clostridium es capaz de producir 1,61 a 2,36 moles de hidrógeno por mol de glucosa.[60] Una de las bacterias que más prometen son las Ruminococcus albus ya que según el estudio de Iannotti éstas son capaces de convertir 100 moles de glucosa en 237 de Hidrógeno en un continuo [47].



**Nota.** Reacción por fermentación oscura. **Tomado de** Ghimire,A. *et al*, (Apr 15,2015)."A Review On Dark Fermentative Biohydrogen Production From OrganicBiomass: Process Parameters And Use Of By-Products." *Applied*

En este tipo de procesos es importante el control de 4 variables, las cuales son la temperatura, pH, el tiempo de retención hidráulica y la presión parcial [58].

Las bacterias se pueden clasificar de 5 maneras frente a la temperatura, psicrófilos (0-25°C), mesófilos (25-45°C), termófilos (45-65°C), termófilos extremos (65-85°C) e hipertermófilos (por encima de 80°C). Esta temperatura depende de la o las bacterias utilizadas, ya que el no lograr una temperatura óptima puede afectar la producción de enzimas por parte de las bacterias, una mayor temperatura puede hacer que una bacteria se demore en encontrar su punto óptimo, en cambio una temperatura media puede hacer que los tiempos se acorten; por ello se presenta una desventaja en temperaturas termófilas y termófilas extremas, además de que económicamente puede llegar a no ser sostenible un proceso que consuma tal energía [60].

El pH como su definición lo dice es la concentración de hidronio, la cual es importante para obtener un nivel óptimo y constante debido a que este puede afectar el proceso de fermentación, por ello es necesario el control en el proceso debido a que la producción de hidrógeno está acompañada por los ácidos orgánicos (acético, láctico, butírico y propiónico) los cuales pueden disminuir el pH por debajo de 5 y hacer que la actividad de las enzimas baje además de una limitación en las bacterias para mantener el pH intracelular, para el control del pH en procesos discontinuos se debe saber cuál es el pH inicial y el operativo sobre todo en función de la cepa o cepas; sin embargo; de forma general se dice que el pH óptimo está entre 5 y 7, en el caso particular de los desechos de cultivos se habla de un pH de 5 a 6 [60].

Para procesos a nivel industrial se debe tener en cuenta el tiempo de retención hidráulica (HRT) ya sea en procesos continuos o semicontinuos, el tiempo de retención hidráulica es definido como el tiempo promedio que permanece un sustrato en un reactor, para la producción de hidrógeno se debe encontrar un punto óptimo de retención debido a que un promedio de tiempo muy altos puede llevar a una baja producción de hidrógeno, todo esto variará dependiendo del tipo de sustrato y su biodegradabilidad.[60] Para la puesta en marcha de la producción de hidrógeno en procesos continuos se utiliza como primera medida tiempos de retención hidráulica altos para que la adaptación del microorganismo sea más fácil, a medida que avance el tiempo se irán acortando dichos intervalos y esto también evitará un lavado biológico[47]. En los reactores CSTR el acortar los intervalos puede eliminar metanógenos de crecimiento lento, aminorar costos debido a los tamaños del reactor. Para los carbohidratos simples, el tiempo de retención óptima suele ser de varias horas: 4 h [59], 2 h [60] o 12 h [61].

La presión parcial del hidrógeno es otro de los factores que pueden afectar la producción de Hidrógeno, en caso de que la presión parcial del hidrógeno sea alta la enzima hidrogenasa se oxida y la ferredoxina se reduce lo cual inhibe la producción de hidrógeno y producto de esto aumentan las concentraciones de productos del metabolismo como ácido láctico, etanol, acetona, butanol y otros, por ello es importante eliminar el hidrógeno a medida que se vaya produciendo. Se han utilizado varias soluciones para dicho problema en el reactor, la más eficaz es el uso de una bomba de vacío la cual bajo la presión de 760 a 380 mmHg lo que produjo un aumento en la producción de Hidrógeno (de 0,348 a 0,376 mol H<sub>2</sub> / dm<sup>3</sup> / h) [60].

Los distintos tipos de reactores para la fermentación oscura se clasifican según el proceso que necesite o se diseñe, hay reactores por lotes, semicontinuos y continuos.

Para el caso de la producción de hidrógeno a escala industrial normalmente se escogen los reactores continuos debido a que se obtienen mejores rendimientos, este tipo de reactores generalmente se inician en modo discontinuo para asegurar la preparación adecuada del inóculo y su pretratamiento por ello los más utilizados son los reactores CSTR [60].

Los reactores CSTR generalmente tienen un diseño muy simple que consta de un sistema de agitación el cual permite ajustes condiciones homogéneas del medio y proporciona un buen contacto de los microorganismos con los sustratos, a su vez mejora la producción de hidrógeno debido a que disminuye la presión parcial del hidrógeno [60].

El mayor inconveniente es el tiempo de retención hidráulica (HTR) debido a que no se puede eliminar la biomasa y las bacterias no son capaces de actuar a altas diluciones, pero en caso de que se decida eliminar la biomasa se acortarán los tiempos de retención hidráulica lo cual afecta el rendimiento en la producción de hidrógeno [60].

Los biorreactores de membrana (MBR) también son bastante utilizados para la fermentación oscura, las membranas van colocadas fuera del reactor (MBR de flujo lateral) utilizando el flujo cruzado o se pueden sumergir haciendo que las membranas sean más pequeñas y que el reactor no sea tan costoso [60].

Debido a las membranas este tipo de reactores tienen un alto tiempo de retención hidráulica debido a que las membranas retienen los microorganismos haciendo que la concentración de biomasa se pueda mantener en altas concentraciones; sin embargo; aunque esto aumenta la conversión

disminuye la selectividad para la producción de hidrógeno lo cual se convierte en un factor negativo [60].

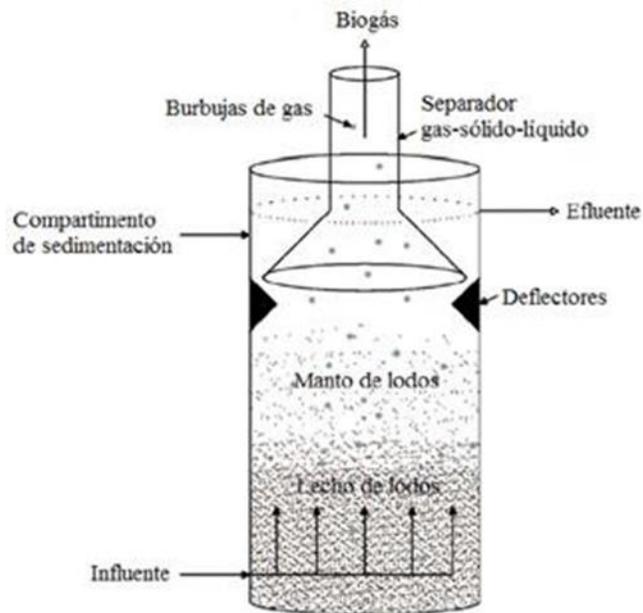
Una alternativa en los reactores son los de lecho empacado estos se caracterizan por tener tiempo de retención hidráulica (HTR) cortos. El lecho del reactor puede tener forma de gránulos, biopelículas o partículas de biomasa unidas a un gel, hay diferentes tipos de reactores de lecho empacado como reactores de manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB), reactores de lecho fluidizado anaeróbico (AFBR) y reactores de lecho de lodo granular expandido (EGSB) [60].

Para reactores de lecho empacado se han obtenido rendimientos de 3,02 mmol de H<sub>2</sub>/mmol de glucosa, estos rendimientos varían de acuerdo con las configuraciones del lecho ya sean tubular, ahusado y romboide; siendo el romboide el más eficaz [60].

Los reactores UASB tienen forma alargada el cual tiene un separador trifásico en la parte superior del reactor el cual está compuesto por deflectores desgasificadores los cuales separan el gas de partículas granuladas las cuales son productoras de hidrógeno, estas partículas desciende, para este caso se utiliza sedimentadores donde se separan los sólidos residuales los cuales son reconducidos a través de unos deflectores que los llevan a la superficie del manto del lodo, la principal desventaja de este reactor es que se necesita de más tiempo cuando se usa lodo activado granulado así mismo no siempre se produce el contacto adecuado entre la biomasa y el sustrato; sin embargo; tiene ventajas como una alta tasa de producción de hidrógeno y un tiempo de retención hidráulico corto[60].

**Figura 35**

*Reactor UASB*



*Nota.* Componentes y funcionamiento del reactor UASB.  
**Tomado de** D. D. Yans and G. Puebla, "Estudio De La Digestión Anaerobia En Dos Fases Para El Tratamiento De Las Aguas Residuales De Despulpe Del Beneficiado Húmedo DelCafé" 2012.

### 3. TRANSPORTE DE HIDROGENO CON GAS NATURAL

Actualmente la infraestructura dedicada al transporte de hidrógeno es prácticamente inexistente, especialmente a gran escala. Desarrollar el hidrógeno como vector energético y un mercado dedicado a este requerirá necesariamente de la disponibilidad de infraestructura para su transporte y distribución desde centros de producción con ventajas competitivas en términos de costes (p. ej., donde estén situadas las fuentes de energía renovable barata) hasta los centros de consumo (en la industria o para otros usos). [22]

Una de las soluciones que se puede presentar a mediano y corto plazo según la investigación realizada por Fernández et al. [17] utilizar la infraestructura ya existente de gas natural, esta opción se basa en la inyección de hidrógeno al gas natural lo que enriquecería al gas natural con volúmenes pequeños de hidrógeno; un ejemplo de este método es lo empleado por EEUU, Alemania o Reino Unido los cuales utilizaban en la primera mitad del siglo XX gases con alto contenido de hidrógeno; sin embargo; aún falta superar ciertos límites como las incompatibilidades en los usos finales de gas natural los cuales no son siempre los mismos y por lo tanto requeriría cierta cantidad de hidrógeno según el caso, generalmente se puede decir que el gas natural puede llegar a tener un 10% en volumen de hidrógeno sin que existan riesgos de deterioro en los gasoductos que lo transportan como en el caso de Alemania; sin embargo; en EEUU se llega a un 15% en volumen.[22]

Como ya se ha dicho anteriormente si se necesita el hidrógeno puro después de su transporte utilizando la infraestructura del gas natural existen tres métodos de separación; la adsorción PSA, la destilación criogénica, la separación con membranas la cual a su vez se divide en membrana polimérica y membrana Pd-Ag.[22] “La técnica PSA es la más desarrollada comercialmente e implantada a nivel industrial, ya que está asociada a la producción de hidrógeno por SMR o mejora de la calidad del gas natural.”[22]

En el desarrollo de la industria de hidrógeno se deberán diseñar gasoductos especialmente contruidos para ser eficaces y que sean capaces de transportar una alta cantidad de hidrógeno, algunos países han logrado ir desarrollando dichos gasoductos un ejemplo de ello es Estados Unidos el cual cuenta con una infraestructura más desarrollada, con unos 2.600 km de gasoductos en operación, el país que le sigue es Bélgica con una extensión de 600 km y detrás de estos dos

países se sitúan otros con una extensión de 400 km o menos. Como aún no se desarrolla esta industria no hay muchos gasoductos que se especializan en el transporte de hidrógeno esto se demuestra en los datos donde actualmente solo el 15% del hidrógeno se transporta en gasoductos y el 85% restante se consume en puntos cercanos como en refinerías o plantas químicas. [22]

En el caso de la aplicación de aceros de alta resistencia se sabe que el hidrógeno tiene un efecto contraproducente en las tuberías de acero por la integridad mecánica la cual se ve puede ver averiada porque cuando el hidrógeno se comprime parte de él se absorbe y después pasa a absorber la tubería lo cual reduce la ductilidad y la tenacidad. [22]

#### 4. DISEÑO CONCEPTUAL

##### Ubicación de la planta

Se escogió al departamento del Tolima debido a su constancia en la siembra y producción de maíz como ya se vio en la sección 2.3, pero más exactamente se escogió el Espinal, debido a que tiene un buen rendimiento 6,0 t/ha de maíz y un alto número de hectáreas 8900 ha, a continuación, se compara con los diferentes municipios productores del departamento. [61]

El anterior factor es el más importante debido a que la materia prima se encuentra a poca distancia lo que equivaldría a una mayor sostenibilidad del proceso.

**Tabla 10**

*Rendimiento y Áreas sembrada de maíz por municipio*

<b>MUNICIPIOS</b>	<b>AREA SEMBRADA (ha)</b>	<b>RENDIMIENTO (t/ha)</b>
Armero	2750	5,9
Espinal	8900	6,0
Falan	105	3,0
Guamo	3300	6,0
Ibagué	1086	5,0
Lérida	450	8,0
Mariquita	170	7,1
Natagaima	65	4,2
Ortega	910	4,0
Saldaña	300	2,0
San Luis	1570	3,0
Suarez	110	3,0
Valle del Juan	3010	4,7
<b>Total</b>	<b>22726</b>	<b>4,8</b>

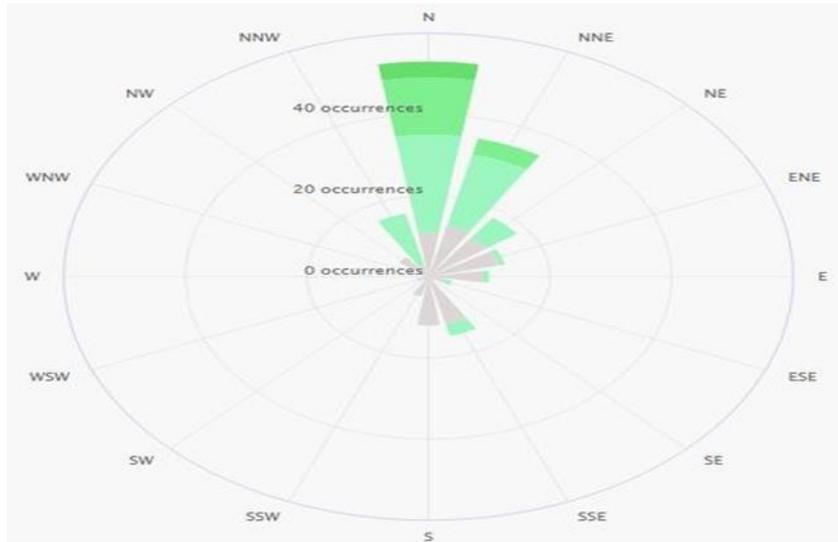
*Nota.* Maíz Tecnificado En 2017, donde producción es t y hectárea se ha **Tomado del Ministerio** de Agricultura, "PLAN Departamental De Extensión Agropecuario," 2019.

Para la ubicación exacta se realiza un estudio de la rosa de los vientos, el cual es un símbolo que marca el rumbo en el que se divide el horizonte, esto sirve para saber hacia dónde generalmente

sopla el viento lo cual nos ayuda a ubicar la planta de tal forma que no lleguen a afectar poblaciones con posibles contaminaciones.

**Figura 36**

*Rosa de los vientos municipio del Espinal*



**Nota.** La figura representa la rosa de vientos de Espinal, Tolima. Tomado de Meteocube, “CLIMA ESPINAL”, clima 2022. [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/pronostico/seasonaloutlook/espinal\\_colombia\\_3680840](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/pronostico/seasonaloutlook/espinal_colombia_3680840)

La ubicación que se escogió debido a los anteriores factores es la siguiente:

## Figura 37

### Ubicación del municipio de Espinal



**Nota.** La figura representa la ubicación del Espinal. Tomada de <https://www.google.es/maps/place/El+Espinal,+Tolima/@4.1499309,-74.8925773,15z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8e3ed3e7b60cca31:0xf2ccbe64cb1c5a28!8m2!3d4.1491048!4d-74.8837586?hl=es>

Para el desarrollo socioeconómico se tiene que hay 4 objetivos principales; el social, ambiental, económico e institucional, estos objetivos abarcan sectores como la educación, salud, agua potable y saneamiento básico, sector de gestión social, sector vivienda, sector cultura, sector deporte y recreación [62].

El sector educativo actualmente no está certificado aun así cuenta con 9 instituciones educativas oficiales y 26 instituciones educativas privadas, entre estas instituciones existen 67 sedes de las cuales 42 están situadas en el sector urbano y 25 en el sector rural, teniendo en cuenta lo anterior se tiene que la tasa de educación bajo para el nivel de transición de un 55% a un 46,52%, pero para niveles de primaria y secundaria subió la tasa con un porcentaje de 82,55% y 75,18%, respectivamente [62].

El municipio del Espinal está ubicado a 153 km de Bogotá y 48 km de Ibagué, el cual tiene una altitud de 323 msnm y una temperatura promedio de 27°C y tiene 3 ríos que lo rodean; Magdalena, Coello y Luisa. Hay varias fuentes que fortalecen la economía de este municipio como la ganadería y la piscicultura, pero la principal es la agricultura la cual se centra en la producción de arroz, maíz,

algodón y sorgo. Sin embargo, la falta de planificación por parte de los estados y gobiernos de turno el campesino se ve en desventaja debido a que dependen de la tendencia del mercado, además de ello los insumos se salen de regulación en pretexto de que están amarrados al precio del dólar [62].

Las industrias manufactureras se encuentran calificadas sobre todo en sectores como la metalmecánica, molinera de arroz y aceites industriales [62].

En materia de transporte y vías de comunicación está ubicado estratégicamente ya que tiene comunicación a Bogotá, Ibagué, Neiva, Coello y Suarez y donde además la mayoría de sus vías están en buen estado debido a que se lograron pavimentar 40 calles urbanas y se instalaron 7 km de placa huella [62].

Los servicios públicos en Espinal tienen una alta cobertura, el gas tiene un 81,3% de cobertura y para la energía tienen el 100% de cobertura. Con respecto al agua se registraron 500 hectáreas de terreno que se han adquirido aguas arriba de la bocatoma del acueducto que surte de agua al municipio [62].

#### **4.1 Capacidad de producción y tipo de proceso**

Para el año 2020 el municipio de Espinal tuvo una producción de maíz 50.067 toneladas y por semestre 41722,5 y 8344,5 toneladas. Para el primer semestre del año se tuvo un promedio de 6953,75 toneladas y para el segundo semestre 1390,75 toneladas lo cual da un promedio por día de 232 toneladas para el primer semestre y 46 toneladas para el segundo semestre.

Entre los tipos de reactores que se pueden encontrar están los tipos Batch, CSTR y UASB, estos reactores pueden funcionar tanto en el pretratamiento como en la fermentación oscura.

El crecimiento de los microorganismos está dividido en la fase de adaptación, fase de crecimiento o exponencial, fase estacionaria y fase de muerte. Existen modelos de crecimiento como el modelo de Monod, modelo de Moser, modelo de Teisser, modelo de Haldane, modelo de Gomepertz, modelo de Powell.

Algunas de las variables que se deben tener en cuenta es el volumen del reactor el cual no se debe llenar, la concentración de biomasa, velocidad de crecimiento, esterilización, disolución de oxígeno (DO), aireación, agitación.

Se comienza calculando el reactor donde se realizará el pretratamiento el cual el método es la bio deslignificación y sacarificación simultánea. Para ello se tomó el dato de 46 toneladas por semestre tomando en cuenta los datos en la página del ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=4>). Sabiendo que se tiene una relación mínima de 0,8 kg de residuo/ 1 kg de producto se multiplicó la cantidad de toneladas producidas por dicha relación.

### **Ecuación1.**

$$46000000 \text{ kg Maíz} * \frac{0.8 \text{ kg de residuo}}{1 \text{ kg Maíz}}$$

$$36800000 \text{ kg de residuo/semestre}$$

Según el artículo utilizado el pretratamiento debe tener un tiempo de 72 horas por lo tanto se dividió la cantidad de residuo por 72 y así se determinó la cantidad de materia prima que se ha de introducir al sistema cada 72 horas; la cantidad de materia prima calculada fue de 0,420 kg cada 72 hrs.

La primera unidad es la molienda por bolas vibratorias en la cual se hizo un balance de masa, dicho balance de masa se basó en el flujo de salida por cada compuesto y el flujo total de la corriente de la tesis titulada “Estudio exploratorio para la producción de bioetanol y co-productos de biorrefinería, a partir del rastrojo de maíz” elaborada por Diego Alejandro Schneuer Finlay, en el año 2010 [63]. En el cual se utilizó la siguiente relación.

### **Ecuación 2**

$$X\% = \frac{FC * 100\%}{FT}$$

Donde;

FC; es el flujo por cada compuesto.

FT; es el flujo total de la salida de la unidad de molienda.

**Tabla 11***Composición de salida en la molienda*

<b>COMPONENTE</b>	<b>X%</b>
GLUCANO	<b>37,04%</b>
XILANO	<b>20,31%</b>
LIGNINA	<b>12,18%</b>
CENIZAS	<b>3,00%</b>
AGUA	<b>10,00%</b>
ARABINOSA	<b>4,95%</b>
GALACTOSA	<b>2,61%</b>
MANOSA	<b>1,112%</b>
EXTRAIBLES	<b>8,80%</b>

*Nota.* Composición del flujo en la salida de la molienda.

A partir de los porcentajes finales de cada compuesto y una base de cálculo que se tomó del 4200g/72h, calcularon la masa de cada compuesto.

**Ecuación 3**

$$Salida (g) = \frac{(X\% * Base\ de\ calculo)}{100\%}$$

Quedando así la corriente de salida de la unidad de molienda

**Tabla 12***Composición en peso de salida en la molienda*

<b>COMPONENTE</b>	<b>SALIDA (g)</b>
GLUCANO	<b>1555,86</b>
XILANO	<b>853,01</b>
LIGNINA	<b>511,55</b>
CENIZAS	<b>125,86</b>
AGUA	<b>420,08</b>

ARABINOSA	<b>207,92</b>
GALACTOSA	<b>109,60</b>
MANOSA	<b>47,21</b>
EXTRAIBLES	<b>369,78</b>

*Nota.* Composición en peso en la salida de la molienda

Para la entrada a la unidad de molienda se tomó la relación de entrada y salida del trabajo “Estudio exploratorio para la producción de bioetanol y co-productos de biorrefinería, a partir del rastrojo de maíz” [63] donde la entrada queda.

**Tabla 13**

*Composición de la entrada en la molienda*

<b>COMPONENTE</b>	<b>X%</b>	<b>ENTRADA (g/h)</b>
GLUCANO	<b>37,22%</b>	1571,54
XILANO	<b>37,48%</b>	1582,32
LEGNINA	<b>12,24%</b>	516,70
CENIZAS	<b>3,01%</b>	127,13
AGUA	<b>10,05%</b>	424,31
ARABINOSA	<b>4,97%</b>	210,01
GALACTOSA	<b>2,62%</b>	110,71
MANOSA	<b>1,13%</b>	47,69
EXTRAIBLES	<b>8,85%</b>	4964,0
	<b>100%</b>	

*Nota.* Composición del flujo en la entrada de la molienda

**Tabla 14***Escalamiento de la entrada y salida de la molienda*

<b>ESCALAMIENTO</b>				
<b>COMPONENTE</b>	<b>COMPOSICIÓN %</b>	<b>ENTRADA (g/h)</b>	<b>COMPOSICIÓN %</b>	<b>SALIDA (g)</b>
GLUCANO	<b>37,22%</b>	1571,540	<b>37,04%</b>	1555,865
XILANO	<b>37,48%</b>	1582,322	<b>20,31%</b>	853,010
LIGNINA	<b>12,24%</b>	516,704	<b>12,18%</b>	511,550
CENIZAS	<b>3,01%</b>	127,136	<b>3,00%</b>	125,869
AGUA	<b>10,05%</b>	424,319	<b>10,00%</b>	420,084
ARABINOSA	<b>4,97%</b>	210,017	<b>4,95%</b>	207,920
GALACTOSA	<b>2,62%</b>	110,712	<b>2,61%</b>	109,608
MANOSA	<b>1,13%</b>	47,693	<b>1,12%</b>	47,217
EXTRAIBLES	<b>8,85%</b>	373,51	<b>8,80%</b>	369,78

*Nota.* Escalamiento de la molienda en flujos de salida y de entrada

Para la determinación de la potencia de un molino de bolas se obtuvieron mediante la siguiente ecuación.

#### Ecuación 4

$$P = 10W_i \left[ \frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{F80}} \right] m$$

*Nota.* Potencia necesaria para la molienda Tomada de Anonymous "Diseño Conceptual De Un Biorreactor Para La Producción De Biomasa De Azotobacter chroococcum A Escala Banco Sonia Marcela López López Danilo Sebastián Vega Higuera Fundación Universidad De América Facultad De Ingenierías Programa De Ingeniería Química Bogotá, D.C 2020,".

Donde  $W_i$  es el índice de trabajo, P80 indica que el 80% del producto pasará por el tamizado, el F80 indica el tamaño de alimentación y  $m$  indica el flujo másico. Los datos del molino fueron tomados de la base de datos de la empresa itomak, por lo tanto, al reemplazar la ecuación queda:

$$P = 10 \left( 34.3 \frac{KW-h}{t} \right) \left[ \frac{1}{\sqrt{250}} - \frac{1}{\sqrt{3360}} \right] * 153$$

Para el diseño del reactor que contiene la bio deslignificación y sacarificación simultánea (SBS) siguiendo la relación óptima de  $p/v$  la cual es  $1/20$ , se consiguió hallar el 75% del volumen del reactor para el pretratamiento.

#### Ecuación 5

$$V_{camara} = \frac{2100g * 200mL}{1g}$$

$$V_{camara} = 42009 mL$$

Para este reactor se le da un volumen extra de un 25% de capacidad, es decir;

$$V_{extra} = 42.01 L * 25\%$$

$$V_{extra} = 10.50 L$$

Por lo tanto, el volumen total es

$$V_{total} = 10.50L + 42.01L$$

$$V_{total} = 52.51L$$

A partir de ese volumen se calculó la altura total del reactor el cual se calculó mediante la siguiente fórmula:

### Ecuación 6

$$h = \sqrt{\frac{V_{bioreactor} * 9}{\pi}}$$

$$h = 0,531m$$

**Nota.** Dimensiones del reactor **Tomada de** Anonymous "Diseño Conceptual De Un Biorreactor Para La PRODUCCIÓN De Biomasa De Azotobacter chroococcum A Escala Banco Sonia Marcela López López Danilo Sebastián Vega Higuera Fundación Universidad De América Facultad De INGENIERÍAS Programa De Ingeniería Química bogotá, D.C 2020,".

Con la altura se calculó el diámetro total del reactor:

### Ecuación 6

$$D_t = \frac{2}{3} * h$$

$$D_t = 0,354 m$$

**Nota.** Dimensiones del mezclador. **Tomada de** Anonymous "Diseño Conceptual De Un Biorreactor Para La PRODUCCIÓN De Biomasa De Azotobacter chroococcum A Escala Banco Sonia Marcela López López Danilo Sebastián Vega Higuera Fundación Universidad De América Facultad De INGENIERÍAS Programa De Ingeniería Química bogotá, D.C 2020,".

De acuerdo con el diámetro total se puede calcular el diámetro impulsor ( $D_a$ ), distancia del fondo del impulsor ( $C$ ), el ancho de paletas y el largo de las paletas:

**Ecuaciones 8,9,10,11**

$$\begin{aligned} \frac{D_a}{D_t} &= 0,5 \\ D_a &= 0,18 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{C}{D_t} &= 0,33 \\ C &= 0,117 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{W}{D_a} &= 0,2 \\ W &= 0,04 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{L}{D_a} &= 0,25 \\ W &= 0,04 \text{ m} \end{aligned}$$

**Nota.** Dimensiones del mezclador. **Tomada de** Anonymous "Diseño Conceptual De Un Biorreactor Para La PRODUCCIÓN De Biomasa De Azotobacter chroococcum A Escala Banco Sonia Marcela López López Danilo Sebastián Vega Higuera Fundación Universidad De América Facultad De INGENIERÍAS Programa De Ingeniería Química bogotá, D.C 2020,".

A partir del volumen se hallan los azúcares fermentables, se sabe gracias a que el artículo reporta que 100 mL producen 56 gr de azúcares fermentables, se toma dicha relación para hallar una aproximación empírica de la producción de azúcares fermentables.

### Ecuación 12

$$\text{Azucares} = \frac{2100 \text{ g R. maiz} * 56 \text{ g azucares}}{100 \text{ g R. maiz}}$$

$$\text{Azucares} = 1176 \text{ g}$$

Para la obtención de la masa de la glucosa y xilosa utilizaron los gramos de biomasa utilizados en el artículo, el rendimiento de la glucosa y la xilosa y por último las constantes 0.9 y 0.88 para la glucosa y la xilosa respectivamente.

### Ecuación 13

$$\text{Rend. Glucosa} = \frac{\text{Gramos de la glucosa en la hidrolizacion} * 0,9}{\text{Gramos de biomasa bruta}}$$

**Nota.** Rendimiento Glucosa. **Tomada de** Ma,K. and Z. Ruan, (Jan2015)."Production of a lignocellulolytic enzyme system for simultaneous bio-delignification and saccharification of corn stover employing co-culture of fungi." *Bioresource Technology*. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25459871>. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.10.161.

### Ecuación 14

$$\text{Rend. Xilosa} = \frac{\text{Gramos de la Xilosa en la hidrolizacion} * 0,9}{\text{Gramos de Xilano en biomasa bruta}}$$

**Nota.** Rendimiento Xilosa. **Tomada de** Ma,K. and Z. Ruan, (Jan2015)."Production of a lignocellulolytic enzyme system for simultaneous bio-delignification and saccharification of corn stover employing co-culture of fungi." *Bioresource Technology*. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25459871>. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.10.161.

Para el escalamiento tanto de la Glucosa y de la Xilosa utilizaron los rendimientos que los calcularon gracias al artículo en el cual para la glucosa es 4,57 g y para la Xilosa 4,44 g.

$$Glucosa = \frac{2100 \text{ g R. maiz} * 4,57 \text{ g Glucosa}}{100 \text{ g R. maiz}}$$

$$Glucosa = 95,92 \text{ g Glucosa}$$

$$Xilosa = \frac{2100 \text{ g R. maiz} * 4,44 \text{ g Glucosa}}{100 \text{ g R. maiz}}$$

$$Xilosa = 93,21 \text{ g Xilosa}$$

Para el diseño de la inoculación se tomó dicho volumen debido a que en el artículo científico por cada 120 ml de medio de cultivo se producen 100 ml de enzimas crudas:

#### **Ecuación 15**

$$m_{incubacion} = \frac{42009 \text{ mL} * 1,2 \text{ g}}{120 \text{ mL}}$$

$$m_{incubacion} = 420 \text{ g}$$

Para saber cuánto volumen de hongos se necesita en la planta se utilizaron los datos prácticos del artículo “production of a lignocellulolytic enzyme system for simultaneous bio-delignification and saccharification of corn stover employing co-culture of fungi” (Kedong Ma, Zhiyong Ruan 2015) donde para 100 mL de medio se utilizaron 7 mL de hongos, teniendo dichos datos y sabiendo cual es el volumen del reactor inoculador, se obtuvo una relación lineal, la cual es:

#### **Ecuación 16**

$$Inoculo \ planta = \frac{Vol. \ planta * vol \ hongos}{Vol \ lab}$$

Y para determinar la actividad de la enzima la cual se mide en U/mL; donde U se define como 1 μmol de sustrato oxidado por minuto, se utilizó los siguientes datos dados por el artículo.

**Tabla 15**

*Enzimas y su actividad*

COMPOSICIÓN SALIDA	ACTIVIDAD (U/ml)
CMCase	1928
Xilanasa	1652
Lacasa	2180

*Nota.* Actividad enzimática para la des lignificación

Para hallar la actividad enzimática se utiliza la siguiente relación lineal:

**Ecuación 17**

$$Act. Enzimática planta = \frac{Ino. total lab * Ino. total planta}{Act. Enzimática lab}$$

Al igual que los otros reactores el volumen del medio se le aumenta el 25% para el volumen total de un reactor.

$$V_{total} = 42009mL + 10502mL = 52511mL$$

A partir del volumen se pueden encontrar la altura y el diámetro total del reactor

**Ecuación 6**

$$h = \sqrt[3]{\frac{V_{bioreactor} * 9}{\pi}}$$

$$h = 0,532 m$$

*Nota.* Dimensiones del reactor. **Tomada de** Anonymous "Diseño Conceptual De Un Biorreactor Para La PRODUCCIÓN De Biomasa De Azotobacter chroococcum A Escala Banco Sonia Marcela López López Danilo Sebastián Vega Higuera Fundación Universidad De América Facultad De Ingenierías Programa De Ingeniería Química bogotá, D.C 2020,".

Con la altura se calculó el diámetro total del reactor:

**Ecuación 7**

$$Dt = \frac{2}{3} * h$$

$$Dt = 0,797m$$

De acuerdo con el diámetro total se puede calcular el diámetro impulsor (Da), distancia del fondo del impulsor (C) y el ancho de paletas:

**Ecuaciones 8,9,10,11**

$$\begin{aligned} \frac{Da}{Dt} &= 0,5 \\ Da &= 0,40 m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{C}{Dt} &= 0,33 \\ Da &= 0,263 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{W}{Da} &= 0,2 \\ Da &= 0,08 m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{L}{Da} &= 0,25 \\ Da &= 0,10 m \end{aligned}$$

**Nota.** Dimensiones del mezclador **Tomada de** Anonymous "Diseño Conceptual De Un Biorreactor Para La PRODUCCIÓN De Biomasa De Azotobacter chroococcum A Escala Banco Sonia Marcela López López Danilo Sebastián Vega Higuera Fundación Universidad De América Facultad De Ingenierías Programa De Ingeniería Química bogotá, D.C 2020,".

Para el balance de energía de la unidad incubadora se utiliza la siguiente ecuación, la cual es desarrollada a partir de la primera ley de la termodinámica.

### Ecuación 18

$$Q_{requerido} = m_{(medio\ de\ cultivo)} [Kg] * Cp_{(medio\ del\ cultivo)} \left[ \frac{J}{Kg * K} \right] * \Delta T [K]$$

Ecuación del balance de energía Tomada de Anonymous "Diseño Conceptual De Un Biorreactor Para La PRODUCCIÓN De Biomasa De Azotobacter chroococcum A Escala Banco Sonia Marcela López López Danilo Sebastián Vega Higuera Fundación Universidad De América Facultad De Ingenierías Programa De Ingeniería Química bogotá, D.C 2020,".

Donde;

Q: Calor requerido

Cp: Capacidad calorífica del medio de cultivo

m: masa del medio de cultivo

$\Delta T$ : Diferencial de temperatura

**Tabla 16**

*Composición de entrada en el pretratamiento*

COMPOSICION ENTRADA	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,2) (L)	1777,3
Urea (0,05) (s)	1323
CaCl <sub>2</sub> (0,05) (s)	2152
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (0,3) (s)	2340
MgSO <sub>4</sub> *7H <sub>2</sub> O (s)	1,67
NaOH (L)	2125
Mazorca	282,38
Rastrojo de maíz	131
Salvado de trigo	260

*Nota.* Compuestos en la entrada de pretratamiento y sus densidades

Para hallar la masa del medio de cultivo se hallaron las densidades de los compuestos por la base de datos de Knovel o artículos científicos, esto debido a que ya se tiene el volumen.

A partir de las densidades de cada compuesto se halló la densidad total del medio, utilizando la siguiente fórmula.

### Ecuación 19

$$\rho_{\text{medio}} \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = \rho_{(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(0.2)} * 11.11\% + \rho_{\text{urea}(0.05)} * 11.11\% + \rho_{\text{CaCl}_2(0.05)} * 11.11\% \\ + \rho_{\text{KH}_2\text{PO}_4(0.3)} * 11.11\% + \rho_{\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}} * 11.11\% + \rho_{\text{NaOH}} * 11.11\% + \rho_{\text{R.maiz}} \\ * 11.11\% + \rho_{\text{maiz}} * 11.11\% + \rho_{\text{S.trigo}} * 11.11\%$$

**Nota.** Densidad del medio Tomada de Anonymous "Diseño Conceptual De Un Biorreactor Para La PRODUCCIÓN De Biomasa De Azotobacter chroococcum A Escala Banco Sonia Marcela López López Danilo Sebastián Vega Higuera Fundación Universidad De América Facultad De Ingenierías Programa De Ingeniería Química bogotá, D.C 2020,".

Donde se multiplicó cada densidad por la composición la cual es 11.11% para todos, debido a que todos tienen una concentración de 10 g/L. La ecuación utilizada para la masa del medio es:

### Ecuación 20

$$m_{\text{medio del cultivo}} = \rho_{\text{medio}} * V_{\text{medio del cultivo}}$$

**Nota.** Medio de cultivo Tomado de. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc, "THERMAL PROPERTIES OF FOODS" in 2018 ASHRAE Handbook - Refrigeration, I-P Edition ed. Anonymous 2018, Available: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpASHRAES3/id:kt011KKPF4/ashrae-handbook-refrigeration/thermal-properties-foods?kpromoter=&#61;Summon>.

Por lo tanto, reemplazando los datos de la ecuación queda:

$$m_{medio} = 1155 \frac{kg}{m^3} * 0.042009 m^3$$

$$m_{medio} = 48,508 kg$$

Para el Cp de los compuestos Hidróxido de sodio, fosfato dipotásico, cloruro de calcio y sulfato de amonio, se investigaron los coeficientes en Knovel. El Cp tiene las unidades de (J/kg/K)

Para el sulfato de magnesio se utilizó la relación de máxima y mínima concentración que nos da la base de datos de Knovel, haciendo una relación lineal para hallar calor específico.

**Tabla 17**

*Capacidades caloríficas de los compuestos del pretratamiento*

COMPOSICION ENTRADA	Cp (J/kg*k)
(NH4)2SO4 (0,2) (L)	0,0545
Urea (0,05) (S)	1,550
CaCl2 (0,05) (S)	0,658
KH2PO4 (0,3) (S)	0,835
MgSO4 *7H2O (S)	1,171
NaOH (L)	2,187

*Nota.* Capacidades caloríficas de la composición de entrada al pretratamiento

En el caso de las diferentes biomásas se utilizó el artículo Thermal properties of foods, en el cual el Cp total de cada biomasa, se divide en Cp's los cuales se dividen en proteína grasa carbohidrato, fibra y ceniza, cada una de estas composiciones tienen una ecuación las cuales son:

## Ecuación 20

$$\text{Proteína} \quad C_p = 2,0082 + 1,2089 \times 10^{-3}t - 1,3129 \times 10^{-6}t^2$$

$$\text{Grasa} \quad C_p = 1,9842 + 1,4733 \times 10^{-3}t - 4,8008 \times 10^{-6}t^2$$

$$\text{Carbohidrato} \quad C_p = 1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3}t - 5,9399 \times 10^{-6}t^2$$

$$\text{Fibra} \quad C_p = 1,8459 + 1,4733 \times 10^{-3}t - 4,8008 \times 10^{-6}t^2$$

$$\text{Ceniza} \quad C_p = 1,0926 + 1,8896 \times 10^{-3}t - 3,6817 \times 10^{-6}t^2$$

*Nota.* Cp para biomazas Tomada de American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc, "THERMAL PROPERTIES OF FOODS" in 2018 ASHRAE Handbook - Refrigeration, I-P Edition ed. Anonymous 2018, Available: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpASHRAES3/id:kt011KKPF4/ashrae-handbook-refrigeration/thermal-properties-foods?kpromoter=&Summon>.

La temperatura que utilizaron para hallar todos lo Cp's fue 299.15, una vez obtenido el Cp's por composición nutricional de cada biomasa, se hace una sumatoria del resultado de Cp's por la multiplicación con la composición para hallar el Cp de cada biomasa.

$$C_u = \sum C_i X_i$$

Donde;

Cu; calor específico = Cp

Ci; calor específico por componentes

Xi; fracción másica de cada componente

**Tabla 18***Capacidades caloríficas de las biomosas utilizadas*

COMPOSICION ENTRADA	Cu
Mazorca	1,66
Rastrojo de maíz	1,73
Salvado de trigo	1,77

*Nota.* Capacidades caloríficas de la biomasa.

Una vez hallados los Cp's de la biomasa se utiliza la siguiente ecuación para hallar la composición total del medio de cultivo.

Y una vez hallado el Cp se puede hallar el Q requerido; para el cual se utiliza la fórmula antes mencionada. Por lo tanto;

$$Q_{requerido} = 48,508 \text{ Kg} * 1,292 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}} * (299,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K})$$

$$1,630 \text{ J}$$

Para el caso del balance de energía del reactor de **bio des lignificación y sacarificación simultánea (SBS)** se supuso que las propiedades de las enzimas son como las del agua, en este caso las propiedades supuestas fueron el Cp y la densidad. Por lo tanto;

$$Cp_{H2O} \approx Cp_{ENZIMAS} \approx 75.441 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}}$$

$$\rho_{H2O} \approx \rho_{ENZIMAS} \approx 997 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$Cp_{H2O} \approx Cp_{ENZIMAS} \approx 75,441 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}}$$

$$\rho_{H2O} \approx \rho_{ENZIMAS} \approx 997 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

A partir de esta densidad y el volumen obtenido se puede calcular la masa de las enzimas:

$$m_{enzimas} = \left(997 \frac{kg}{m^3} * 0,0420m^3\right) * 1000$$

$$m_{enzimas} = 41874 g$$

A partir de esta masa se encontró la concentración de las enzimas;

$$[Enzimas] = \frac{41883 g}{42,01L}$$

$$[Enzimas] = 997 g/L$$

A partir de la concentración se encontraron las composiciones;

**Ecuación 21**

$$Composicion = \frac{[Compuesto] * 100\%}{[Total]}$$

**Tabla 19**

*Composición de entrada al proceso SBS*

REACTIVOS	Composición	g/L
Rastrojo de maíz	0,0478	50
Tetraciclina	0,9522	997
CMCasa		
Xilosa		
Lacasa		

*Nota.* Composición a la entrada del proceso SBS

Se hallaron las densidades a partir de la siguiente ecuación;

### Ecuación 22

$$\rho_{medio} = \left(156 \frac{Kg}{m^3} * 0.478\right) + \left(997 \frac{Kg}{m^3} * 0.9522\right)$$

$$\rho_{medio} = 956.84 \frac{Kg}{m^3}$$

Para hallar la masa del medio se utilizó la siguiente ecuación;

### Ecuación 23

$$m_{medio} = 956.84 \frac{Kg}{m^3} * 0.0420 m^3$$

$$m_{medio} = 40.20 Kg$$

Ya obteniendo a densidad y la masa del medio se encontró el calor requerido:

### Ecuación 24

$$Q_{requerido} = 40.20 Kg * 956.84 \frac{Kg}{m^3} * (303.15K - 299.15K)$$

$$Q_{requerido} = 11564 J$$

Para el diseño del reactor de fermentación y la obtención del hidrogeno se utilizó la bacteria *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* W16, la cual es anaerobia estricto y crece en una gran gama de hexosas como glucosa y Xilosa a temperaturas 37 a 75°C, su principal atractivo es que producen enzimas termoestables.

Para el diseño de dicho reactor se tomó como referencia el articulo continuous hydrogen production from glucose/xylose by an anaerobic sequential batch reactor to maximize the energy recovery efficiency; en donde el volumen que se tomó del artículo para el inoculo es de 100 mL sin embargo el volumen que se utiliza es 60 mL, para el diseño se utilizó como punto de partida la

concentración de glucosa la cual es de 10 g/L, a partir de dicha relación podemos obtener la siguiente relación:

$$V_{medio} = \frac{(0.06 \times 95.92)}{0.6}$$

$$V_{medio} = 9.59 L$$

Donde 0,06 L es el volumen del inóculo del laboratorio, 0,6 es la masa de glucosa en dicho volumen y 95,92 es la masa encontrada en el diseño del pretratamiento. Para hallar el volumen total del reactor de inóculo se utilizó la relación entre el volumen del medio y el volumen total, como se muestra a continuación:

$$V_R = \frac{100}{60}$$

$$V_R = 1,66$$

Por lo tanto, el volumen total del reactor de incubación es:

$$V_t = 9,59 \times 1,66$$

$$V_t = 15,987$$

Las condiciones para el reactor de inoculación son:

**Tabla 20**

*Condiciones ideales*

Condiciones	Valores	
pH	7	
TRH	15 min	
T <sub>inicial</sub>	303,15	
T <sub>final</sub>	394,15	

*Nota.* Condiciones ideales para la inoculación.

Para hallar la cantidad necesaria de cada compuesto para la inoculación del reactor se utilizó la siguiente fórmula:

$$masa = Concentracion * V_{medio}$$

Por lo tanto, las cantidades necesarios para inoculación son las siguiente:

**Tabla 21**

*Medio de inoculación*

<b>Medio inoculación Planta</b>	
<b>Componentes</b>	<b>Masa (g)</b>
Glucosa	95,920
NH <sub>4</sub> Cl	9,592
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	28,776
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	14,388
MgCl*6H <sub>2</sub> O	4,796
NaCl	9,592
KCl	1,918
HCl-cristalino	4,796
Extracto de levadura	19,184
Peptona	19,184

*Nota.* El medio de inoculación y su masa respectiva

Para el diseño de fermentador para la producción de hidrogeno se tomó de punto de referencia los volúmenes dados por el artículo continuous hydrogen production from glucose/xylose by an anaerobic sequential batch reactor to maximize the energy recovery efficiency; donde se sabe que los azúcares que se utilizan en el artículo tienen una concentración de 10 g/L a partir de dicha concentración se sumaron las cantidades de glucosa y Xilosa calculadas en el diseño, por lo tanto:

$$m_{medio} = 92,95g + 93,21g$$

$$m_{medio} = 189g \text{ Azucares fermentables}$$

Y tomando la relación entre la concentración del artículo y la masa obtenida en el diseño se tiene que

$$V_{medio} = \frac{189g * 1L}{10g}$$

$$V_{medio} = 18,9L$$

El reactor además de producir Hidrogeno también produce ácido acético, ácido butírico, Etanol Butanol y acetona.

**Tabla 22**

*Concentración en flujos*

<b>SALIDA</b>		
Ácido acético	0,072499	mmol/Lh
Ácido butírico	0,047597	mmol/Lh
Etanol	0,022695	mmol/Lh
Butanol	0,002837	mmol/Lh
Acetona	0,001576	mmol/Lh

*Nota.* Concentración en flujos de compuestos en salida

Para hallar las cantidades de subproducto producidas en el proceso se utilizaron las cantidades dadas en el artículo donde se dan las cantidades que se generaron en los experimentos hechos y el volumen del reactor diseñado, como se muestra a continuación

$$\frac{(V_{medio \text{ diseño}} * compuesto)}{V_{medio \text{ artículo}}}$$

El ácido acético es utilizado para la fabricación de resinas de emulsión de látex para pinturas, adhesivos, revestimientos de papel, agentes de acabado de textiles, como agente potenciador de señales en espectroscopia de fluorescencia; en la producción de vinagre de frutas a partir de jugo de cítricos; en una formulación pesticida; en una formulación utilizada para el control de enfermedades en colmenas; y en la producción de etanol utilizando un catalizador de cobalto.

El etanol generalmente es utilizado para mezclarse con los petróleos y derivados del cual se utiliza el 64% de la producción mundial de etanol, industrias procesadoras como cosméticos, farmacéutica, química etc se utiliza el 21% de la producción y para la elaboración de bebidas será del 13%.

Para el caso del butanol es altamente utilizado para el acetato de butilo y éter glicol la demanda ascendió 3,70 millones de toneladas en 2012 con un valor de 6.400 millones USD

Para los métodos de separación hay varias opciones como la adsorción por cambios de presión y por membrana.

Para el caso de la separación por adsorción por cambios de presión es un método bastante utilizado en procesos de reformado de metano con vapor y gases de escape de refinería debido a que purifica el hidrógeno en un 60% a 90%, generalmente la composición de las corrientes que alimentan el tren de separación es de 70-80% H<sub>2</sub>, 15-25% CO<sub>2</sub>, 3-6% CH<sub>4</sub>, 1-3% CO y trazas de N<sub>2</sub>, generalmente el gas de alimentación está a presiones de 8 a 28 atm y a unas temperaturas de 21°C a 38°C, generalmente estos procesos están diseñados para tener una corriente simultánea donde se obtiene CO<sub>2</sub> en un 99% puro; sin embargo; hay otros tipos de procesos que hacen énfasis en la producción de un gas de síntesis de amoníaco que contiene una mezcla de N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> que generalmente está 1:3. [64]

En el caso de la purificación por membrana se utilizan muchas de diferentes materiales y aleaciones, pero principalmente están clasificadas como metálicas, inorgánicas, carbones porosos, polímeros, dentro de estas membranas se evalúan propiedades mecánicas, térmicas y químicas. [65]

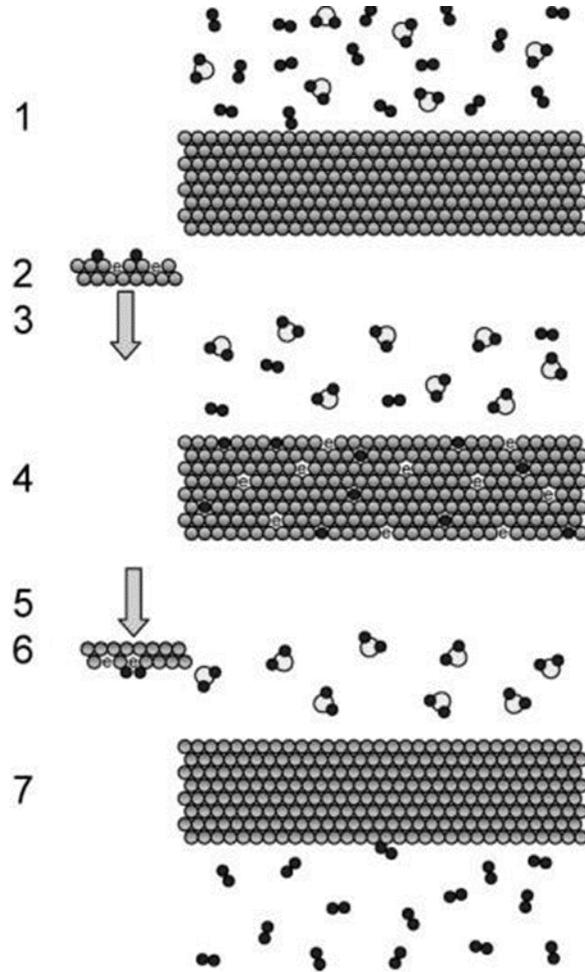
Para el caso de las membranas metálicas son láminas o películas por donde el hidrógeno penetra, debido a la conducción de electrones libres y la presencia de superficies catalíticas específicas para disociar el hidrógeno, uno de los factores más importantes es la selectividad del sistema debido a

que la membrana impide el paso de moléculas de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> los cuales son más grandes que los átomos de hidrógeno esto permite una alta pureza del hidrógeno y así mismo por ser membranas de metal permite temperaturas de funcionamiento más altas. [65] Los metales óptimos para la elaboración de estas membranas son el tantalio, niobio y vanadio los cuales tienen una alta estabilidad térmica y son abundantes; sin embargo; históricamente el material más usado ha sido el paladio debido a que actúa de forma natural en la disociación lo cual permite la purificación del hidrógeno de una forma eficiente desde la superficie de la membrana, ahora visto bajo una visión económica las membranas de paladio son bastante costosas. [65]

Las membranas de Pd y Pt están plagadas de una sensibilidad muy alta a la contaminación lo cual reduce el rendimiento de las membranas y causa que ya no sea una buena opción, [66] dicha contaminación se da a raíz de una interacción más favorable entre los gases contaminantes que el H<sub>2</sub>. [66] Generalmente estas membranas no son tan duraderas como el tantalio, niobio y vanadio, pero esto se compensa con aleaciones de Ag, Cu o Au. [67]

### Figura 38

#### Mecanismo de difusión en metales densos



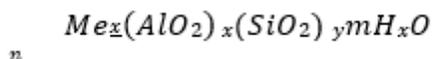
**Nota.** Mecanismo de difusión de siete pasos en fases de metal denso. (1) Muestra la mezcla de gas deseado con el  $H_2$  moviéndose hacia la superficie de la corriente de alimentación de la membrana; (2) Se disocia el  $H_2$  quimisorbido en iones de Hidrógeno ( $H^+$ ) y electrones ( $e^-$ ); (3) Adsorción de iones  $H^+$  en la masa de la membrana; (4) Difusión de los iones  $H^+$  y electrones a través de la membrana; (5) Desorción de iones  $H^+$  desde el volumen de la membrana hasta la superficie de la corriente de producto de la membrana; (6) Re asociación de los iones  $H^+$  y los electrones en moléculas discretas de  $H_2$ , y (7) Difusión del  $H_2$  desde la superficie del producto de la membrana **Tomado de** Ockwig, N. W. and T. M. Nenoff, (Oct 10, 2007). "Membranes For Hydrogen Separation." *Chemical Reviews*. Available: <http://dx.doi.org/10.1021/cr0501792>. DOI: 10.1021/cr0501792.

Otro tipo de membrana son las hechas de silicio las cuales, a nivel de rentabilidad de costos de producción, facilidad de fabricación y escalabilidad son mejores que las membranas metálicas,

[65] las membranas de silicio son inorgánicas y tienen una red de microporos conectados de aproximadamente 0,5 nm de diámetro lo que les otorga una selectividad muy alta para el Hidrógeno. [65] Existen dos tipos de membranas sol-gel modificación [68] y depósito químico de vapor. [69]

Las membranas hechas por Zeolita al ser una membrana inorgánica tienen la ventaja de tener una buena estabilidad térmica e inercia química lo que la hace más adaptable a escalonamiento industriales. [65] Las membranas Zeolíticas con estructuras orgánicas y cristalinas tienen poros de tamaño molecular y uniforme. [65] “La separación de gases y líquidos en las membranas de zeolita se rige principalmente por mecanismos competitivos de adsorción y difusión” [65]

Las zeolitas pertenecen a los aluminosilicatos cristalinos que tienen como fórmula general:

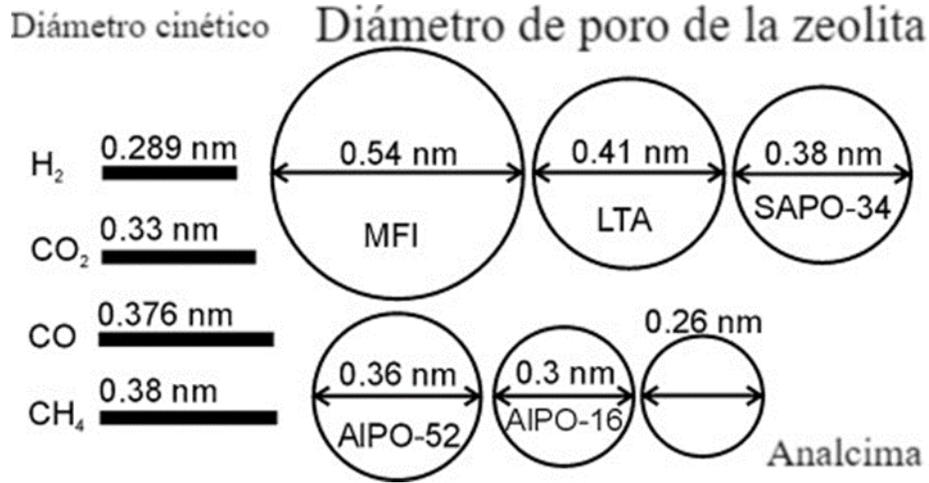


Donde x, m y n son números enteros correspondientes a la celdilla unidad, es decir, que los átomos están constituidos de forma regular en todas las direcciones y Me es un catión metálico de valencia n. [71]

La zeolita se caracteriza por tener un tamaño de poros regular que se encuentran generalmente entre 0,3 a 1,3 nm, entre las membranas zeolitas hay 20 tipos de estructuras entre las que se encuentran la MFI la cual presenta la facilidad en la preparación de la membrana y la versatilidad en diferentes operaciones, cada tamaño de poro tiene una efectividad según las diferentes zeolitas y según el gas que queramos separar como se muestra en la siguiente figura. [72]

**Figura 39**

*Poros de la membrana de zeolita*



*Nota.* Diámetros de poros de la zeolita y diámetros cinéticos de las moléculas de los gases. Tomado de Michalkiewicz, B. and Z. C. Koren, (Mar 11, 2015). "Zeolite Membranes For Hydrogen Production From Natural Gas: State Of The Art." J Porous Mater. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10934-015-9936-6>. DOI: 10.1007/s10934-015-9936-6.

El tamaño de los canales MFI son parecidos a los tamaños de los hidrocarburos lo cual genera una buena selectividad en especial de isómeros de hidrocarburos y algunos trabajos han demostrado altas selectividades del hidrógeno sobre gases N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO y CH<sub>4</sub>. [72]

Para el caso puntual de la obtención del hidrógeno a partir de hidrocarburos se tiene que las membranas de zeolita MFI tiene una modificación lo que las convierte en catalizadores y funcionan a temperaturas entre 400-550°C, la membrana mejoro la reacción de desplazamiento agua-gas, pero también mejoro la recuperación del hidrógeno generado en un 64%. [72]

Las membranas de Carbón se caracterizan por ser utilizadas en procesos de alta presión y/o alta temperatura esto debido a que poseen una estructura ultramicroporosa que es hecha a partir de la carbonización a partir de precursores poliméricos derivados de la celulosa. [73]

Las membranas de carbón también pueden ser modificadas con el metal MgO lo que causa una mejora de rendimiento en la selectividad H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> de 81 con una permanencia del H<sub>2</sub> de 0,05m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> h bar este rendimiento dio a condiciones estándar; sin embargo; se pronostica que al

aumentar las temperaturas la selectividad del H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> puede aumentar más, debido a que para las moléculas de gas más pequeñas que es el caso del Hidrógeno aumenta la permeación y por lo tanto la selectividad. [73]

En el artículo llamado Techno-economic feasibility analysis on carbon membranes for hydrogen purification se plantea un diseño de un sistema de membrana de carbono de dos etapas fue diseñado para purificar H<sub>2</sub> producido por fermentación, el sistema está compuesto por dos etapas las cuales produjeron una pureza de aproximadamente 99,5% y así mismo una recuperación del 95%. [73] “El consumo de energía específico se estimó en 0,45–0,62 kWh/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> producido a 20 bar bajo diferentes presiones de alimentación de 5 a 20 bar.” [73]

La dificultad de un escalado más técnico viene en un principio de la dificultad del manejo y la gestión de diferentes residuos, aunque se han creado políticas para la mejora, aun no se logra poner en práctica en su totalidad. La segunda dificultad proviene sobre el método para la gestión de residuos, hay muchas opciones como la digestión anaeróbica, la digestión aerobia, la hidrólisis, fermentación oscura y la licuefacción etc, sin embargo a pesar de haber muchas opciones ninguna ofrece una eficiencia suficiente, debido a que dependiendo del residuo y el método existen diferentes tipos de variables como el pH, la temperatura, diseño del reactor, el microorganismo o los microorganismos, el tiempo hidráulico de residencia y el tasa de producción de producto de interés, además de ello el proceso de producción también se ve afectado por el tipo de pretratamiento que se pueda escoger, debido a que tiene que ser eficaz y sostenible. [76]

Antes de utilizar cualquier tipo de método para el escalamiento se deben profundizar más en cada uno de ellos porque cada uno de estos métodos tiene factores de valorización como una tasa de degradación más rápida, un alto contenido de agua o un nulo contenido de agua, la oxidación y la actividad enzimática, juegan un papel importante en la gestión del desperdicio de alimentos, ya que ya tiene una mayor proporción de contenido orgánico. [76]

Además de los métodos se tiene que tener en cuenta que el sitio donde se llegue a ubicar la biorrefinería tampoco permite una ruta de valorización debido a que el área geográfica, el clima, los hábitos alimentarios ya que de esto también depende la clasificación de desechos que se puedan utilizar y la cantidad lo que nos lleva a una producción interrumpida o ininterrumpida, los productos como los gases venenosos como el H<sub>2</sub>S y los ácidos grasos de cadena larga afectan negativamente la producción sobre todo en aspectos medio ambientales. [76]

A partir de dicha problemática se diseñó la planta sabiendo las limitaciones que se pueden tener, utilizando los datos de los artículos como la cantidad de producción de azúcares fermentables, reactivos, graficas con el tiempo hidráulico de residencia en función de la producción y el crecimiento celular del microorganismo y relaciones másicas y volumétricas las cuales nos permitieron diseñar el volumen de los reactores, además de ello se utilizaron relaciones lineales las cuales se tendrán que poner a prueba más adelante en el proyecto debido a que aún está en la etapa de diseño conceptual la cual es una etapa temprana en la cual se deberán verificar los datos obtenidos y así ratificar o corregir los datos. [76]

El presente trabajo está basado en la biología sintética la cual se centra en el diseño y construcción de sistemas biológicos para la producción de diferentes tipos de productos, sin embargo a pesar de que ha sido un concepto bastante antiguo aún se tienen dos desafíos; el primer desafío es la modularización de desafíos y estandarización de partes biológicas y el segundo desafío es la integración de estas partes biológicas en dispositivos con las funciones deseadas, la unión de estos dos desafíos permitiría la construcción de procesos completos sin embargo el hecho de que muchos sistemas e interacciones no se entienden como por ejemplo la acción de ciertas enzimas que catalizan y que no se comportan igual en un entorno que no es nativo, por lo tanto aun encontrar resultados es difícil debido a que no siempre las rutas metabólicas se comportan de la misma manera, lo cual no permite una estandarización del proceso. [75]

De manera similar a la construcción de plantas químicas, la ingeniería de fábricas celulares requiere consideraciones cuantitativas y a nivel de sistema sobre cuestiones de diseño, control y optimización, e implica la aplicación directa de principios básicos de cinética, transporte y termodinámica que son los cimientos de la ingeniería química. [75]

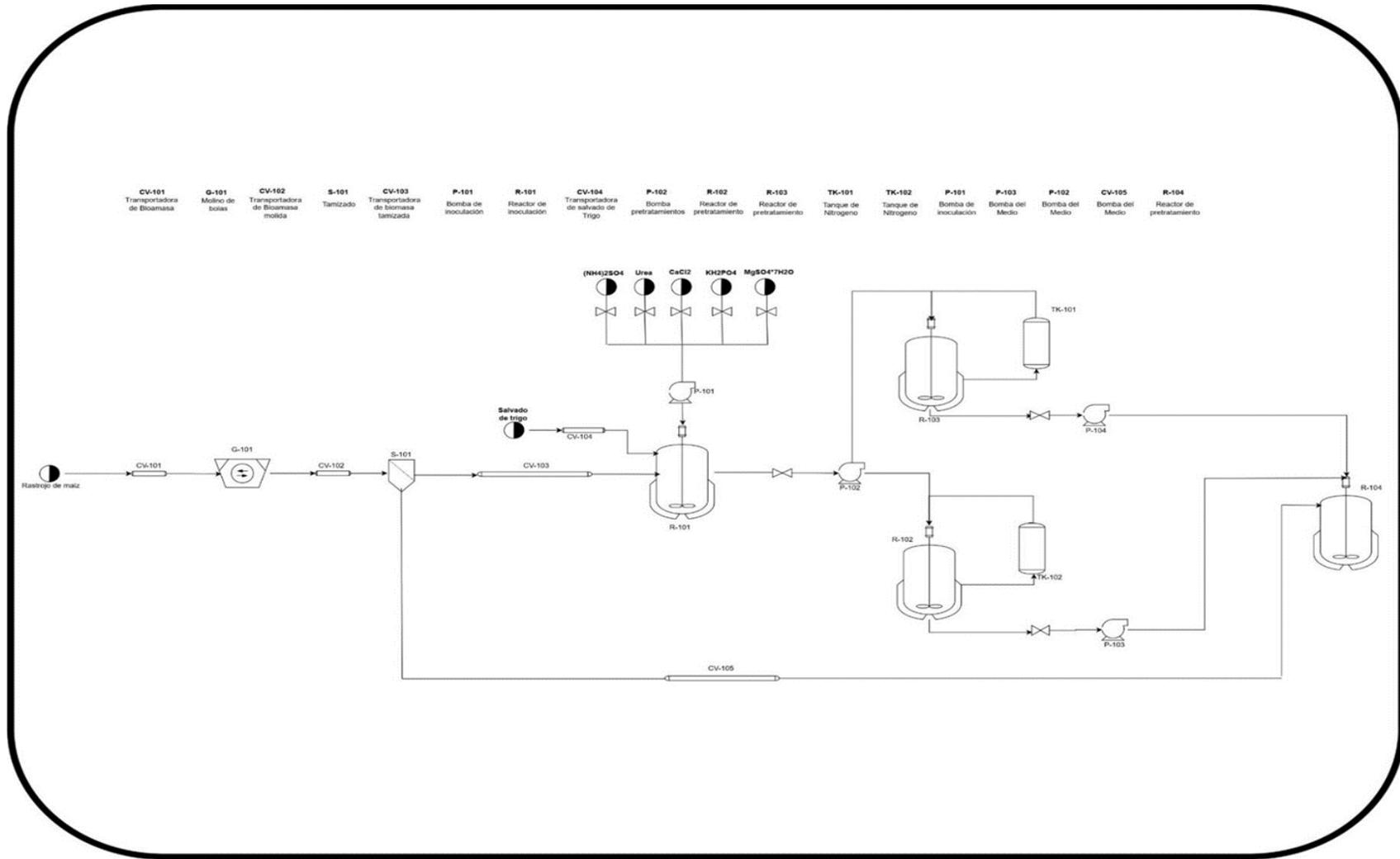
Aunque son muchos los desafíos hay un número creciente de oportunidades las cuales se pueden constituir en productos químicos. [75]

En términos de la cinética aunque en los artículos antes descritos en el diseño conceptual no se profundiza en el método que se utiliza para hallar las tasas de crecimiento del microorganismo, se utilizaron las gráficas y cálculos para la estimación de la degradación, la cuantificación y cualificación de los azúcares fermentables, todo lo anterior antes mencionado en función a la cantidad de enzimas que se produzca en el medio, estas mismas enzimas son puestas a prueba en diferentes condiciones de temperatura, pH y TRH (tiempo de retención hidráulico), por lo tanto en

el presente trabajo se obtuvieron bases experimentales para poder constituir el diseño primario de la planta.

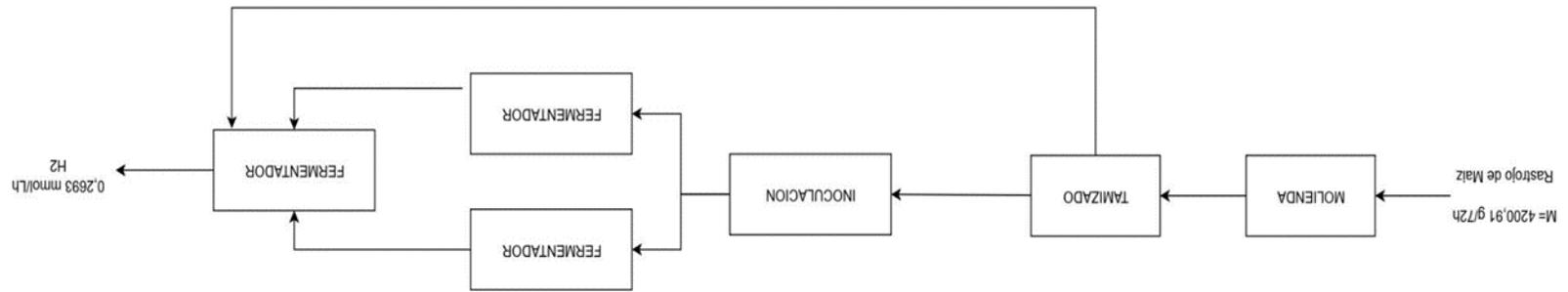
**Figura 40**

*Diagrama PI&D de la planta*



**Figura 41**

*Diagrama de la planta*



## 5. ANÁLISIS FINANCIERO

Para el análisis financiero se tomaron en cuenta factores como las inversiones fijas, costos de operación directos e indirectos y por último los costos varios.

### 5.1 Inversiones

#### 5.1.1 Inversiones fijas

Dentro de las inversiones fijas se encuentran los equipos, obras físicas, terreno, muebles y enseres.

#### Equipos

En la tabla 28. se presentan los costos de los equipos para el proceso de la obtención de H2. Los valores se obtuvieron a través de la página de internet de la empresa Matche, en donde se obtuvieron los valores al año 2014. Para la actualización de los costos se utilizó por medio de la siguiente formula:

$$C_a I_a = C_b \bar{I}$$

En la cual:

Ca: Costo de un equipo en la fecha actual

Cb: Costo de un equipo en la fecha pasada

Ia: Índice de precios actual

Ib: Índice de precios de una fecha pasada

**Tabla 23***Índice de precios actuales*

<b>Índice M&amp;S</b>	
<b>Año</b>	<b>Índice</b>
2014	1566,9
2022	2121,1

*Nota.* Índice de costos de equipos Marshall and Swift

**Tabla 24***Costo de equipos*

<b>EQUIPOS</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO (dólares)</b>	<b>VALOR TOTAL (dólares)</b>
Molino de bolas	1	\$ 52.929	\$ 52.929
Inoculador	4	\$ 99.767	\$ 399.068
Reactor	2	\$ 22.742	\$45.484
Fermentador	2	\$ 1.218	\$ 2.437
Total (dólares)			\$ 499.918
Total (pesos)			\$ 1.943.651.305

**Nota.** Costos de los equipos para la planta. **Tomado** <https://www.matche.com/equipcost/Default.html>

**Obras y terrenos**

El valor de la construcción por m2 se todo de la resolución 515 de 2020, en donde se tomó el valor de 385.700 que equivale a las Zonas industrial pesada.

**Tabla 25***Costo m2 terreno*

<b>UNIDAD</b>	<b>AREA (m<sub>2</sub>)</b>	<b>COSTO DE CONSTRUCCION (\$)</b>
Planta	250	\$ 96.425.000
Zona de utilities	90	\$ 34.713.000
Zona de almacenamiento	120	\$ 46.284.000
Oficinas	60	\$ 23.142.000
Vestier	20	\$ 7.714.000
Comedor	50	\$ 19.285.000
Laboratorios	30	\$ 11.571.000
<b>Área total construidas (m<sub>2</sub>)</b>	<b>620</b>	
<b>Costo total de construcción (COP)</b>		<b>\$ 239.134.000</b>
<b>Costo del terreno (1000m<sub>2</sub>)</b>		<b>\$ 22.000.000</b>
<b>Total (COP)</b>		<b>\$ 261.134.000</b>

*Nota.* Costo m2 terreno \$22.000 // Costo m2 construido \$385.700

### **Inversión en muebles y enseres**

La inversión en este rubro es destinada a la compra de computadores, teléfonos, escritorios e impresoras las cuales serán de unos \$30.000.000, este cálculo fue tomado con base a la tesis Diseño conceptual para la obtención de biodiesel a partir de algunos aceites vegetales colombianos.

### **Inversiones diferidas**

Las inversiones diferidas son los gastos preoperativos como la factibilidad del proyecto y otros gastos como la capacitación del personal, estudio legal Costo obras y terrenos.

**Tabla 26***Gasto Intangibles*

<b>Activos intangibles</b>	<b>Valor</b>
Estudio de factibilidad del proyecto	20.000.000
Capacitación de personal	10.000.000
Estudio legal	25.000.000
<b>Total (COP)</b>	<b>55.000.000</b>

*Nota.* Valores de gastos intangibles

**Costos directos**

Dentro de los costos se tienen en cuenta los costos de la materia prima y la mano de obra directa, dentro de estos costos no se cuenta los gastos de los carrotanques atendiendo a la norma NTC 1692 y 2801 en donde esta norma legisla el transporte de mercancías peligrosas clasificándolas mediante definiciones, el mercado y el rotulado de estas.

**Materia prima****Tabla 27***Costo materia prima*

<b>Materia prima</b>	<b>Valor</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total</b>
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,2) (L)	\$ 3500/L	28	99.273
Urea (0,05) (S)	\$ 3.000 /kg	50	151.232
CaCl <sub>2</sub> (0,05) (S)	\$ 14.800 / kg	50	746.080
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (0,3) (S)	\$37.632/kg	51	1.929.546
MgSO <sub>4</sub> *7H <sub>2</sub> O (S)	\$ 56.248/kg	50	2.835.507
NaOH (L)	\$ 140.855/L	24	3.341.465
Mazorca	\$ 9200/kg	42.01	
Rastrojo de Maíz	\$ 3120/kg	42,01	
Salvado de trigo	\$ 2840/kg	42,01	
NH <sub>4</sub> Cl	\$ 30.000/kg	0.576	17.266

K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	\$ 305.105/kg	1.727	526.787
MgCl <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	\$ 809.365/kg	0.288	232.905
NaCl	\$ 7.600/L	0.576	4.376
KCl	\$ 5.838/kg	0.115	672
HCl-cristalino	\$ 1.456/ ml	198	288.288
Peptona	\$ 973.964/kg	1.151	1.121.081
<b>TOTAL, ANUAL (COP)</b>			11 .931.350

*Nota.* Todos los valores están es pesos colombianos (COP)

### Mano de Obra directa

Para el cálculo de la mano de obra del proceso se tomaron 330 días cada uno de 24 horas y turno de máximo 8 horas y el número de personas que se ocupan de cada equipo.

Turnos por persona anuales:

$$49 \frac{\text{semanas}}{\text{año}} * 6 \frac{\text{turno}}{\text{semana}} = 294 \frac{\text{turnos}}{\text{año}}$$

Turnos para operación anual:

$$330 \frac{\text{días}}{\text{año}} * 3 \frac{\text{turnos}}{\text{día}} = 990 \frac{\text{turnos}}{\text{año}}$$

Se opto por tener 3 técnicos por equipo y cada persona es responsable de un turno de 8 horas, por lo tanto, se necesitan 11 operarios.

**Tabla 28***Costo mano de obra directa*

<b>Mano de Obra</b>	<b># de empleados</b>	<b>Salario base</b>	<b>Total mes</b>
<b>Operarios</b>	<b>12</b>	<b>908.526</b>	<b>10.902.312</b>

*Nota.* Costos de la mano de obra en su totalidad cada mes**Costos Indirectos Mano de obra indirecta**

La mano de obra está compuesta por 1 ingeniero de planta, 2 supervisores y 2 mecánicos.

**Tabla 29***Costo mano de obra indirecta*

<b>Cargo</b>	<b>Ingenieros</b>	<b>Supervisores</b>	<b>Operarios mantenimiento</b>
Salario base	\$ 5.000.000	\$ 1.800.000	\$ 908.526
Total mes	\$ 5.000.000	\$ 3.600.000	\$ 9.993.786
Total año	\$ 60.000.000	\$43.200.000	\$ 119.925.432
Total, mano de obra indirecta	\$ 223.125.432		

*Nota.* Calculo del costo de la mano de obra indirecta.**Servicios**

Las tarifas se tomaron de la empresa de energía Celsia y la empresa de acueducto y alcantarillado y aseo del espinal E.S.P.

**Tabla 30***Costos servicios públicos*

<b>Servicio</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor</b>	<b>Total</b>
Agua (Acueducto)	14.720 m3	2.141	31.515.520
Energía	580.55 kWh	718.54/Kwh	417.148,397
<b>Total</b>	31.932.668		

*Nota.* Valor de los costos públicos en su totalidad por mes

La totalidad de los costos para la planta son:

**Tabla 31***Cálculo de la totalidad del costo*

<b>CONCEPTO</b>	<b>VALOR</b>
Costo de equipos	\$ 1.943.651.305
Obras y terrenos	\$ 26.113.400
Intangibles	\$ 55.000.000
Costos materia prima	\$ 11.931.350
Mano de obra	\$ 130.827.744
Mano de obra indirecta (año total)	\$ 223.125.432
Servicios públicos	\$ 383.192.016
<b>Total</b>	\$ 2.773.841.247

*Nota.* Cálculo de la totalidad del costo de la implementación de la planta

## 6. CONCLUSIONES

En primera medida se concluyó que a pesar de los avances realizados para la obtención de hidrógeno el método que menos desarrollado puede estar es por la biomasa, debido a una falta de caracterización físicas, químicas y fisicoquímicas de biomasa aprovechables no se tienen muy claros los alcances que puede tener esta industria en Colombia.

Las perspectivas del futuro del hidrogeno son bastante alentadoras tanto en Europa como en Colombia, por lo tanto, la industria de producción de hidrogeno a través de biomasa puede tener un futuro promisorio siempre y cuando la producción de este tenga costos más bajos y una mejor rentabilidad.

Se logró diseñar conceptualmente una planta para la producción de hidrogeno en la cual se utilizó el método por fermentación oscura que actualmente es el método que más rentabilidad puede generar; sin embargo; los costos son bastante altos debido a que la degradación por parte de los hongos es lenta en comparación con sustancias ácidas, a través de dicho diseño se concluye que el factor más clave para este proceso es el tiempo hidráulico de residencia debido a que este puede influir tanto en la disminución de la producción del hidrogeno causando otros productos que son de nuestro interés.

Según lo investigado de diferentes fuentes se logra concluir que las membranas que mejor se comportan en el proceso de separación son las membranas de carbón y su rentabilidad también es más alta, además de ellos se toma en cuenta las aleaciones que se puede hacer con ellas lo cual puede mejorar el rendimiento de la membrana. Las membranas en general son el método más fiable, rentable y promisorio para la obtención del hidrogeno debido a la optimización que se puede llegar a hacer del proceso.

Por último, se concluye que los hongos son la mejor opción para esta industria debido a que tienen una buena degradación y con investigaciones en la modificación genética de los mismos puede obtenerse mayores rendimientos en la degradación además de ello tienen una buena selectividad lo cual permite que no se pierda tantos azúcares fermentables que nos sirven para la producción del hidrogeno, lo cual otros métodos y sustancias no tienen y pueden afectar el rendimiento de la planta, además de ello el utilizar químicos corrosivos hace que se tenga un costo aún más elevado por el manejo que estos mismos deben tener a nivel ambiental.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Química. Es. Heterólisis. Retrieved from <https://www.quimica.es/enciclopedia/Heter%C3%B3lisis.html>
- [2] Brown, T. R., (Feb 2015). "A techno-economic review of thermochemical cellulosic biofuel pathways." *Bioresource Technology*. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.053>. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.09.053.
- [3] Vanina, L. et al., 2016. "Propiedades Fisicoquímicas De Metaloproteínas, Sistema Modelo Y Ligandos De Iones Metálicos Relevantes En Biología";
- [4] Definición De Plantas Vasculares Available: <https://definicion.de/plantas-vasculares/#:~:text=Las%20plantas%20vasculares%2C%20de%20este,el%20xilema%20y%2>
- [5] G. B. Agrotico, "CLASIFICACION DE LOS QUELATOS: CONSIDERACIONES PRACTICAS," 1999.
- [6] Rodríguez Gámez, O. et al, 2019). "Simulación de propuestas tecnológicas para la producción de ramnolípidos ORA9 a escala piloto." *Tecnología Química*. Available: <https://www.redalyc.org/journal/4455/445560283011/html/#:~:text=RESUMEN%3A%20Los%20ramnolipidos%20son%20biosurfactantes,de%20pH%2C%20temperatura%20y%20s alinidad>
- [7] MELONI, S., 2002. "Universidad Politécnica De Madrid Escuela Técnica Superior De Ingenieros Agrónomos Departamento De Biotecnología Caracterización Del Sistema Tat (Twin Arginine Translocation) De Transporte De Proteínas En *Rhizobium Leguminosarum Bv Viciae Upm791*." Universidad Politécnica De Madrid.
- [8] Barroso, I., 2020. "Termogravimetría. Fundamentos y Aplicaciones," Netzsch,
- [9] Ghazvini, M. et al, (Nov 2019). "Geothermal energy use in hydrogen production: A review." *International Journal of Energy Research*. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.4778>. DOI: 10.1002/er.4778.

- [10] Hosseini, S. E. et al, (Oct 10, 2015). "A review on biomass-based hydrogen production for renewable energy supply." *International Journal of Energy Research*. Available: <https://api.istex.fr/ark:/67375/WNG-7FT2X9C2-T/fulltext.pdf>. DOI: 10.1002/er.3381.
- [11] Hernán Darío Castaño Castrillón, Carlos Mario Gutiérrez Aguilar and Beatriz Elena Angel Álvarez, (Jul 01, 2021). "Circular Economy Strategies: Use of Corn Waste to Develop Biomaterials." *Sustainability (Basel, Switzerland)*. Available: <https://doaj.org/article/4ac1dca662aa4955a94cd1434b0c1040>. DOI: 10.3390/su13158356.
- [12] Chandankere, R. et al, (Dec 30, 2020). "Conversion of Agroindustrial Wastes to Rhamnolipid by *Enterobacter* sp. UJS-RC and Its Role against Biofilm-Forming Foodborne Pathogens." *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. Available: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.0c05028>. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c05028.
- [13] Hassan, S. S., G. A. Williams and A. K. Jaiswal, (Mar 2019). "Lignocellulosic Biorefineries in Europe: Current State and Prospects." *Trends in Biotechnology (Regular Ed.)*. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.07.002>. DOI: 10.1016/j.tibtech.2018.07.002.
- [14] Gonzalez Herrera Oscar Ivan, Tautiva Mancera And Quiriga Camargo Juan Fernando, "Invierta y Gane con Energía Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014," Ministerio De Minas Y Energia, 2014. [10] Anonymous "LEY 2099 DEL 10 DE JULIO DE 2021,".
- [15] Congreso De La Republica, "LEY 2099 DEL 10 DE JULIO DE 2021," 10 Julio, 2022.
- [16] M. de Energía, "Hoja De Ruta Del Hidrogeno en Colombia", [https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf). [En línea]. Disponible en: [https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf).
- [17] J. Fernández, R. Á Hermana and J. M. Sánchez, "Perspectivas De Desarrollo De Un Mercado Global De Hidrógeno," Instituto Vasco De Competitividad - Fundación Deusto, pp. 1-91, 2021.

- [18] Jiménez Sáez, F. L., .2020."Evaluación-Técnica-Y-Económica-Del-Uso-De-Hidrógeno-Verde-En-Aplicaciones-Para-La-Industria." Universidad De Chile Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas Departamento De Ingeniería Eléctrica.
- [19] Yadav,M., K. Paritosh and V. Vivekanand, (Jul 17,2020)."Lignocellulose to bio-hydrogen: An overview on recent developments." International Journal of Hydrogen Energy. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.027>. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.10.027.
- [20] Posso,F., J. Siguencia and R. Narváez, (May 11,2020)."Residual biomass-based hydrogen production: Potential and possible uses in Ecuador." International Journal of Hydrogen Energy.Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.235>. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.235.
- [21] J. H. Clark and F. E. I. Deswarte, "The biorefinery Concept–An integrated approach," in Introduction to Chemicals from Biomass Anonymous 2008, Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470697474.ch1>. DOI: 10.1002/9780470697474.ch1.
- [22] HYDROGEN COUNCIL, "Path to hydrogen competitiveness A cost perspective," Hydrogen Council, -01-20, 2020.
- [23] FUEL CELLS AND HYDROGEN JOINT UNDERTAKING, "A SUSTAINABLE PATHWAY FOR THE EUROPEAN ENERGY TRANSITION HYDROGEN ROADMAP EUROPE," Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, 2019.
- [24] Egeland-Eriksen,T., A. Hajizadeh and S. Sartori, (Sep 13,2021)."Hydrogen-based systems for integration of renewable energy in power systems: Achievements and perspectives." International Journal of Hydrogen Energy.Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.218>. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.218.
- [25] G. M. Gómez Hoyos and E. J. Ocampo, "2018: Algunos componentes generales, particulares y singulares del maíz en Colombia y México." 2018.
- [26] Centro Internacional De Agricultura Tropical And Centro Internacional De Mejoramiento De Maiz Y Trigo, Cultivaciones De Maiz. 2019.

- [27] C. David et al, "Producción y procesamiento del maíz en Colombia \* Corn Processing and Production in Colombia," Revista Científica Guillermo De Ockham, vol. 11, (1),
- [28] Velez,G. A., 2004)."No al maíz transgénico." Semillas En La Economía Campesina.
- [29] Anonymous "2018 Fondo Nacional Cerealista Informe de Gestión," Federacion Nacional De Cultivadores De Cereales Y Leguminosas, pp. 1-160, 2018.
- [30] CENTRALES DE BIOMASA Y SUS TIPOS (""). Available: <https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-de-biomasa>.
- [31] Tipos de Biomasa más comunes. Available: <https://combustiblesaragon.es/tipos-de-biomasa/>.
- [31] Williams, C. L. et al, (Nov 23,2015)."Sources of biomass feedstock variability and the potential impact on biofuels production." Bioenergy Research.Available: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1251425>.
- [32] Cai,J. et al, (Sep2017)."Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass." Renewable & Sustainable Energy Reviews.Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.072>. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.072.
- [33] A. E. Ray et al, "Multiscale Characterization of Lignocellulosic Biomass Variability and Its Implications to Preprocessing and Conversion: a Case Study for Corn Stover," ACS Sustainable Chem. Eng., vol. 8, (8), pp. 3218, 2020. DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b06763.
- [34] S. D. Fonseca, H. A. Rodríguez and G. Camargo, "CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS DE MAÍZ DEL MUNICIPIO DE VENTAQUEMADA COLOMBIA CHARACTERIZATION OF WASTE CORN OF THE MUNICIPALITY OF VENTAQUEMADA COLOMBIA," 2017.
- [35] Woźniak,M. et al, (Mar 20,2021)."Chemical and Structural Characterization of Maize Stover Fractions in Aspect of Its Possible Applications."Materials.Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33804750>. DOI: 10.3390/ma14061527.

- [36] Medic,D. et al, (Apr 23,2012)."The Effects of Particle Size, Different Corn Stover Components, and Gas Residence Time on Torrefaction of Corn Stover." *Energies* (Basel).Available: <https://search.proquest.com/docview/1537290882>. DOI: 10.3390/en5041199.Li,Z. et al, (May2012)."Cell morphology and chemical characteristics of corn stover fractions." *Industrial Crops and Products*.Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.11.025>. DOI: 10.1016/j.indcrop.2011.11.025.
- [37] Ayhan Demirbas, 2004)."Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues.".
- [38] Demiral,I., A. Eryazıcı and S. S, enso"z, (Oct 6,2011)."Bio-oil production from pyrolysis of corncob (*Zea mays* L.)." .
- [39] Trninic,M. et al, (Mar 16,2012)."Kinetics of Corncob Pyrolysis ." .
- [40] Kumar,S. et al, (Jul2018)."De-construction of major Indian cereal crop residues through chemical pretreatment for improved biogas production: An overview." *Renewable & Sustainable Energy Reviews*.Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.049>. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.049.
- [41] de LucasHerguedas Ana Isabelet al, "Biomasa, Biocombustibles Y Sostenibilidad," 2012.
- [42] Mani,S., L. G. Tabil and S. Sokhansanj, 2004)."Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass." *Biomass & Bioenergy*.Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.03.007>. DOI: 10.1016/j.biombioe.2004.03.007.
- [43] Zhang,K., N. Ren and A. Wang, (Mar 16,2015)."Fermentative hydrogen production from corn stover hydrolyzate by two typical seed sludges: Effect of temperature." *International Journal of Hydrogen Energy*.Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.120>. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.120.
- [44] J. Shojaeiarani, D. S. Bajwa and S. G. Bajwa, "Peer-Reviewed Review Article Properties of Densified Solid Biofuels in Relation to Chemical Composition, Moisture Content, and Bulk Density of the Biomass,".

- [45] Simbaqueva Aguilera, A. M. and M. A. Urrego León, .2019."Evaluación De La Producción De Metano En La Digestión Anaerobia De La Especie Invasora Retamo Espinoso Y El Residuo Agrícola Rastrojo De Maíz Mediante El Uso De Un Biorreactor Batch." Universidad El Bosque. Carroll, A. and C. Somerville, 2009)."Cellulosic Biofuels." Annual Review of Plant Biology. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19014348>. DOI: 10.1146/annurev.arplant.043008.092125.
- [46] H. Chen, "Chemical composition and structure of natural lignocellulose," in *Biotechnology of Lignocellulose* Anonymous Springer, Beijing: 2014, pp. 25-71.
- [47] Palacios Bau, M. G., .2016."Caracterización Química De La Biomasa Procedente De Las Hojas, Pseudotallo, Raquis Y Pseudopetiole De La Planta De Banano Y Su Relación Con El Poder Calorífico." Universidad De Cuenca.
- [48] Chávez-Sifontes, M. and M. E. Domine, 2013). "β-galactosidases and cell wall dynamics."
- [49] M. H. Chávez Sifontes, "Lignina, Estructura Y Aplicaciones: Métodos De Despolimerización Para La Obtención De Derivados Aromáticos De Interés Industrial," 2017. Available: [https://explore.openaire.eu/search/publication?articleId&#61;dedup\\_wf\\_001::03686eb6af850d1462d26bc243192942](https://explore.openaire.eu/search/publication?articleId&#61;dedup_wf_001::03686eb6af850d1462d26bc243192942). DOI: 10.4995/Thesis/10251/90528.
- [50] Martín, C. et al, .1994."Biomasa Lignocelulosa. Polímeros Constitutivos. Procesos Biológicos De Degradación De La Lignina." Instituto De Energías Renovables.
- [51] M. F. Adegboye et al, "Bioprospecting of microbial strains for biofuel production: metabolic engineering, applications, and challenges," *Biotechnol Biofuels*, vol. 14, (1), 2021. . DOI: 10.1186/s13068-020-01853-2.
- [52] de Gonzalo, G. et al, (Oct 20, 2016). "Bacterial enzymes involved in lignin degradation." *Journal of Biotechnology*. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.08.011>. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2016.08.011.
- [53] T. A. Lu-Chau et al, "Application of Fungal Pretreatment in the Production of Ethanol From Crop Residues," *Bioethanol Production from Food Crops*, pp. 267, 2019. DOI: 10.1016/b978-0-12-813766-6.00014-x.

- [54] Carlos Juan, D. Q., (2011). "Degradación de Plaguicidas Mediante Hongos de la Pudrición Blanca de la Madera." Available: <http://www.bibliothek.uni-regensburg.de/ezeit/?2703114>.
- [55] Hofrichter, M. and M. Hofrichter, (-042002). "Review: lignin conversion by manganese peroxidase (MnP)." *Enzyme and Microbial Technology*. DOI: 10.1016/s0141-0229(01)00528-2.
- [56] Brijwani, K., A. Rigdon and P. V. Vadlani, (Dec 01, 2010). "Fungal Laccases: Production, Function, and Applications in Food Processing." *Enzyme Research*. Available: <https://www.airitilibrary.com/Publication/alDetailedMesh?DocID#61;P20151207001-201012-201706260023-201706260023-20-29>. DOI: 10.4061/2010/149748.
- [57] ten Have, R. and P. J. M. Teunissen, (Nov 14, 2001). "Oxidative Mechanisms Involved in Lignin Degradation by White-Rot Fungi." *Chemical Reviews*. Available: <http://dx.doi.org/10.1021/cr000115l>. DOI: 10.1021/cr000115l.
- [58] Łukajtis, R. et al, (Aug 2018). "Hydrogen production from biomass using dark fermentation." *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.043>. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.043.
- [59] Ministerio de Agricultura, "Plan Departamental De Extensión Agropecuario," 2019.
- [60] Alcaldía Municipal Espinal-Tolima "2155\_plan-desarrollo-espinal-20162019," 2016.
- [61] D, Schneuer. Estudio Exploratorio para la Producción de Bioetanol y Co-Productos de Biorefinería, a Partir de Rastrojos de Maíz. Tesis Pregrado. Repositorio académico de la Universidad de Chile. 2010. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103733>
- [62] Sircar, S. and T. C. Golden, (Jan 05, 2000). "Purification of Hydrogen by Pressure Swing Adsorption." *Separation Science and Technology*. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/SS-100100183>. DOI: 10.1081/SS-100100183.
- [63] Ockwig, N. W. and T. M. Nenoff, (Oct 10, 2007). "Membranes for Hydrogen Separation." *Chemical Reviews*. Available: <http://dx.doi.org/10.1021/cr0501792>. DOI: 10.1021/cr0501792.

- [64] K. J. Bryden and J. Y. Ying, "Nanostructured palladium–iron membranes for hydrogen separation and membrane hydrogenation reactions," *Journal of Membrane Science*, vol. 203, (1- 2), pp. 29, 2002. DOI: 10.1016/s0376-7388(01)00736-0.
- [65] David S. Sholl and Y.H. Ma, "Dense Metal Membranes for the Production of High-Purity Hydrogen."
- [66] S. Kurungot and T. Yamaguchi, "Rh/-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalytic layer integrated with sol–gel synthesized microporous silica membrane for compact membrane reactor applications," in *Membranes for Membrane Reactors* Anonymous John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK: 2011, pp. 227-242.
- [67] Nomura, M. et al, (2005). "Preparation of a stable silica membrane by a counter diffusion chemical vapor deposition method." *Journal of Membrane Science*. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2004.11.008>. DOI: 10.1016/j.memsci.2004.11.008.
- [68] Luis M. Carballo Suárez and Hugo M. Galindo V, (Jul 01, 2001). "Estudio de los procesos Sol-gel para la obtención de un aglutinante apropiado para el peletizado de alúmina. 1. Ensayos de una técnica de peletizado." *Ingeniería E Investigación*. Available: <https://doaj.org/article/43f42e5ba05646e48303005d170253b3>.
- [69] Martin Gomez Jose María, .2001. "Síntesis, Caracterización Y Aplicaciones Catalíticas De Zeolitas Básicas " *Universidad Complutense De Madrid Facultad De Ciencias Químicas Universidad Complutense De Madrid Facultad De Ciencias Químicas*.
- [70] Michalkiewicz, B. and Z. C. Koren, (Mar 11, 2015). "Zeolite membranes for hydrogen production from natural gas: state of the art." *J Porous Mater*. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10934-015-9936-6>. DOI: 10.1007/s10934-015-9936-6.
- [71] He, X., (Oct 02, 2017). "Techno-economic feasibility analysis on carbon membranes for hydrogen purification." *Separation and Purification Technology*. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2017.05.034>. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.05.034.

- [72] O. Benaïmeche et al, The Utilization of Vegetable Fibers in Cementitious Materials. 2015. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11596-6>. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11596-6.
- [73] Luo, Y., J. Lee and H. Zhao, (Nov 15, 2013). "Challenges and opportunities in synthetic biology for chemical engineers." *Chemical Engineering Science*. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2012.06.013>. DOI: 10.1016/j.ces.2012.06.013.
- [74] R. A. A. Meena et al, *Food Waste to Valuable Resources*. Elsevier, 2020.

## GLOSARIO

**Ruptura Heterolítica:** es la apertura de un enlace químico de una molécula neutral, generando un catión y un anión. [1]

**Hidrotratamiento:** es la reacción de compuestos orgánicos en presencia de hidrogeno a alta presión para eliminar el oxígeno (desoxigenación) junto con otros heteroátomos como el nitrógeno azufre y el cloro. [2]

**Metaloenzimas:** son proteínas que contienen un centro metálico en su estructura, por lo tanto, una enzima que contiene un ion metálico. [3]

**Plantas Vasculares:** son las disponen de hojas, tallo y raíces y que tienen un sistema vascular formado por vasos conductores. [4]

**Quelatos:** es un compuesto donde un nutriente metálico es ligado a un agente quelante orgánico, que tiene la propiedad de estar disponible para la planta bajo condiciones adversas, en las cuales los nutrientes metálicos normalmente formarían compuestos insolubles. [5]

**Ramnolipidos:** son biosulfurante glicolipidicos por bacterias del género Pseudomona. [6]

**Sistemas De Secreción TAT:** es un sistema que secreta proteínas con una secuencia relacionada que incluye una  $\alpha$ -hélice transmembrana N-terminal seguida por una  $\alpha$ -hélice hacia el lado citoplasmático de la membrana. [7]

**Termogravimetría:** análisis de la variación del peso de una sustancia que se calienta o enfría a velocidad controlada, utilizado para determinar su composición. [8]

## **ANEXOS**

## RECOMENDACIONES

El estudio a profundidad y con experimentación de hongos de pudrición blanca y café para validar su corrosividad y su selectividad en biomasas con azúcares fermentables, y conocer sus rendimientos más altos al experimentar con las temperaturas, pH, tiempo hidráulico de residencia. •

El estudio por las diferentes biomasas que se pueden encontrar en Colombia teniendo como parámetro claro la gran diversidad que hay en Colombia, haciendo experimentación para las caracterizaciones de esta.

El estudio de la fermentación de azúcares a partir de bacterias también es promisorio para la producción hidrogeno, debido a que estas también cumplen un papel importante, a su vez se debe evaluar la posibilidad de implementar una planta de producción de hidrogeno con un sistema de producción continuo sin que ello llegue a afectar el rendimiento de este.

Evaluar diferentes materiales y/o aleaciones para la experimentación de membranas las cuales ayudan a separar el hidrogeno y con ello saber sus rendimientos de recuperación y producción de hidrógeno.