BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ciencias de la Electrónica

“Diseño de un sistema de fotopirólisis para la producción de hidrógeno a partir de cáscara de *Musa x paradisiaca*”

TESIS

Presentada como requisito para obtener el título de:

Licenciada en Ingeniería en Energías Renovables

PRESENTA

Nadia Citlali Hernández García

Asesora:

Dra. Beatriz Eugenia Graniel García

Facultad de Ciencias de la Electrónica

Puebla, Pue. Enero 2025

Dedicatoria

A mis padres, Mirna Elizabeth y Joaquín, las personas que más admiro y amo. A ustedes les debo no solo mi formación, sino también los valores y la calidad de persona que soy hoy. Gracias por su apoyo incondicional y su amor constante, por estar siempre a mi lado, brindándome fuerza y confianza en cada paso de este camino.

A mi hermano, Joaquín Manuel, por ser mi compañero de aprendizaje y travesuras, por creer en mí siempre y nunca dudar, incluso en los momentos en los que yo misma lo hacía. Gracias por ser mi contraparte, por impulsarme a crecer cada día y por enseñarme tanto con tu forma de ser. El más grande honor para mí es ser tu hermana mayor. Te amo.

A mis abuelos, Salvador, Esther, Hilario y Mirna, por cuidarme y quererme incondicionalmente, por sus palabras de aliento y también por sus llamados de atención, que siempre buscaban guiarme por el mejor camino. Gracias por ser un ejemplo de superación, valentía y fuerza. Espero puedan disculparme por las ausencias durante este proceso. Nunca olvidaré de dónde vengo ni los valores que ustedes me han inculcado. Los llevo siempre en mi corazón.

A Mauro, por apoyarme incondicionalmente, por ser una persona tan noble, por quererme tal como soy, por ser mi fortaleza en momentos difíciles y mi alegría en los días más felices. Gracias por creer en mí, por motivarme a seguir adelante y nunca rendirme.

A mis amigos, Vanessa, María José, Arantza, Víctor, Alberto, Marco, Marcos y Víctor Manuel, por acompañarme a lo largo de este camino, por compartir conmigo sus perspectivas únicas sobre el sentido de la vida. Por cada momento de risa, cada consejo sincero y cada ocasión en la que estuvieron ahí para escucharme, les estaré siempre agradecida.

A mis primos, por ser mis compañeros de vida, de juegos y de aprendizajes, por llenar mi infancia de recuerdos hermosos.

A mis tíos por sus enseñanzas y palabras de aliento, en especial a mi tía Mine, por cuidarme, por ser cómplice y amiga.

A Rose, Zeus, Oliver, mis mascotas, por estar a mi lado en las noches más largas y en los momentos de desvelo, cuando su compañía silenciosa y su cariño incondicional me llenaron de consuelo. Gracias por recordarme, con su amor puro y lealtad infinita, que incluso en los días más difíciles nunca estuve sola.

Agradecimientos

A la Dra. Beatriz Eugenia Graniel García, por su destacada labor como profesora, por su vocación y entusiasmo al compartir su conocimiento, y por creer en este proyecto desde el inicio. Su guía, dedicación y el valioso tiempo que ha brindado han sido fundamentales para llevarlo a cabo con éxito.

A la Dra. Mou Pal, Por su interés en este proyecto, por sus valiosas sugerencias y observaciones, así como por su apoyo constante. Agradezco profundamente su accesibilidad y la disposición de su laboratorio en el Instituto de Física "Ing. Luis Rivera Terrazas", que contribuyeron de manera significativa al desarrollo de este trabajo.

A la Dra. Laura Elvira Serrano de La Rosa, por su invaluable apoyo al compartir sus conocimientos y experiencia en el análisis de resultados. Su colaboración en el Laboratorio Central del Instituto de Física "Ing. Luis Rivera Terrazas" fue fundamental para el desarrollo y la calidad de este trabajo.

A la M.I.Q. Celia Ramírez Ramos, por su valiosa disposición y accesibilidad para facilitar el uso de las instalaciones del laboratorio de química y biocombustibles, permitiéndome llevar a cabo este trabajo de investigación de manera eficiente

A la Dra. Nallely Téllez Méndez, Dra. Laura Alicia Paniagua Solar y Dra. María Teresa Flores Sotelo, por formar parte del jurado evaluador de este proyecto, por sus valiosas correcciones, aportaciones y por el tiempo dedicado a la revisión de este documento. Su experiencia y observaciones han sido esenciales para enriquecer y fortalecer este trabajo.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN 7
II. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 9
III. JUSTIFICACIÓN 10
IV. OBJETIVO 12
4.1 Objetivo general 12
4.2 Objetivos específicos 12
V. HIPÓTESIS 12
VI. MARCO TEÓRICO 13
6.1 Hidrógeno 13
6.1.1 Definición y concepto 13
6.1.2 Propiedades del hidrógeno 14
6.1.3 Propiedades características del hidrógeno gaseoso 18
6.1.4 Producción de hidrógeno 19
6.2 Biomasa 22
6.2.1 Definición 22
6.2.2 Clasificación de la biomasa 23
6.2.3 Fuentes de biomasa para fines energéticos 27
6.3 Biocombustibles gaseosos 30
6.3.1 Gas de síntesis 31
6.4 Procesos de conversión de la biomasa en energía 31
6.4.1 Gasificación 32
6.4.2 Combustión 34
6.4.3 Pirólisis 35
6.5 Musa x Paradisiaca (Plátano Tabasco) 39
6.5.1 Características de la platanera 40
6.5.2 Propiedades funcionales de la cáscara del plátano 42
6.5.3 Producción de plátano a nivel mundial 42
6.5.4 Producción de plátano a nivel nacional 47
6.5.5 Producción a nivel estatal Oaxaca 55

6.6 Cáscara de Musa x Paradisiaca o plátano Tabasco 58
6.7 Microscopia Raman 63
VII. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL 70
7.1 Adecuación de la cáscara de Musa x paradisiaca 70
7.2 Diseño del sistema 71
7.2.1 Reactor 71
7.2.2 Lámpara 74
7.2.3 Cámara de madera 77
7.3 Diseño experimental del proceso de fotopirólisis 78
7.3.1 Fotopirólisis 78
7.4 Caracterización 78
7.4.1 Módulo C. MICRORAMAN 78
VIII. RESULTADOS 83
8.1 Caracterización de la lámpara 83
8.2 Cámara de madera 84
8.3 Muestra I 87
8.4 Muestra II 92
8.5 Muestra III 99
IX. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO 112
9.1 Conclusiones 112
9.2 Trabajo a futuro 117
X. BIBLIOGRAFÍA 119
XI. APÉNDICES 129

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, estamos viviendo una crisis mundial a causa de la contaminación y el cambio climático, viendo como todas sus repercusiones afectan a la humanidad y al resto de los seres vivos, sin que se realice un cambio verdaderamente consiente y efectivo por parte de la sociedad, las autoridades y las grandes empresas encargadas del sector energético; puesto que éstas son las que más impactan negativamente con todos los procesos que realizan, ya que se consideran como uno de los mayores contribuyentes al desgaste de los recursos naturales; puesto que durante el proceso de producción de energía a base de combustibles fósiles se utilizan una gran cantidad de recursos naturales para obtenerlos, generando una huella de carbono desde su extracción hasta su uso como combustible en la vida cotidiana.

Aunque si bien, se han buscado distintas formas de generar energía a partir de recursos naturales renovables, como lo es el agua en las grandes presas usando su caudal para generar energía moviendo una turbina, el viento usado para impulsar generadores eólicos en los parques eólicos, entre otras, muchas veces la implementación de estas energías es muy costosa o requiere especificaciones geográficas muy particulares afectando al ecosistema, lo que hace más difícil dar el paso hacia el cambio energético.

Una de las opciones o alternativas para generar energía son las tecnologías a base de hidrógeno; éstas han significado a lo largo de la historia una fuente de energía renovable que cumple con los requerimientos para ser utilizada desde una misión al espacio, asi como impulsar la movilidad tanto terrestre, marítima y aérea [1]. Las tecnologías del hidrógeno están en constante investigación y desarrollo para que sean económicamente viables para así afrontar la crisis energética y de contaminación. Dentro de los grandes retos que se presentan en la transición hacia la implementación de energías limpias es el almacenamiento y el transporte, por lo tanto, el hidrógeno tiene un gran potencial para hacer frente a estos retos.

En este trabajo de investigación se pretende producir hidrógeno a partir de cáscara de plátano (*Musa x paradisiaca)* mediante fotopirólisis (pirólisis flash) utilizando una lámpara de Xenón.

II. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El plátano es uno de los productos con mayor producción en el estado de Oaxaca. En el 2017 se produjeron 66 mil 376.41 toneladas, colocándose dentro de los 10 estados con mayor producción [2]. La cáscara de plátano representa alrededor del 30% del fruto, ésta se descarta y pudiera ser utilizada en distintos ámbitos como para el desarrollo de alimentos debido a su composición química y antioxidante [3].

Sin embargo, en México no se ha profundizado tanto en la investigación sobre la utilización de la cáscara de plátano como una opción para su uso como biomasa residual en la producción de hidrógeno. En México y en el mundo se busca realizar una transición energética buscando aminorar los estragos del consumo desmedido de combustibles fósiles y el cambio climático, esto impulsa la investigación hacia nuevos sectores y distintos métodos de producción por lo que en este trabajo de investigación se pretende producir hidrógeno utilizando las cáscaras del plátano (*Musa x paradisiaca*) mediante el proceso de fotopirólisis.

III. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, se está atravesando una época que marcará un cambio totalitario en nuestra vida diaria como la conocemos hoy en día, todo esto a consecuencia de la contaminación y efectos que trae el consumo desmedido de los combustibles fósiles como base de la producción energética a nivel mundial; entre ellos el aumento en la temperatura global de la cual se obtienen los siguientes datos de acuerdo al Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (2019) “Se estima que las actividades humanas han causado un calentamiento global de aproximadamente 1.0 °C con respecto a los niveles preindustriales, con un rango probable de 0.8 °C a 1.2 °C, es probable que el calentamiento global llegue a 1.5 °C entre 2030 y 2052 si continúa aumentando al ritmo actual” [4]; esto significa un desafío descomunal para la humanidad puesto que elevándose tan solo 0.5°C los efectos serían devastadores y aumentarían los riesgos en ámbitos como la salud, seguridad alimentaria, abastecimiento de agua, economía, entre otros; ante este desalentador escenario se han empleado esfuerzos por parte de todas las disciplinas y países para detener y de ser posible revertir estos efectos. [4]

Para contrarrestar esta amenaza, se han optado por distintas medidas energéticas para poder cumplir con las demandas; tratando de minimizar el daño al medio ambiente, se han estado utilizando cada vez más las energías renovables, éstas abarcan aquellos recursos que se renuevan de manera continua gracias a los procesos naturales de la tierra, entre ellas destacan las tecnologías a base de hidrógeno.

El hidrógeno, es el elemento más abundante en la naturaleza siendo el 96% de la materia que constituye el universo [5], éste puede ser utilizado de distintas maneras: para almacenar energía, generar energía quemándolo directamente o en las celdas de combustible; sin embargo, uno de los obstáculos de la tecnología del hidrógeno, es que en la naturaleza el hidrógeno se encuentra asociado a otros elementos, por lo tanto para separarlo se necesita realizar un proceso y consumir energía, estos procesos son costosos o su huella de carbono es elevada por lo cual

es imperativo indagar en nuevas y distintas formas de obtenerlo sin seguir contribuyendo a la contaminación [6].

En este cambio a favor del medio ambiente y en busca de revertir el daño causado es de suma importancia y urgente introducirse en estas nuevas tecnologías si no, estaremos como siempre en la historia de nuestro país, comprando tecnología a otros países y generando los recursos para que ellos terminen el proceso y lo vendan más caro al importarlo. Por lo cual, en el presente trabajo de investigación se pretende producir hidrógeno a partir de biomasa residual, en específico se utilizará la cascará de plátano *(Musa x paradisiaca)* utilizando el proceso fototérmico de pirólisis flash.

IV. OBJETIVO

4.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de fotopirólisis para producir hidrógeno a partir de la cáscara de *Musa x paradisiaca* mediante el proceso fototérmico (pirólisis flash) empleando una lámpara de xenón.

4.2 Objetivos específicos

1. Secar la cáscara de *Musa* × *paradisiaca* que se utilizará en este trabajo de investigación.

2. Diseñar y construir el sistema de fotopirólisis (pirólisis flash).

3. Producir hidrógeno mediante el proceso fototérmico (pirólisis flash) utilizando el sistema construido.

4. Verificar la presencia de hidrógeno en los gases producidos mediante el proceso de descomposición fototérmica (pirólisis flash).

V. HIPÓTESIS

El sistema diseñado de fotopirólisis producirá hidrógeno utilizando la cáscara de *Musa x paradisiaca*.

VI. MARCO TEÓRICO

6.1 Hidrógeno

6.1.1 Definición y concepto

El hidrógeno es uno de los compuestos más abundantes del universo. Las estrellas lo contienen en proporciones muy elevadas y en el sol es el combustible de las reacciones de fusión nuclear que genera una enorme cantidad de energía que emite como radiación; sin embargo, este elemento no constituye una fuente de energía en nuestro planeta [7]. El hidrógeno es el elemento más simple y se encuentra en mayor cantidad en el universo, fue descubierto en 1766 por Henry Cavendish, describió por primera vez al hidrógeno como un elemento químico; además demostró que este gas, en combinación con oxígeno, forma agua [8]. En 1783 Antoine Lavoisier lo bautizó como hidrógeno del griego "hydros", agua, y "genos", generador por lo cual significa "generador de agua" [8].

La United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) define al hidrógeno como un gas incoloro, inodoro, insípido y no venenoso bajo condiciones normales. Es el elemento más simple conocido por el hombre. Un átomo de hidrógeno tiene únicamente un protón y un electrón, existe como una molécula diatómica, es decir formada por 2 átomos de hidrógeno, de ahí que el hidrógeno normalmente se exprese como H_2. Es el elemento más abundante en el universo, con un 90% del universo en peso, y el décimo más abundante en la corteza terrestre con un 0.14% [9]. Sin embargo, en la Tierra, no se encuentra en su forma pura, ya que se encuentra unido con otros elementos para formar compuestos más estables, como agua (H_2O), metano (CH_4), hidruros, hidróxidos, alcoholes e hidrocarburos [10].

Por consiguiente, el hidrógeno, una vez producido a partir de moléculas que lo contienen por ejemplo agua, hidrocarburos, biomasa, etc., se puede utilizar para

almacenar, transportar o generar energía, por lo que no se trata de un recurso energético, sino de un vector energético como la electricidad [7]. El gran interés en este vector energético se debe a que, a diferencia de otros tipos de combustible, la combustión de hidrógeno destaca por ser inocua para el medio ambiente, pues solo se genera agua y algunos óxidos nitrosos (NO_x). Además, presenta el más alto contenido de energía por unidad de masa que cualquier combustible, por ejemplo, un kilogramo de hidrógeno podría liberar casi el triple de energía que un kilogramo de gasolina o gas natural. [11]

6.1.2 Propiedades del hidrógeno

Es necesario destacar las propiedades que tiene este elemento para favorecer el entendimiento del presente trabajo, las principales propiedades del hidrógeno son:

a) Propiedades físicas del hidrógeno

El hidrógeno es una molécula diatómica (H_2); es un gas incoloro, sin olor, sin sabor, no metálico y altamente susceptible a la inflamación, con una masa atómica de aproximadamente 1.00794 g/mol. El hidrógeno tiene una densidad de 0.09 kg/m^3 lo cual lo hace alrededor de 14 veces más liviano que el aire y se dispersa más rápidamente que cualquier otro gas. Al enfriarlo, se convierte en líquido a una temperatura de -253°C y en sólido a -259°C [12]. El hidrógeno presenta de manera natural 3 isótopos (protio, deuterio y tritio), el protio contiene solo un protón en su núcleo, el deuterio contiene un protón y un neutrón y el tritio contiene un protón y dos neutrones siendo el más abundante el protio o hidrógeno común. En el laboratorio se han llegado a sintetizar hasta 5 isótopos más [8]. Las características físicas del hidrógeno se encuentran resumidas en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas del Hidrógeno Fuente: Adaptada de Hydrogen Fuel Production, Transport, and Storage (2009) [13]

PROPIEDAD	VALOR
Peso molecular	1.00794 g/mol
Densidad del gas a 0ºC y 1 atm.	0.08987 kg/m^3
Densidad del sólido a -259ºC	858 kg/m^3
Densidad del líquido a -253ºC	708 kg/m^3
Temperatura de fusión	-259ºC
Temperatura de ebullición a 1 atm.	-253ºC
Temperatura crítica	-240ºC
Presión crítica	12.8 atm
Densidad crítica	31.2 kg/m^3
Calor de fusión a -259ºC	58 kJ/kg
Calor de vaporización a -253ºC	447 kJ/kg
Conductividad térmica a 25ºC	0.019 kJ/msºC
Viscosidad a 25ºC	0.00892 centipoise
Calor específico (C_p) del gas a 25ºC	14.3 kJ/(kgºC)
Calor específico (C_p) del líquido a -256ºC	8.1 kJ/(kgºC)
Calor específico (C_p) del líquido a -256ºC	2.63 kJ/(kgºC)

b) Poder calorífico

Tiene un alto contenido de energía por unidad de masa con un poder calorífico superior (PCS) de 141MJ/kg y un poder calorífico Inferior (PCI) de 119MJ/kg [14]. Estos valores son muy superiores a los de otros combustibles convencionales, siendo el poder calorífico inferior del hidrógeno del orden de tres veces superior al de la gasolina. Debido a la baja densidad del hidrógeno en condiciones normales, posee una baja densidad energética por unidad de volumen con un poder calorífico inferior por unidad de volumen de 10.79MJ/m^3 [10].

c) Inflamabilidad

El hidrógeno no es explosivo, se trata de una molécula estable. A diferencia de los explosivos, el hidrógeno requiere una fuente externa de ignición para encenderse. Para que ocurra la combustión del hidrógeno, se necesitan tres condiciones: que el hidrógeno se mezcle con un agente oxidante, que esta mezcla esté dentro de los límites de inflamabilidad y que esté presente una fuente adecuada de ignición. [10]

Se denomina límites de inflamabilidad al intervalo de concentraciones combustible-aire en los cuales se puede llevar a cabo la combustión. Estos límites pueden variar con la presión y la temperatura, pero habitualmente se presentan como datos en porcentaje en volumen a 25 °C y presión atmosférica [15].

Los rangos de inflamabilidad del hidrógeno en aire seco a una presión de 101.3 kPa y a una temperatura de 298 K (25°C) son del 4.1% al 74.8% para los límites inferior y superior, respectivamente. En el caso de una mezcla de hidrógeno y oxígeno, estos límites son del 4.1% al 94%. Cuando la presión desciende por debajo de 101.3 kPa, se observa una tendencia a reducir el rango de inflamabilidad, lo que se traduce en un aumento del límite inferior y una disminución del superior. [16]. En la Figura 1, se muestra los límites de inflamabilidad de la mezcla hidrógeno-oxígeno-nitrógeno.

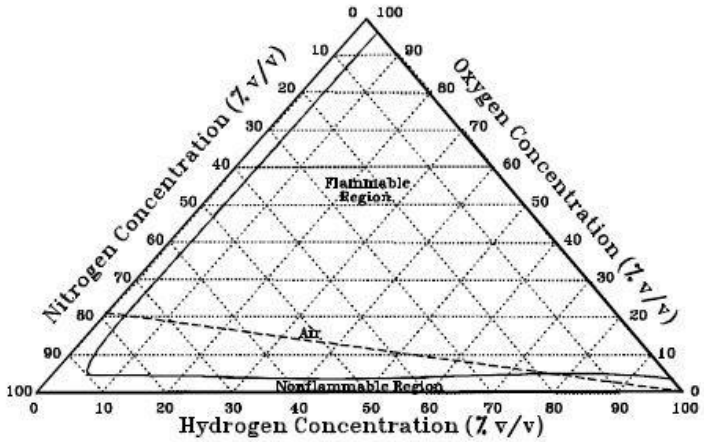


Figura 1. Diagrama ternario que representa el límite de inflamabilidad de las distintas composiciones de hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, entre ellas el aire [15].
Fuente: Apilados https://apilados.com/blog/es-el-hidrogeno-peligroso/

d) Temperatura de Autoignición

Las temperaturas de autoignición varían según la concentración y la presión del hidrógeno gaseoso, así como según el tratamiento superficial de los recipientes. Las temperaturas obtenidas dependen en gran medida del sistema y de los valores específicos seleccionados, y solo deben aplicarse a sistemas similares. A una presión de 101.3 kPa (1 atm), el rango de temperaturas de autoignición para una mezcla estequiométrica de hidrógeno en aire va desde los 773 K (499.85 °C) hasta los 850 K (576.85°C), mientras que en una mezcla estequiométrica con oxígeno se encuentra entre los 773K (499.85 °C) y los 833 K (559.85°C) [16].

e) Energía mínima de la chispa para la ignición

La energía mínima necesaria para que una chispa inicie la ignición se conoce como la "mínima energía de la chispa." Esta energía mínima es requerida para encender la concentración del combustible que es más propensa a encenderse en el aire o en oxígeno. [10]. En la Tabla 2 se muestra la mínima energía de la chispa del hidrógeno en aire para diferentes presiones

La cantidad mínima de energía necesaria para encender el hidrógeno es significativamente menor que la requerida para el metano (0.29mJ) o la gasolina (0.24mJ). A pesar de esto, la energía de ignición de estos tres combustibles es lo suficientemente baja como para que cualquier fuente de ignición débil, como chispas, cerillas, superficies calientes o incluso la electricidad estática de un cuerpo humano, pueda ser suficiente para encender cualquiera de estos combustibles en presencia de aire. [9].

Tabla 2. Energía mínima de la chispa para la ignición de una mezcla de hidrógeno-aire Elaboración propia con datos obtenidos de: Safety Standard For Hydrogen And Hydrogen Systems

Energía mínima de la chispa (mJ)	Presión (kPa)
0.017	101.3
0.09	5.1
0.56	2.03

6.1.3 Propiedades características del hidrógeno gaseoso

Las características del hidrógeno gaseoso son más específicas y deben ser detenidamente analizadas.

a) Detección

El hidrógeno en forma gaseosa carece de color y olor, y no puede ser percibido por los sentidos humanos en ninguna concentración. Aunque el hidrógeno no es tóxico en sí mismo, puede volverse peligroso al reducir la concentración de oxígeno en el aire respirable, lo que podría llevar a una atmósfera con menos del 19.5 porcentaje en volumen de oxígeno, considerada deficiente en oxígeno. [10].

b) Densidad Variable

El hidrógeno es más ligero que el aire en condiciones normales (NTP) y tiende a subir a temperaturas superiores a 23 K (-250.15 °C) [17]. El vapor saturado es más pesado que el aire y permanece cerca del suelo hasta que aumenta la temperatura [9]. Las velocidades de flotabilidad se vinculan con la disparidad de densidades entre el combustible y el aire. En consecuencia, los gases de hidrógeno frío y denso expulsados por la evaporación del hidrógeno líquido se elevarán a un ritmo más lento que los gases a temperatura y presión estándar. La velocidad de ascenso del hidrógeno en condiciones normales de temperatura y presión (NTP) en el aire oscila entre 1.2 y 9 m/s. [7].

c) Velocidad de combustión en aire en condiciones normales.

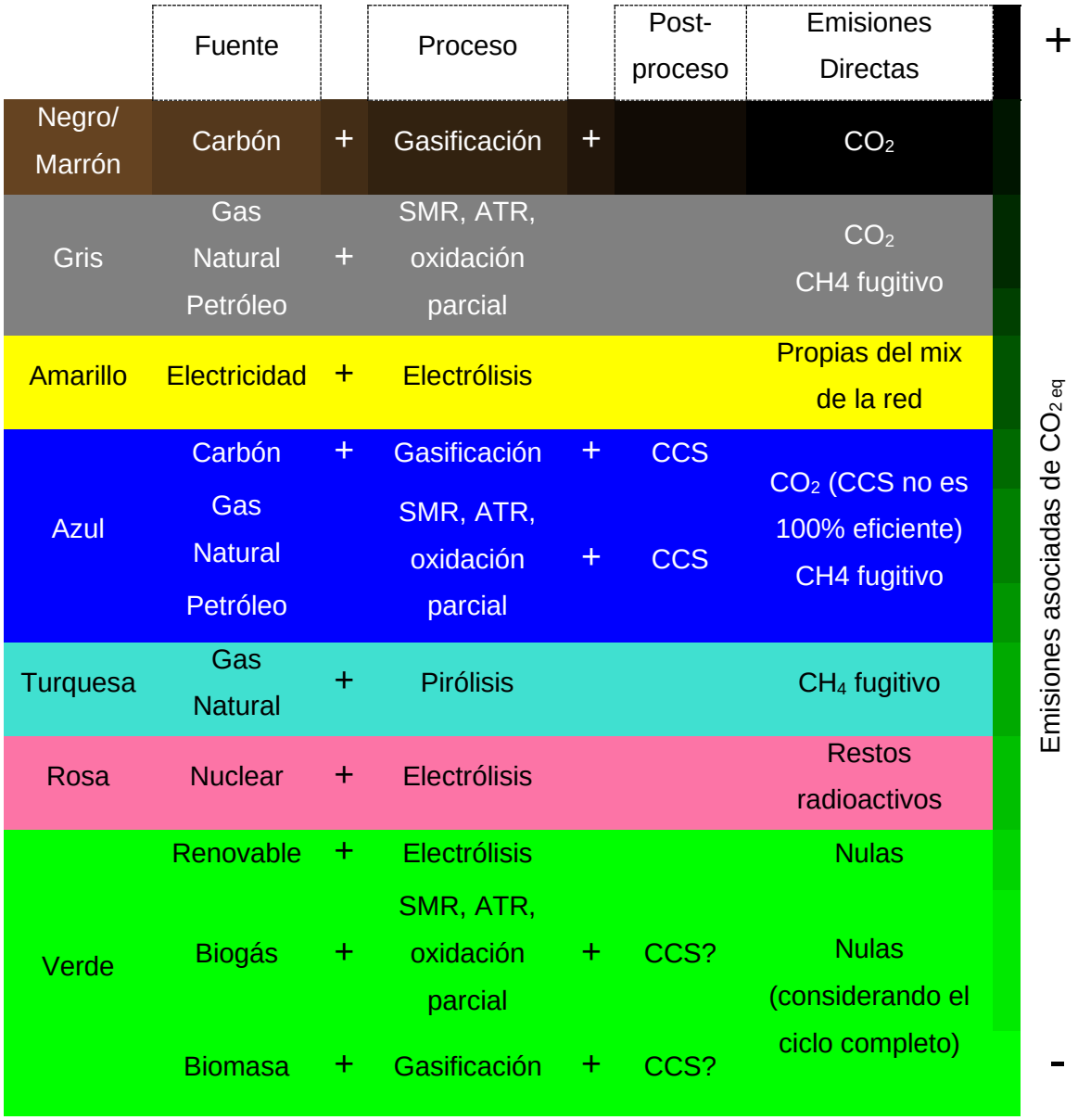
La velocidad de combustión en aire a condiciones normales, definida como la velocidad subsónica a la que la llama se propaga a través de una mezcla de aire combustible, es de 2.7 a 3.5 m/s [10]. La rapidez con la que ocurre la combustión está determinada por la presión, temperatura y la composición de la mezcla. La elevada velocidad de combustión del hidrógeno señala su gran capacidad explosiva y la desafiante tarea de contener las llamas y explosiones de hidrógeno. [15].

6.1.4 Producción de hidrógeno

El hidrógeno no se encuentra de forma natural en su estado elemental; en cambio, debe ser generado a partir de diversos compuestos que lo contienen, los cuales se encuentran en diversas fuentes. Estas fuentes pueden ser de origen fósil, como el carbón, el petróleo y el gas natural, o de origen renovable, como el biogás y la biomasa. [7]. Idealmente, la energía de entrada debería ser igual a la energía contenida en el gas de síntesis, sin embargo, la producción de hidrógeno en cualquier proceso implica conversión de energía y desafortunadamente, la transformación de la energía siempre conduce a la pérdida de energía [10].

Una de las principales fortalezas del hidrógeno radica en su capacidad para ser generado a partir de diversas fuentes potenciales, como el agua, los combustibles fósiles y la materia orgánica. La Figura 2 ilustra las principales vías para la producción de hidrógeno en la actualidad, las cuales se pueden clasificar por colores que van desde el verde hasta el negro de acuerdo con la fuente y el tipo de proceso, mientras más oscuro sea el color será mayor la emisión de contaminantes. Cada enfoque presenta sus propias ventajas y desventajas que

deben ser consideradas en términos de costos, emisiones, factibilidad, escala y logística.



SMR: steam methane reforming; ATR: autothermal reforming; CCS: carbon capte and storage

Figura 2. clasificación del hidrógeno según su método de obtención
Elaboración propia. Fuente: Apilados (2022) https://apilados.com/blog/es-el-hidrogeno-peligroso/

A partir de esta clasificación de colores del hidrógeno dependiendo del método usado para obtenerlo pueden destacarse tres colores, el hidrógeno negro o gris, azul y verde, los cuales se describen a continuación.

- ***Hidrógeno negro***, también llamado gris, ha sido por décadas el método más usado para la producción de hidrógeno por el bajo costo, se produce a base de derivados del petróleo, no se capturan las emisiones de dióxido de carbono lo que genera una huella de carbono para el hidrógeno producido [18].

- ***Hidrógeno azul*** es uno de los más comunes hoy en día, éste se produce a partir del gas natural o sus yacimientos, durante el proceso se capturan las emisiones de CO_2 evitando que salgan a la atmósfera haciendo menor su impacto ambiental, pero al agregar este paso en el proceso lo hace más costoso [18].

- ***Hidrógeno verde*** es aquel que se produce mediante fuentes renovables de energía, como lo son los parques eólicos, los parques solares o a partir de la biomasa [18].

6.2 Biomasa

6.2.1 Definición

El profesor Martín Mateo (2008) define como energía de la biomasa “la de origen solar convertida a través de la fotosíntesis en energía química almacenada en distintos cuerpos orgánicos; la cual abarcaría, en principio todo lo que siendo o habiendo sido materia viva vegetal, es reconducible mediante un proceso de recuperación adecuado, al incremento de nuestras disponibilidades energéticas” [19].

La biomasa abarca todo un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza. En el contexto energético, el término biomasa se emplea para denominar a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato o de los productos derivados de ésta [20]. Asimismo, se considera como biomasa a la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), así como a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU), aunque si bien dadas las características específicas de estos residuos se suelen considerar como un grupo aparte [20].

La biomasa se considera como energía renovable ya que su contenido energético procede de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Esta energía se libera al romper los enlaces de los compuestos orgánicos en el proceso de combustión, dando como productos finales dióxido de carbono y agua [20].

La biomasa ha sido la energía más importante durante la historia de la humanidad y en la actualidad constituye una parte fundamental del consumo mundial de energía, especialmente en los países en vías de desarrollo [20].

La conversion de biomasa en energía va desde el uso más rudimentario a través de la quema de leña extraída de los bosques o para abastecimiento de la industria,

los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de procesos más eficientes para la conversión de la biomasa en energía [20].

6.2.2 Clasificación de la biomasa

El concepto de biomasa es sumamente amplio e incluye una variedad de recursos, como los desechos forestales, que provienen de la limpieza de bosques y la industria maderera; los desechos agrícolas, que abarcan paja, residuos de almazaras, invernaderos y podas; los desechos ganaderos; y los cultivos energéticos, que se cultivan en cantidades significativas para la producción de biomasa destinada a la energía, como el cardo, el chopo y el eucalipto. Una de las clasificaciones ampliamente aceptada que diferencia entre varios tipos de biomasa incluye la biomasa natural, los residuos secos, los residuos húmedos, los cultivos energéticos y los biocarburantes [21]. La biomasa presenta la ventaja de no solo ser utilizada en la generación de electricidad, sino también en la producción de biocarburantes que pueden emplearse tanto como fuente de energía térmica como combustible para operar calderas o maquinaria [22].

A) Clasificación de la biomasa según su origen

Según la ecología se pueden distinguir los tipos de biomasa dependiendo del origen de la materia orgánica [23].

Biomasa primaria: plantas

Se considera a toda la materia orgánica formada por los seres fotosintéticos, como algas, plantas verdes y demás seres autótrofos (organismos capaces de

sintetizar las sustancias esenciales para su metabolismo a partir de sustancias inorgánicas; es decir, que no necesitan de otros seres vivos para su nutrición) [23]; se incluye también a toda la biomasa vegetal, incluyendo los residuos agrícolas (como los tallos de piña, broza del café, rastrojo de la piña o los remanente de las podas y cosechas) y los residuos forestales (como la leña, el aserrín, las ramas y parte de la copa) [24].

Biomasa secundaria: herbívoros y sus residuos

Es producida por los seres que usan en su nutrición las plantas verdes o algas que componen la biomasa primaria [23]. Este tipo de biomasa implica una transformación biológica de la biomasa primaria para formar un nuevo tipo de biomasa de naturaleza distinta a la inicial. Ejemplos de esto son las carnes y los excrementos producidas por los animales herbívoros [24].

Biomasa Terciaria: carnívoros y sus residuos

Es producida por los seres que se alimentan de la biomasa secundaria, como sería el caso de los carnívoros que se alimentan de herbívoros [23].

B) Tipos de biomasa según su naturaleza

Biomasa vegetal

En términos generales la materia orgánica de los vegetales está compuesta de la siguiente manera [23].:

- 60% por hidratos de carbono, principalmente en formas de compuestos lignocelulósicos o amiláceos.
- 25% por proteínas.
- 6% por lípidos.
- 9% por elementos minerales

Es importante señalar que la composición de la biomasa vegetal no es la misma ya que algunas presentan una mayor cantidad de proteínas, lípidos o azucares como se enlista a continuación [24]:

- Mayor contenido de proteínas se presentan en las semillas de algunas legumbres.
- Mayor contenido de lípidos se presentan en algunos frutos y en las semillas de oleaginosas, como la soya, cacahuate, girasol, maíz.
- Mayor contenido de azúcares como los que se tiene en la raíz de la remolacha y el tallo de la caña.
- Mayor contenido de polisacáridos de reserva que se encuentran en los cereales y tubérculos como la papa

La biomasa vegetal se clasifica dependiendo del compuesto preponderante en su composición. Al ser los hidratos de carbono los compuestos más abundantes, la clasificación obedece principalmente a la forma en que se encuentran prioritariamente estos compuestos dando lugar a la siguiente clasificación según su composición [23]:

- *Biomasa lignocelulósica*: es en la que predominan las holocelulosas (celulosa y hemicelulosa) y la lignina; por ejemplo, madera, leña y aserrín.

- *Biomasa amilácea*: es en la que los hidratos de carbono predominantes se encuentran en forma de polisacáridos de reserva, tales como almidón o inulina; por ejemplo, cereales y papas.

- *Biomasa Oleaginosa*: es en la que predominan los lípidos, por ejemplo, semillas de girasol, soya, lino, almendra.

- *Biomasa rica en azúcar*: en la que el principal componente hidrocarbonato está constituido por azúcares, ya sean monosacáridos (glucosa o fructosa principalmente) o disacáridos (sacarosa). Ejemplos: remolacha y el tallo de la caña [24].

Biomasa animal

En cuanto a la biomasa animal, la proporción de prótidos, lípidos e hidratos de carbono es muy diferente a la que se da en los vegetales. Hay una disminución considerable del contenido en hidratos de carbono y un aumento en el contenido proteico y lípido [24].

C) Valoraciones relevantes de la biomasa

La biomasa también puede ser calificada de acuerdo con el contenido de agua:

- Biomasa semiseca, húmeda o fresca: Con más de un 13% de contenido de humedad.

- Biomasa seca: con menos de un 13% de contenido de humedad [24].

Un tejido vegetal fresco puede llegar a tener hasta más de un 90% de agua, como es el caso de las algas. Rastrojo de piña, residuos de plátano y la broza del café tienen altos contenidos de humedad.

La biomasa se puede clasificar también de acuerdo con su contenido de aceites u otros compuestos:

- Biomasas oleaginosas: Tienen gran contenido de aceite, por ejemplo: semillas de Tempate. (Jatropha curcas), la higuerilla, el coyol, el girasol y las aceitunas.

- Biomasas laticíferas: tienen hidrocarburos y esteroles como productos específicos de su metabolismo secundario, por ejemplo: los árboles cuyos troncos sirven para extraer látex y otras resinas. Las coníferas en general (pino, ciprés, araucaria) [24].

Aunque la proporción relativa de los compuestos lípidos es mayor a lo normal en las plantas oleaginosos y laticíferas, sigue siendo una pequeña proporción en relación con la biomasa total de las plantas que los producen [23].

6.2.3 Fuentes de biomasa para fines energéticos

La biomasa con fines energéticos se puede clasificar en: biomasa natural, residual, proveniente de excedentes de cosechas agrícolas y de los cultivos energéticos las cuales se describen a continuación.

a) Biomasa natural

Es la biomasa que se produce de manera natural en bosques y otras áreas que no se cultivan. Este tipo de biomasa ha sido históricamente utilizada por las personas para satisfacer sus necesidades, como la obtención de leña. A nivel global, es uno de los recursos ampliamente empleado y tiene un impacto ambiental significativo [23]. Sin embargo, no es la biomasa más adecuada para un aprovechamiento energético a gran escala, debido al riesgo de deforestación que conlleva. Aunque algunos de estos residuos provienen de partes muertas de los

árboles o de actividades como podas, que se realizan para prevenir incendios forestales o como parte de la gestión para promover el crecimiento de los árboles [24].

b) Biomasa residual

Se obtiene a partir tanto de los residuos agrícolas, forestales o ganaderas, como de los residuos orgánicos de las industrias, de las ciudades y pueblos, siendo en este último su principal beneficio la descontaminación producto de la eliminación de residuos.

San Miguel y Gutiérrez (2015) nos dicen que a nivel muy local constituye una alternativa muy interesante para generar modelos de autosuficiencia energética en aquellas industrias e instalaciones que aprovechan sus residuos para generar energía, como el caso de granjas, porcinas, aserraderos, plantas de transformación agroindustrial, industrias que quieran sustituir el uso de combustibles fósiles y centros de acopio de basura [24].

Algunas de las ventajas de utilizar la biomasa residual para producir energía son:

- Reduce la contaminación y el deterioro ambiental por los volúmenes de residuos.
- Los costos de producción son reducidos.
- Reduce la peligrosidad de acumular residuos como el caso del aserrín.
- Reduce el espacio que se tendría que destinar a la acumulación de desechos.
- Se reducen los gastos de transporte, ya que los residuos son utilizados para su aprovechamiento en distancias cercanas de las mismas instalaciones en las que se producen [24].

c) Biomasa proveniente de excedentes de cosechas agrícolas

El empleo de excedentes agrícolas con el propósito de convertirlos en combustibles debería ser una medida ocasional y no una situación constante. A pesar de que cultivos como el plátano, la palma aceitera y la piña, que abarcan áreas de plantación de miles de hectáreas, generan residuos de forma continua, aún se están investigando métodos para aprovechar de manera óptima la energía contenida en esa biomasa [24].

Es fundamental considerar que los cultivos destinados a producir esta biomasa tienen principalmente fines alimentarios. Por lo tanto, San Miguel y Gutiérrez (2015) nos dicen que su utilización para generar energía resulta en costos superiores a los de los combustibles a los que intentan reemplazar, lo que los hace poco competitivos en el mercado [24].

d) Biomasa producida mediante cultivos energéticos

Los cultivos energéticos se refieren a la utilización de especies arbustivas que se cultivan de manera intensiva con el propósito de generar biomasa destinada a la producción de energía. Estos arbustos suelen ser de naturaleza herbácea o leñosa, y en algunas ocasiones pueden coincidir con las especies empleadas en la reforestación convencional, aunque con densidades de plantación distintas y un enfoque de gestión más riguroso [24].

Cuando se elige un cultivo con el propósito de generar biomasa para la producción de energía, el aspecto fundamental es asegurar que se obtenga de manera rentable la máxima cantidad de energía neta, considerando las condiciones climáticas y de suelo específicas de cada región. En todos los casos, es esencial que la cantidad de energía producida supere la energía convencionalmente consumida en las actividades relacionadas con el cultivo, la recolección y la preparación del biocombustible. Además, es fundamental que la gestión del cultivo garantice el uso sostenible de la tierra y de los recursos hídricos [24].

6.3 Biocombustibles gaseosos

Dentro de los biocombustibles gaseosos que se pueden generar a partir de la biomasa se encuentra el gas de síntesis, este se obtiene a partir del proceso de gasificación, el biogás obtenido mediante una digestión anaerobia con la ayuda de microorganismos, y el hidrogeno que se puede obtener mediante diversas tecnologías [25].

La gasificación es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (residuo orgánico) se transforma en un gas combustible de bajo poder calorífico, a través de una serie de reacciones que ocurren a una temperatura determina en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno y/o vapor de agua) [25]. El producto obtenido es un gas de síntesis denominado syngás, que puede utilizarse como combustible para generar vapor o electricidad, o como productor de materia prima en la industria química [25].

El biogás es generado por las reacciones de biodegradación de residuos vegetales y animales como lo son: estiércoles, aguas residuales o residuos agrícolas y de industrias agroalimentarias, mediante la acción de microorganismos y en condiciones anaerobias. El biogás se produce en biodigestores, que son sistemas que aprovechan las digestiones anaerobias realizadas por las bacterias que ya habitan en la materia prima, para transformar ésta en biogás y en fertilizante (digestato). El biogás puede ser empleado como combustible en cocinas, iluminación y calefacción domésticas, o en grandes instalaciones, alimentando a motores que generen electricidad [25].

En la actualidad, alrededor de la mitad de hidrógeno que se produce en el mundo se obtiene a partir de procesos termocatalíticos y de gasificación, los cuales utilizan gas natural como materia prima. Otras fuentes importantes de H_2 requieren aceites pesados y naftas, seguidas por el carbón natural, estando sólo el 4% del hidrógeno generado a partir de la electrolisis del agua, sin embargo, la mayoría de estos procesos requieren elevados gastos energéticos y dependen sumamente de

recursos no renovables. Sumando a estos hechos que las reservas mundiales de hidrocarburos se han reducido a una velocidad alarmante, hacen que la producción biológica de hidrógeno (biohidrógeno: Bio-H_2), a partir de biomasa, resulten ser una alternativa muy interesante como recurso sostenible para un futuro [25].

6.3.1 Gas de síntesis

El gas de síntesis, o syngás, se produce al someter a la biomasa a altas temperaturas (entre 800 y 1.500ºC) en ausencia de oxígeno. Con este proceso se obtienen productos gaseosos con poderes caloríficos bajos (4.2-5 MJ/m3) compuestos por N_2, CO, H_2, CH_4 y CO_2 en proporciones variables [25].

El rendimiento del proceso de gasificación varía entre un 70 y un 80%, en función de la tecnología empleada y del combustible o el tipo de agente gasificante que se utilice. El resto de la energía se invierte en las reacciones endotérmicas del proceso, en las pérdidas de calor de los reactores, en el secado, filtrado y lavado del syngás. El destino del gas de síntesis suele ser la producción de calor por combustión directa en un quemador o la generación de electricidad por medio de un motor o turbina.

6.4 Procesos de conversión de la biomasa en energía

El principal desafío relacionado con el uso de biomasa en su estado natural como fuente de energía, ya sea en la generación eléctrica o como combustible directo, radica en su baja densidad energética, que es aproximadamente la mitad de la que ofrece el carbón térmico. En segundo lugar, se encuentra su alta capacidad de retención de humedad, y, por último, la degradación biológica. Estos factores hacen que el transporte de la biomasa a largas distancias sea poco rentable, lo que a su vez implica que debe ser utilizada en las proximidades del lugar donde se genera, lo que determina la escala de la planta o la utilización [23].

Los procesos de conversión de la biomasa en energía se clasifican generalmente en termoquímicos y bioquímicos. En la Figura 3 se muestran los principales procesos de conversión de biomasa y sus productos energéticos.

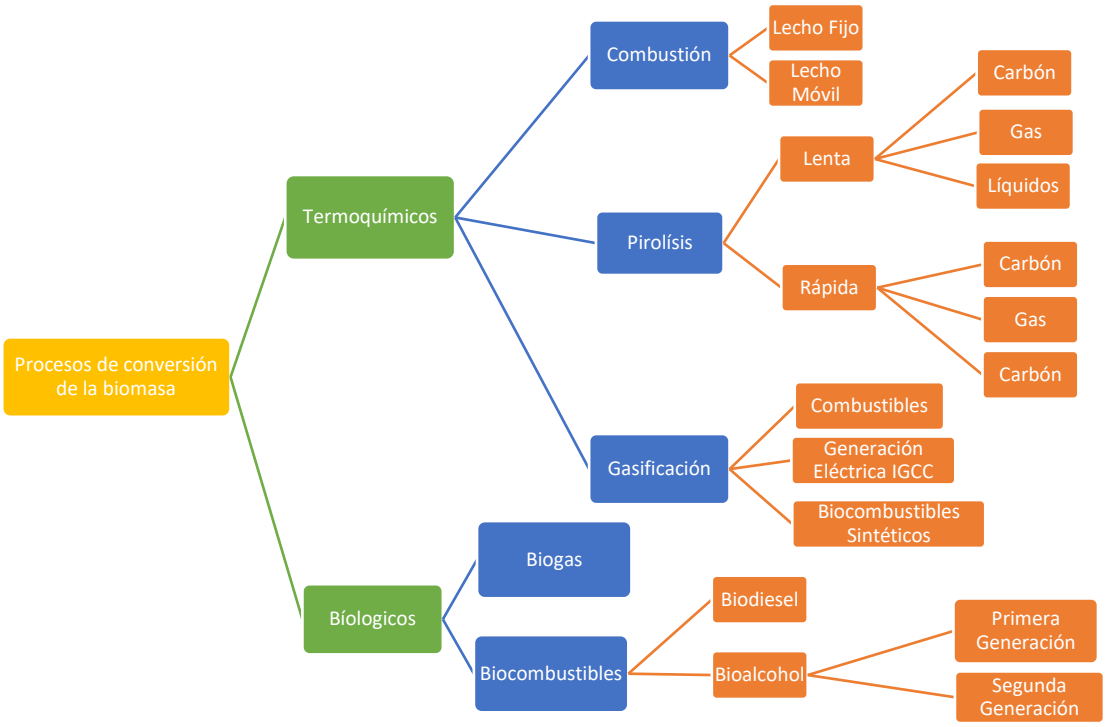


Figura 3. Procesos de conversión de biomasa a energía.
Fuente: Elaboración propia con información obtenida de: Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad [26]

En esta investigación nos centraremos en los procesos termoquímicos por motivo de interés y adaptabilidad al espacio de trabajo. Los procesos termoquímicos se dividen en gasificación, combustión directa y pirólisis

6.4.1 Gasificación

La gasificación es un proceso de conversión de la biomasa sólida en un gas combustible a través de una serie de reacciones químicas que se desencadenan a temperaturas elevadas, generalmente en el rango de 750°C a 900°C. Estas reacciones se llevan a cabo utilizando aire, oxígeno, vapor de agua o una combinación de estos como agente oxidante [27].

Por medio de la gasificación es posible obtener gases con un poder calorífico que oscila entre 4 MJ/m^3 y 6 MJ/m^3. Estos gases pueden emplearse directamente en procesos de combustión o como combustible en motores y turbinas de gas. Además, el gas resultante de este proceso puede ser utilizado como materia prima en la producción de diversos productos químicos, y en esta aplicación se le conoce como gas de síntesis. La producción de gas de síntesis a partir de biomasa permite generar metano, hidrógeno, biogasolina y biodiesel, los cuales desempeñan un papel importante en el avance de los combustibles limpios [28].

Etapas

La biomasa pasa por varias etapas, mostradas en la Figura 4, independientemente de la tecnología utilizada en el proceso de gasificación, cuyo orden e importancia depende del combustible y de los elementos del agente gasificante utilizado, pero que pueden agruparse en tres:

- **Pirólisis o descomposición térmica:** En primer lugar, la biomasa sufre un proceso de secado y de precalentamiento al entrar en el gasificador. Posteriormente, y en ausencia de oxígeno, el combustible se descompone en una mezcla de sólido, líquido y gas. Al sólido originado se le denomina “char” y a los líquidos, debido a la presencia de alquitranes y vapores condensables, se les llama “tar”.
- **Oxidación o combustión:** Esta fase tiene lugar cuando el agente gasificante es un oxidante como el oxígeno o el aire, dando lugar a una serie de reacciones de oxidación, fundamentalmente exotérmicas. Mediante ellas se genera el calor necesario para que el proceso se mantenga.
- **Reducción o gasificación:** Esta fase la constituyen las reacciones en las que el sólido remanente se convierte en gas. Son reacciones fundamentalmente endotérmicas. Las etapas de oxidación y reducción pueden considerarse conjuntamente en una sola etapa de gasificación en la

que tienen lugar todo tipo de reacciones posibles entre el char y la mezcla gaseosa presente [25].

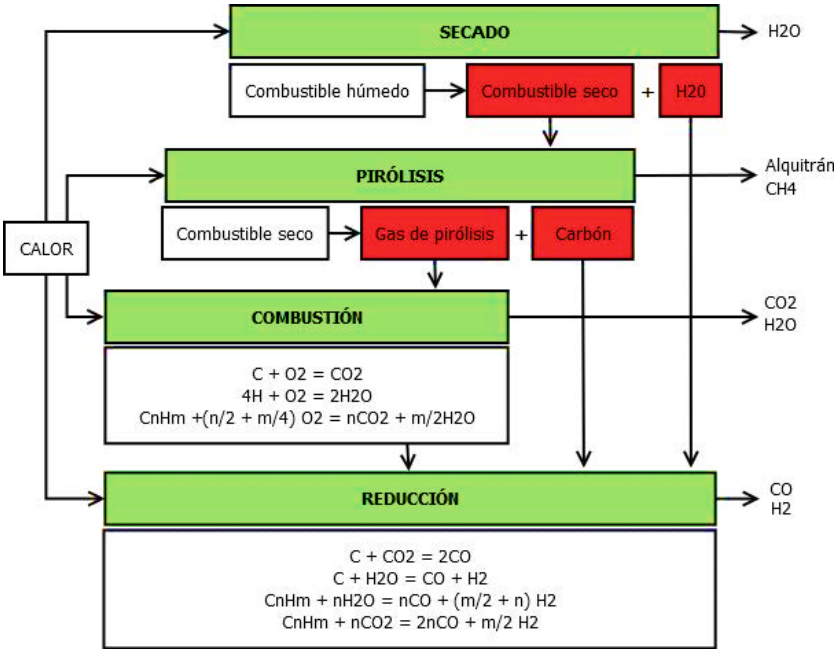


Figura 4. Etapas de la gasificación [25]. Fuente: http://www.btgworld.com

6.4.2 Combustión

La combustión es el proceso mediante el cual la biomasa se transforma en gases calientes, con temperaturas alrededor de 800-1000ºC, al aplicar una energía térmica elevada en presencia de oxígeno [29].

La combustión directa se refiere a la quema de biomasa en presencia de aire, esta combustión es usada comúnmente para convertir la energía química almacenada en la biomasa en calor, energía mecánica o electricidad. Es posible quemar cualquier tipo de biomasa con contenido de humedad menor a 50%; en caso contrario, es necesario un pretratamiento de secado [30].

La combustión de biomasa ha sido comúnmente utilizada desde la antigüedad a pequeña escala para cocina doméstica y calefacción de espacios. Sin embargo, este tipo de combustión directa es considerada ineficiente debido a que se pierde entre 30% y 90% de transferencia de calor durante el proceso [30].

La co-combustión en las centrales eléctricas de la biomasa junto al carbón es una opción atractiva debido a su alta eficiencia de conversión en energía. A pesar de ello, la combustión no se considera un proceso de conversión adecuado ya que no produce combustibles que puedan ser posteriormente utilizados (bioaceites o biogás) [31].

6.4.3 Pirólisis

La pirólisis es un proceso termoquímico que convierte la materia orgánica en combustibles útiles, con un alto rendimiento, mediante calentamiento a temperatura moderadamente alta (350-650ºC) y en ausencia de oxígeno. Por su capacidad de tratamiento, es el método más eficaz para competir con las fuentes de combustibles no renovables [32].

En términos químicos, la pirólisis es un proceso que involucra una serie de reacciones complejas. Estas reacciones son influenciadas por diversos factores, como la estructura y composición de la materia prima, la tecnología empleada, la rapidez con la que se calienta, el tiempo de permanencia, la velocidad de enfriamiento y la temperatura del proceso. [33].

En la Tabla 3 se comparan los distintos tipos de procesos de pirólisis, que se clasifican según la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia y la temperatura final en: carbonización, pirólisis convencional, pirólisis rápida, pirólisis flash de gases y líquidos, pirólisis ultra rápida, pirólisis a vacío, hidro-pirólisis y metano pirólisis.

Tabla 3. Tipos de pirólisis en función del tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento y temperatura y los productos obtenidos de interés en cada uno de ellos. Fuente: Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems [34]

Proceso	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento	Temperatura (°C)	Productos
Carbonización	Días	Muy lenta	400	Bio-char
Convencional	5-30 min	Lenta	600	Gas, líquido y biochar
Rápida	0.5-5 seg	Muy rápida	650	Bioaceites
Flash (Líquidos)	< 1 seg	Rápida	< 650	Bioaceites
Flash (Gas)	< 1 seg	Rápida	< 650	Químicos y gas
Ultrarrápida	< 0.5 seg	Muy rápida	1000	Químicos y gas
Vacío	2-30 seg	Media	400	Bioaceites
Hidropirólisis	< 10 seg	Rápida	< 500	Bioaceites
Metanopirólisis	< 10 seg	Rápida	>700	Químicos

Pirólisis convencional

La pirólisis convencional se lleva a cabo a una velocidad de calentamiento lenta, alcanzando una temperatura máxima entre 500-600ºC. En estas condiciones, se obtienen tres productos (sólidos, líquidos y gases) en proporciones significativas [29].

Pirólisis rápida

Es el proceso por el cual el material se calienta rápidamente en ausencia de oxígeno y a temperaturas altas (650ºC). Se utiliza sobre todo para la producción de

bioaceites ya que los rendimientos en peso de esta fracción son muy superiores a los que se obtienen en la pirólisis convencional [35].

La velocidad de calentamiento elevada junto con un enfriamiento rápido provoca que la condensación de la fracción líquida se produzca sin que se lleven a cabo las reacciones de craqueo de los compuestos de elevado peso molecular, que pasan a formar parte de los gases no condensados. A escala comercial solamente se ha logrado con reactores de lecho fluido y se han instalado plantas pilotos en varios lugares dentro de la Unión Europea [35].

Pirólisis flash o pirólisis ultrarrápida

La pirólisis flash se lleva a cabo cuando la temperatura del proceso es más elevada (1000 ºC) y los tiempos de residencias son aún más cortos, la pirólisis se denomina también ultrarrápida. En este caso, el mayor rendimiento corresponde a los gases. Sin embargo, la pirólisis flash es una vía prometedora en lo que respecta a la producción de bioaceites.

La conversión de la biomasa en aceite crudo puede tener una rendimiento de hasta el 70 % [29]. Los aceites pueden emplearse en turbinas y motores, aunque su utilización presenta desafíos debido a las propiedades fisicoquímicas inherentes de los aceites, como su limitada resistencia a altas temperaturas, capacidad corrosiva y contenido energético reducido. En los procesos de pirólisis flash, es posible ajustar las condiciones operativas para promover la producción de gas (flash-gas) o líquidos (flash-líquidos). La Tabla 4 compara los rendimientos típicos de las fracciones obtenidas en distintos tipos de pirólisis [29].

Tabla 4. Comparación de rendimientos (expresados en % peso/peso) de las fracciones obtenidas (líquidos, char y gas) en función del tipo de proceso termoquímico. Elaboración propia con datos obtenidos de: Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual [29]

Proceso	Rendimientos (%)		
	líquidos	Char	Gas
Pirólisis Rápida	75	12	13
Pirólisis Convencional	50	20	30
Carbonización	30	35	35
Gasificación	5	10	85

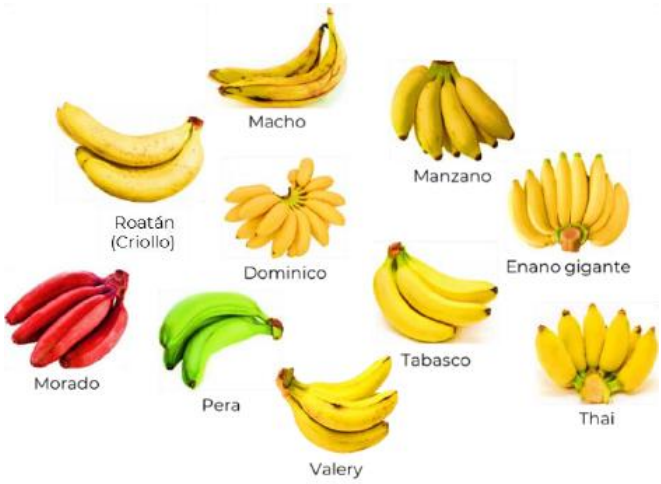
La pirólisis, es, por tanto, un proceso flexible, que permite, mediante el uso de la tecnología adecuada, favorecer la producción de gases, líquidos o aceites y biocarbones según sean las necesidades. Una ventaja de la pirólisis radica en su simplicidad, lo que se traduce en costos más bajos, aunque aún no ha alcanzado plenamente su desarrollo comercial. Un inconveniente de este proceso es que generan una mezcla de gases, por lo que se requieren operaciones de separación para obtener hidrógeno de alta pureza.

La pirólisis de la biomasa consiste en calentar la biomasa a temperaturas de alrededor de 500 °C en ausencia de oxígeno. En este proceso la biomasa se convierte en líquido (bioaceites y biocrudos), carbón y gases no condensables, ácido acético, acetona y metanol. Este proceso puede ser ajustado para favorecer la producción de carbón, aceites y gas con una eficiencia de 95%; estos tres productos siempre se generan durante este proceso, pero las proporciones pueden variar ajustando los parámetros [36].

6.5 Musa x Paradisiaca (Plátano Tabasco)

El plátano es un fruto cuyo nombre proviene del latín platanus y del griego plátos que significa “anchura” por las grandes hojas de este árbol [37], al plátano se le conoce también como banano, banana, guineo. El árbol de plátano o platanera es originario del Sureste de Asia y se ha extendido a todas las regiones tropicales y subtropicales del mundo. Los primeros registros de esta especie se remontan a los dibujos encontrados en las antiguas ruinas del monumento javanés a Buda en Bordodur, que fue construido en el año 850 a. C. [38]. La platanera se introdujo en el Mediterráneo alrededor del año 650 d. C. y llegó a las Islas Canarias en el siglo XV, el cultivo comercial de la platanera comenzó en estas islas a fines del siglo XIX y continuó durante parte del siglo XX. Desde allí, la platanera fue llevada a América en 1516 [38].

Actualmente, en México se cultivan principalmente ocho variedades de plátano,



las cuales se describen a continuación y algunas de estas se muestran en la Figura 5:

Figura 5. Variedades de plátanos que se cultivan en México 2021. Fuente: SIAP, 2022 [48]

- ***Dominico***: de sabor dulce, los frutos son cortos, delgados y rectos

- ***Valery***: su fruto es menos firme y su textura parece la de una ciruela
- ***Pera***: cuerpo grueso y ligeramente curvado. Mide 24.1 cm de longitud, 5.6 cm de diámetro mayor y de 300 gr de peso.
- ***Tabasco*** (*musa x paradisiaca*): produce frutos medianos de buena calidad y delicioso sabor.
- ***Morado***: resistente a enfermedades, es de sabor fuerte; de la siembra a la cosecha tarda 18 meses. Al madurar el fruto obtiene un color anaranjado.
- ***Manzano***: Sus racimos son de 16 a 18 unidades. Su sabor y su aroma son agradables.
- ***Cavendish gigante*** o ***Grand Naine***: su cáscara es gruesa y de sabor poco intenso, es la variedad más grande de los enanos.
- ***Macho***: la planta produce poca fruta. Es más sabroso cocido, frito o al horno.

Dentro de las variedades más comunes del plátano se encuentra el plátano Tabasco (*Musa x paradisiaca)* la cual será objeto de estudio en este trabajo de investigación.

6.5.1 Características de la platanera

Las partes de la platanera como se observan en la Figura 6 son: hojas, frutos, rachis, bellota y pseudotallo. El pseudotallo de la platanera mide entre 2 a 5 m, y su altura puede alcanzar hasta 8 m con las hojas. Los frutos son bayas falsas sin semillas, cilíndricos distribuidos en manos de racimos de 30 a 70 plátanos que miden de 20 a 40 cm de largo y de 4 a 7 cm de diámetro [39],

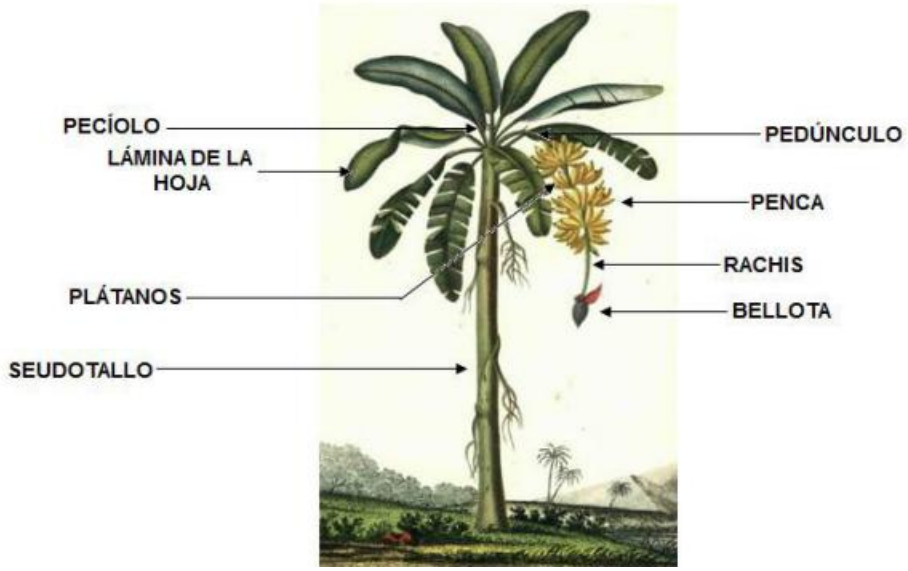


Figura 6. Partes de la platanera. Fuente: Propiedades funcionales del plátano (Musa sp) [39].

El plátano Tabasco (*musa x paradisiaca*) es uno de los cultivos más importantes en la agricultura mexicana, ya que ocupa el segundo lugar en la producción de frutas tropicales [40]. Es un alimento básico, con un precio asequible y un sabor agradable, está disponible durante todo el año y se puede utilizar en una variedad de recetas. El plátano es conocido por generar una sensación de saciedad y tiene un alto valor nutritivo, ya que es una fuente de potasio, hierro y vitamina K [40]. El consumo de un solo plátano puede proporcionar hasta el 23% de potasio que necesita el ser humano al día [41].

El plátano es un cultivo muy extendido en los países con climas tropicales, debido a su amplia disponibilidad en el mercado nacional, es una de las frutas más consumidas, en promedio, un mexicano consume 14.2 kilos de plátano al año [42]. Sin embargo, solo se consume la pulpa del fruto, lo que genera una gran cantidad de residuos. Estos residuos suelen ser desechados en vertederos municipales, lo que contribuye a la creación de problemas medioambientales.

6.5.2 Propiedades funcionales de la cáscara del plátano

El principal subproducto del proceso industrial del plátano es la cáscara, que representa aproximadamente el 30% del peso del fruto [41] esto se presenta como una oportunidad para ser empleada en un ámbito distinto, como la producción de energía, ya que no se le brinda otro uso. La cáscara de plátano es rica en fibra dietética, proteínas, aminoácidos esenciales, ácidos grasos poliinsaturados y potasio [43], entre los esfuerzos para utilizar la cáscara se han obtenido proteínas, metanol, etanol, pectinas y enzimas [39].

El contenido total de compuestos fenólicos en la cáscara de plátano (*Musa acuminata Colla AAA*) varía de 0.9 a 3 g/100 g en base seca [44]. Someya et al [45] en el año 2002 identificaron la galocatequina en concentraciones de 160 mg/100 g en base seca, siendo este compuesto al que se le relaciona la capacidad antioxidante de la cáscara [44]. La cáscara de plátano maduro también contiene otros compuestos tales como las antocianinas (delinidina y cianidina) y catecolaminas [45].

En estado inmaduro, el plátano posee una alta concentración de almidón (70%) a comparación de la fruta en estado maduro [46]. Este almidón se degrada a una pequeña porción de monosacáridos mientras que el resto del almidón se degrada a sacarosa [47]. La cáscara de plátano tiene un alto contenido de fibra dietética (50 g/100g) por lo que es una buena fuente de este compuesto, se ha determinado que la maduración del plátano muestra un impacto positivo en la composición de fibra de la cáscara, compuesta principalmente de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina [48].

6.5.3 Producción de plátano a nivel mundial

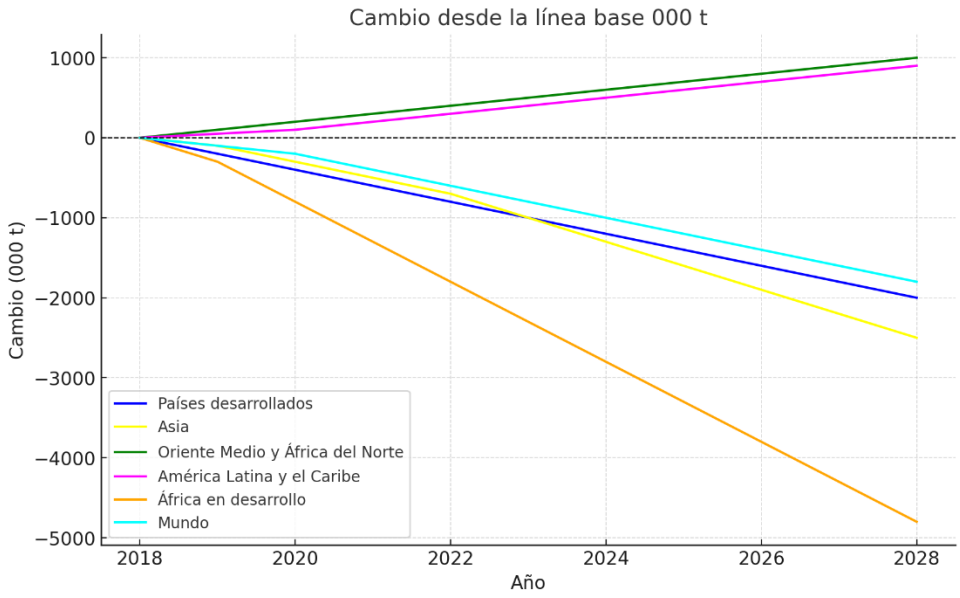
En la Tabla 5, se muestran las estadísticas que proporciona la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAOSTAT) de la producción mundial regional de plátano en el 2020. Durante este año, África se ubica como la región con mayor

superficie cosechada de plátano, concentrando el 60.4% mundial. Sin embargo, Asia dispone del 43.2% del volumen total producido. Cabe señalar que, a pesar de su baja participación en la oferta mundial, el rendimiento más alto se observa en la región de Europa [49]. La participación de América en la producción mundial se reporta con 18.0% de la superficie cosechada y 24.0% del volumen total de producción [50].

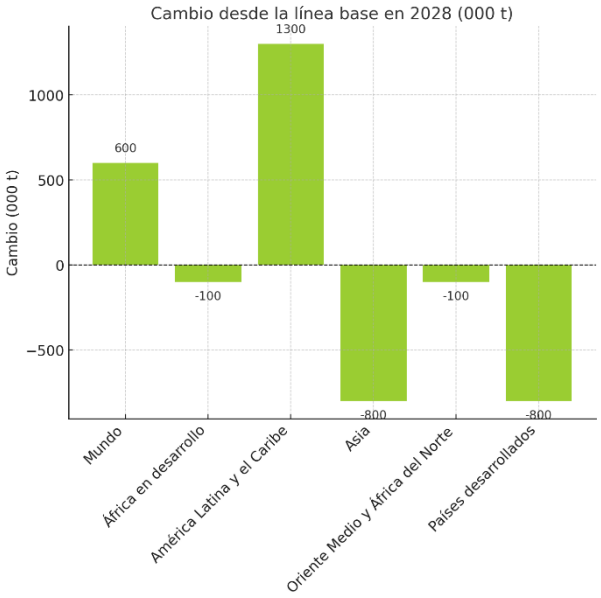
Tabla 5. Producción mundial regional de plátano 2020. Fuente: FAOSTAT, 2022 [49].

Región	Superficie cosechada (ha)	%	Volumen producido (ton)	%	Rendimiento (ton/ha)
África	7,083,485	60.4%	51,165,841	31.4%	7.2
Américas	2,105,291	18.0%	39,091,022	24.0%	18.6
Asia	2,411,796	20.6%	70,335,341	43.2%	29.2
Europa	19,410	0.2%	652,670	0.4%	33.6
Oceanía	100,368	0.9%	1,705,394	1.0%	17.0
Total	11,720,350	-	162,950,268	-	13.9

En la Gráfica 1 se muestra la predicción estimada de la producción de plátano por región desde el 2018 al 2028, y como será el cambio en las exportaciones de cada región según la inversión que se haga en cada una de ellas, mostrando como América Latina y el Caribe prosperarán en el año 2028 en cuanto a la exportación de este fruto como se muestra en la Gráfica 2 [49].



Gráfica 1. Escenario de impacto estimado en la producción bananera por región 2018 - 2028
Fuente: FAO, 2019 [49].



Gráfica 2. Estimación del escenario de cambio en las exportaciones bananeras por región en 2028
Fuente: FAO, 2019 [49].

En la Tabla 6 se muestra la producción de plátano en la región de las Américas, en donde la región sur concentra el 70.5% de la superficie cosechada y el 60.0% de la producción, aunque el rendimiento más alto se registra en la región central del continente.

Tabla 6. Producción de plátano en las Américas 2020. Fuente: FAOSTAT, 2022 [49].

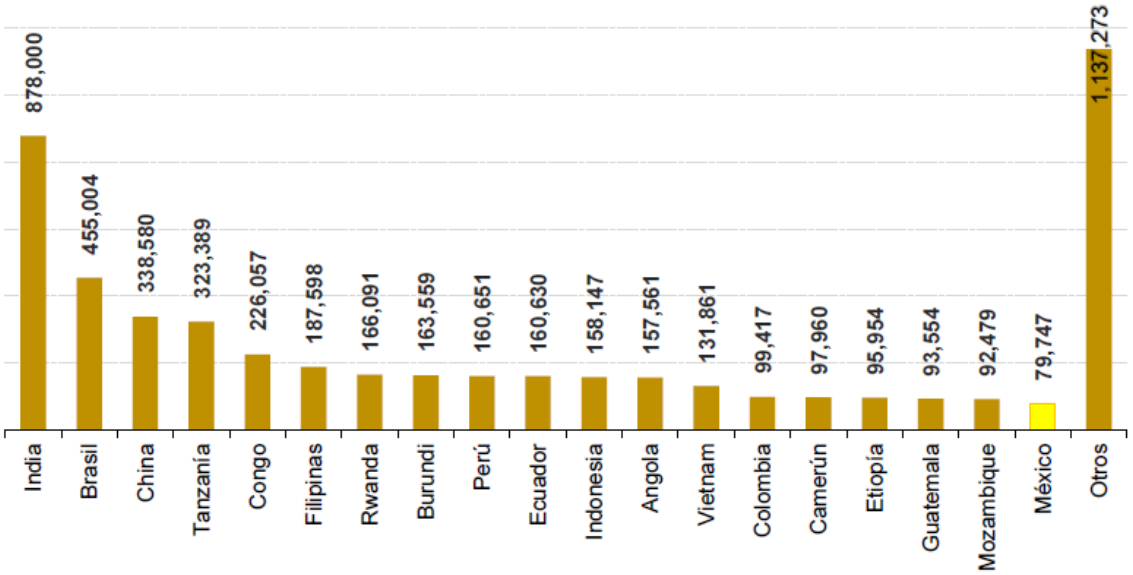
Región	Área cosechada (ha)	%	Producción (ton)	%	Rendimiento (ton/ha)
América central[1]	317,536	15.1%	11,573,800	29.6%	36.4
América del sur[2]	1,484,382	70.5%	23,457,707	60.0%	15.8
América septentrional[3]	327	0.02%	2,935	0.01%	9.0
El Caribe[4]	303,046	14.4%	4,056,580	10.4%	13.4
Total	2,105,291	-	39,091,022	-	18.6

América central[1] (8 países): Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua y Panamá. América del sur[2] (10 países): Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Guyana, Paraguay, Perú, Surinam y Venezuela

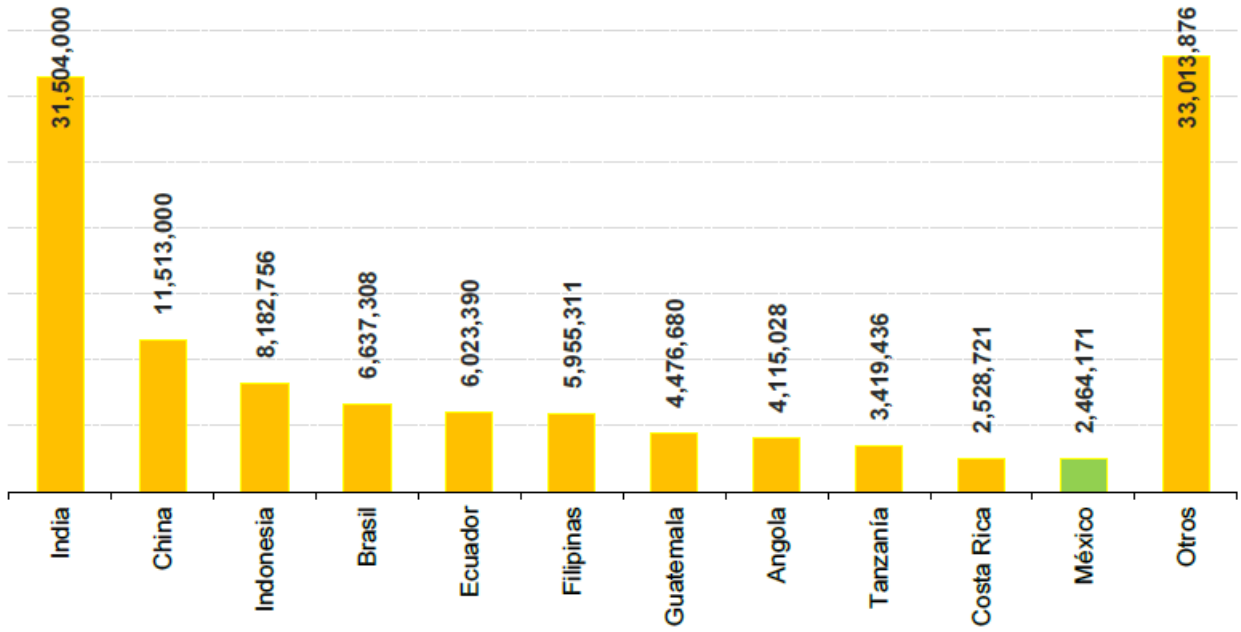
América septentrional[3] (1 país): Estados Unidos de América.

El Caribe[4] (13 países): Antigua y Barbuda, Bahamas, Barbados, Cuba, Dominica, Granada, Haití, Jamaica, Puerto Rico, República Dominicana, San Vicente y las Granadinas, Santa Lucía, Trinidad y Tobago.

A nivel mundial México se ubica en la posición número 19 de superficie cosechada de plátano como se muestra en la Gráfica 3 y es el número 11 en la producción de este cultivo como se muestra en la Gráfica 4, aportando el 1.5% y 2.1% respectivamente. Asimismo, dentro de la región de las Américas concentra el 5.9% de la superficie cosechada y 7.8% de la producción [49].



Gráfica 3. Superficie cosechada de plátano a nivel mundial 2020 (hectáreas). Fuente: FAOSTAT, 2022 [49].



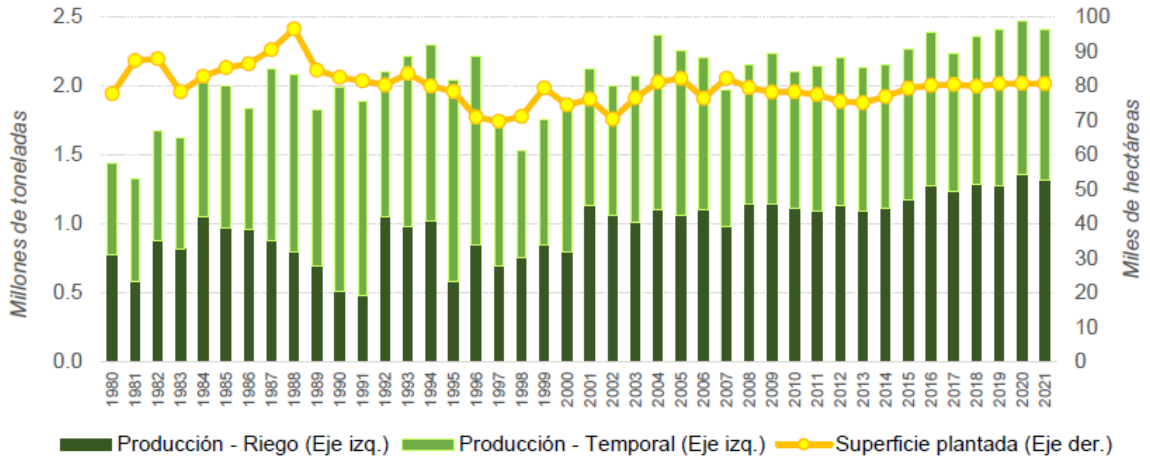
Gráfica 4. Volumen producido de plátano a nivel mundial 2020 (toneladas). Fuente: FAOSTAT, 2022 [49].

En México este cultivo representa el 1.2% del valor de la producción agrícola nacional y es una fuente importante de empleos en las zonas rurales del país, genera más de 120 mil empleos directos y más de 180 empleos indirectos al año [49]. Se tiene el registro de que aproximadamente 5,000 productores en las 16 entidades federativas lo producen, además de que este agrosector ocupa alrededor de 90 mil jornaleros en la producción y empaque del fruto [49].

6.5.4 Producción de plátano a nivel nacional

Desde 1980 hasta 2021, la superficie dedicada al cultivo de plátano en México experimentó un aumento del 5.3%, esto implicó un incremento de 76,438 hectáreas sembradas a 80,520 hectáreas [49], como se observa en la Gráfica 5, durante este periodo, la producción inicial de plátanos fue de 1.4 millones de toneladas, la cual aumentó a 2.4 millones de toneladas en 2021. Del total de la producción, el 54.5% se llevó a cabo utilizando el riego como método de humedad, mientras que el 45.5% restante fue en condiciones de temporal; en el ciclo agrícola del 2020, el plátano

ocupó el cuarto lugar como el fruto con mayor producción, quedando detrás de la naranja, el limón y el aguacate [49].



Gráfica 5. Historial de área sembrada y producción de plátano en México 2021. Fuente: SIAP, 2022 [49]..

Según el informe del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) correspondiente al año 2021, se registró la producción de 10 variedades de plátano con relevancia económica las cuales se muestran en la Figura 7. Además, se incorporó la variedad de enano gigante dentro del grupo de producción orgánica [49].

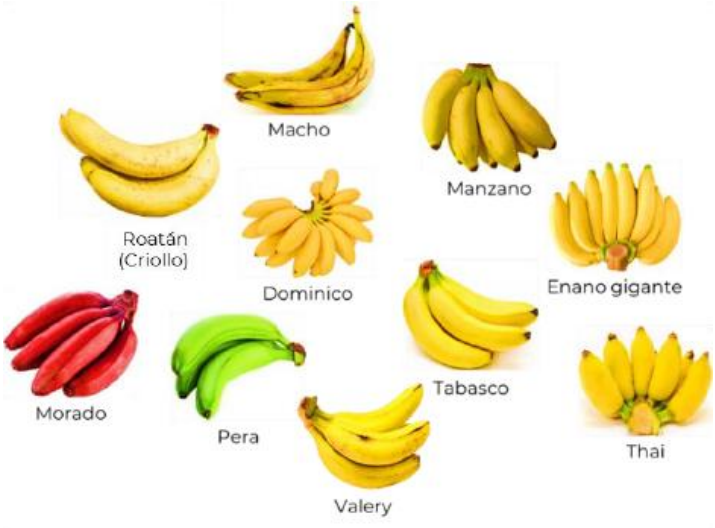
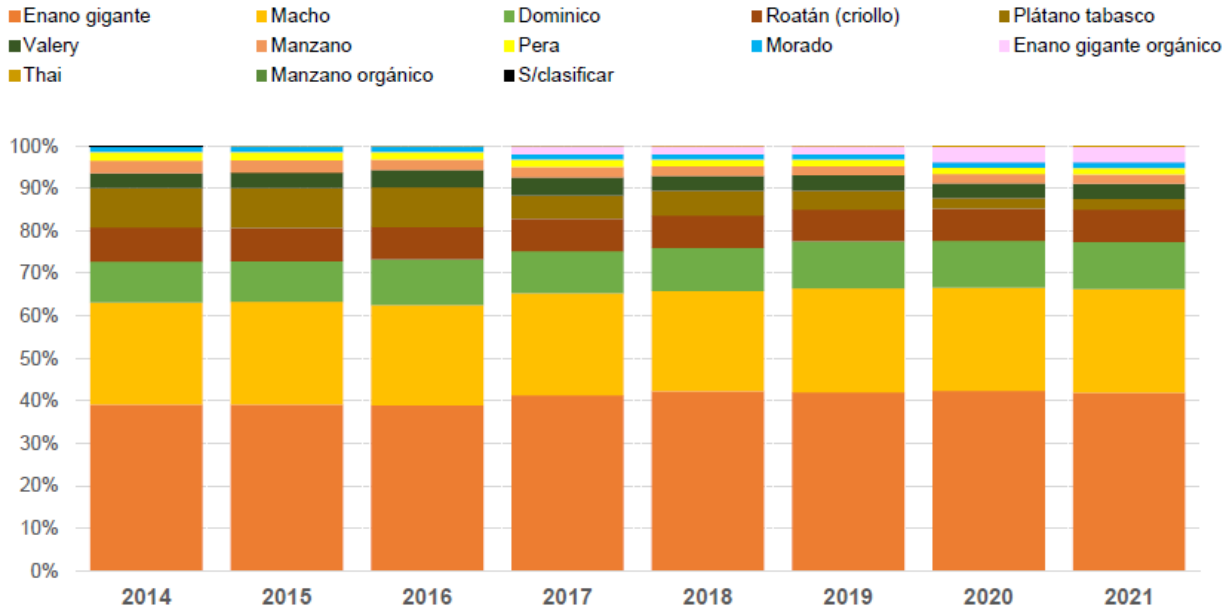


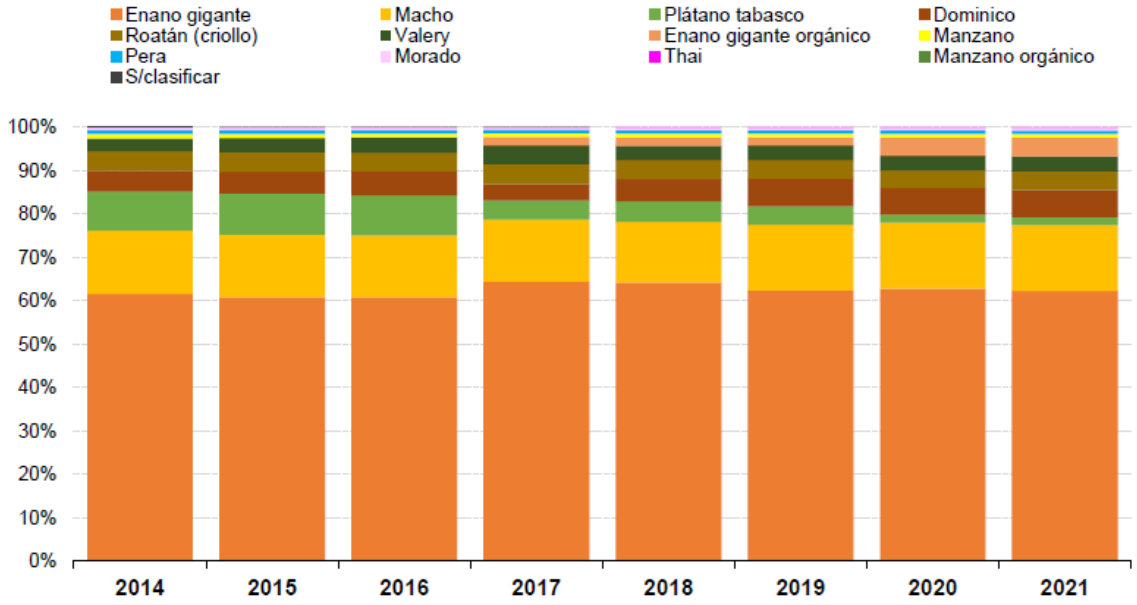
Figura 7. Variedades de plátanos que se cultivan en México 2021. Fuente: SIAP, 2022 [48]

Desde 2014, la variedad de plátano enano gigante ha sido la más importante en términos económicos, ya que cuenta con la mayor área de cultivo, representando el 39.0% y experimentando un crecimiento del 13.6% en el periodo de 2014 a 2021 [49]. En cuanto al volumen de producción, esta variedad representó el 61.6% al inicio del periodo mencionado y ha experimentado un incremento del 13.1%.

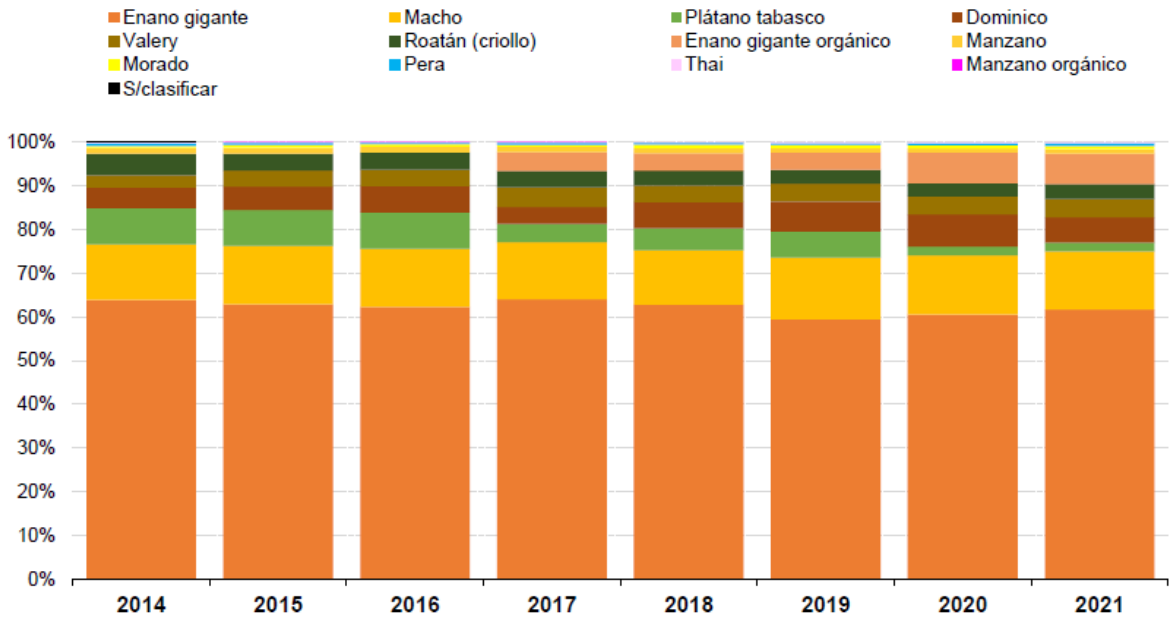
Además, cada año contribuye en promedio con más del 60% del valor de la producción nacional de plátano, según se muestra en las Gráfica 6 a la Gráfica 8.



Gráfica 6. Histórico de la participación de la superficie sembrada por variedades de plátano. Fuente: SIAP, 2022 [49]..

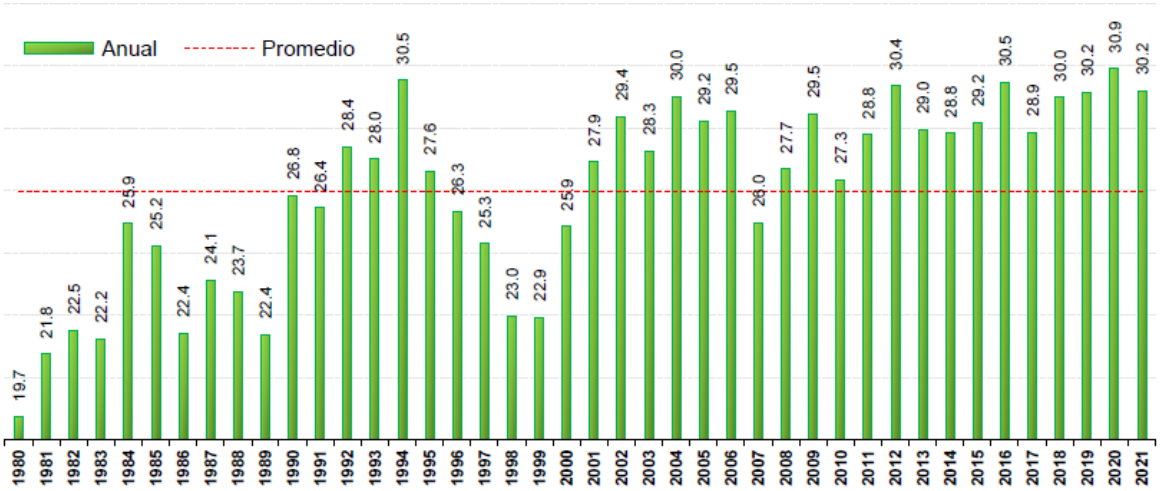


Gráfica 7. Histórico de la participación del volumen producido por variedades de plátano. Fuente: SIAP, 2022 [49].



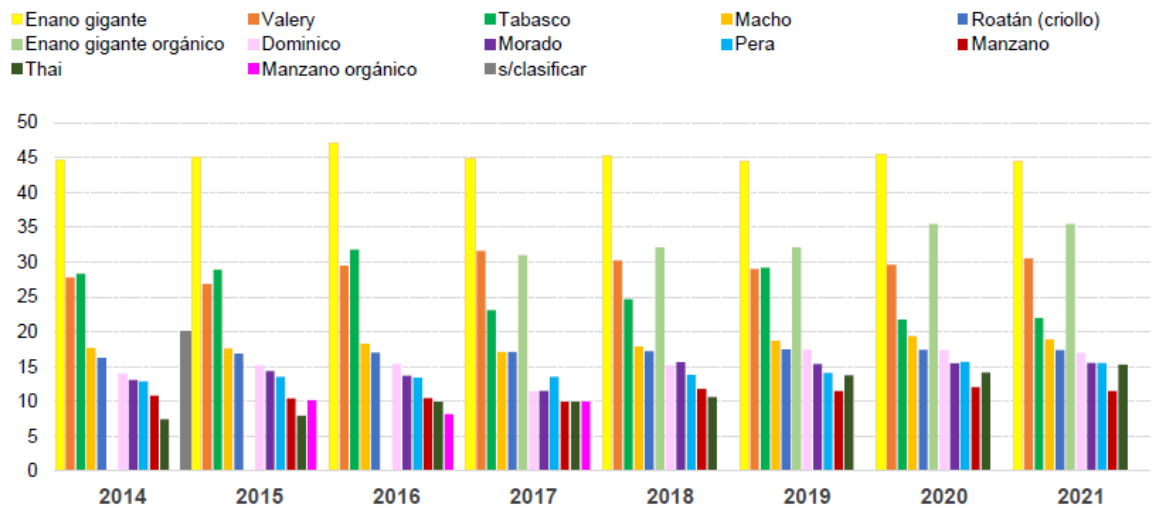
Gráfica 8. Histórico de la participación del valor de la producción por variedades de plátano. Fuente: SIAP, 2022 [49].

De 1980 al 2021, el rendimiento nacional promedio incrementó 53%, al pasar de 19.7 toneladas por hectárea a 30.2 toneladas por hectárea [49]. Sin embargo, se han registrado variaciones de esta variable a lo largo del periodo mencionado como se observa en la Gráfica 9.



Gráfica 9. Histórico del rendimiento anual de plátano en México (toneladas/hectárea). Fuente: SIAP, 2022.

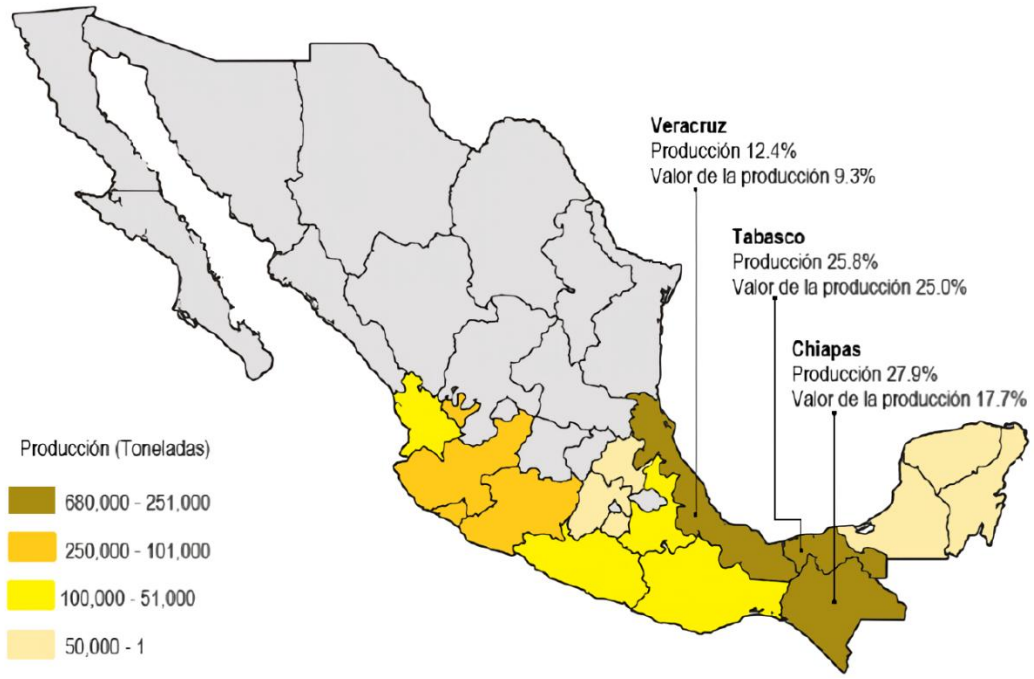
La variedad enano gigante muestra el rendimiento más alto, con una relación de toneladas por hectárea que es un 47% superior al promedio nacional de las diferentes especies, como se observa en la Gráfica 10 [49].



Gráfica 10. Histórico del rendimiento anual por variedad de plátano (toneladas/hectárea). Fuente: SIAP, 2022 [49].

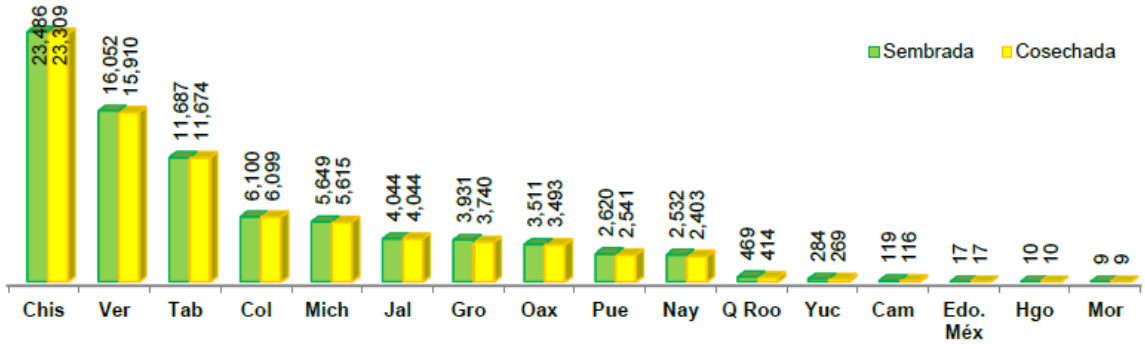
Durante el año 2021, se registró la producción de plátano en diversos estados ubicados a lo largo de la costa del Pacífico, desde Nayarit hasta Chiapas, así como en la península de Yucatán y en la región del Golfo de México, específicamente en

Veracruz. Además, también se reportó producción en los estados de Puebla, Estado de México, Hidalgo y Morelos, como se muestra en el Mapa 1.

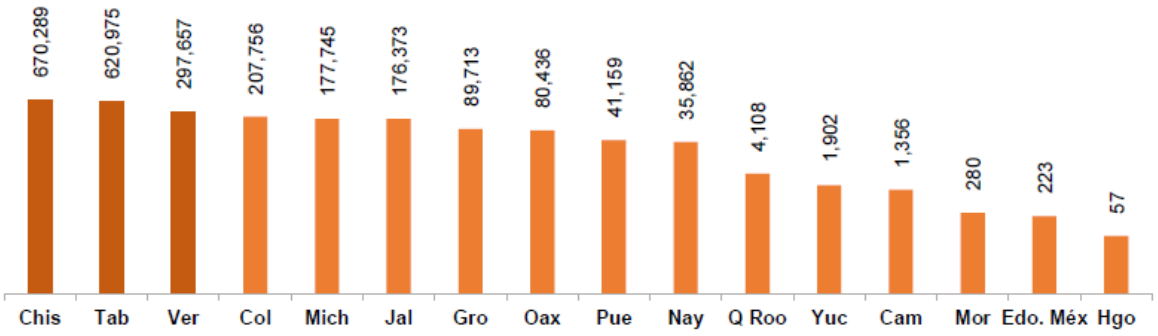


Mapa 1. Estados productores de plátano en México 2021. Fuente: SIAP, 2022 [49].

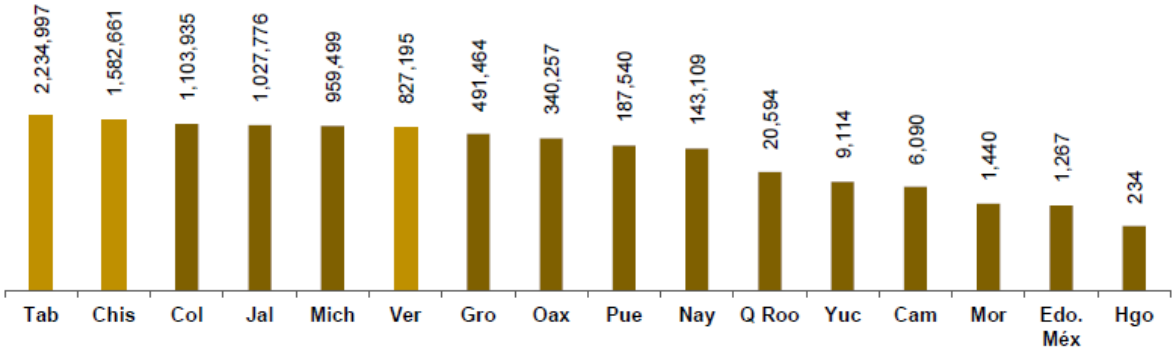
Aunque si bien hay 16 entidades que se dedican al cultivo de plátano, la producción a nivel nacional se concentra principalmente en tres estados: Chiapas, Tabasco y Veracruz. Estos tres estados representan el 63.6% de la superficie sembrada, el 66.0% del volumen total producido y el 52.0% del valor de la producción de este cultivo, como se muestra en la Gráfica 11 a la Gráfica 14.



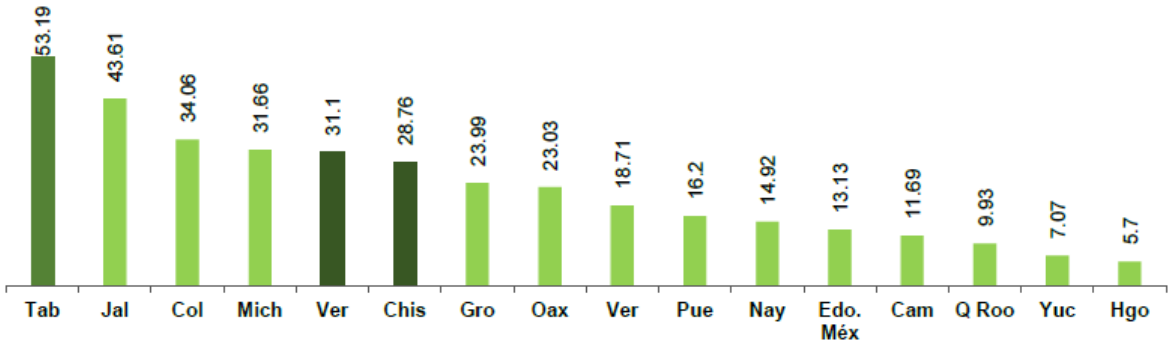
Gráfica 11. Superficie sembrada y cosechada por estado 2021 (hectáreas). Fuente: SIAP, 2022 [49].



Gráfica 12. Producción por estado 2021 (toneladas). Fuente: SIAP, 2022 [49]..



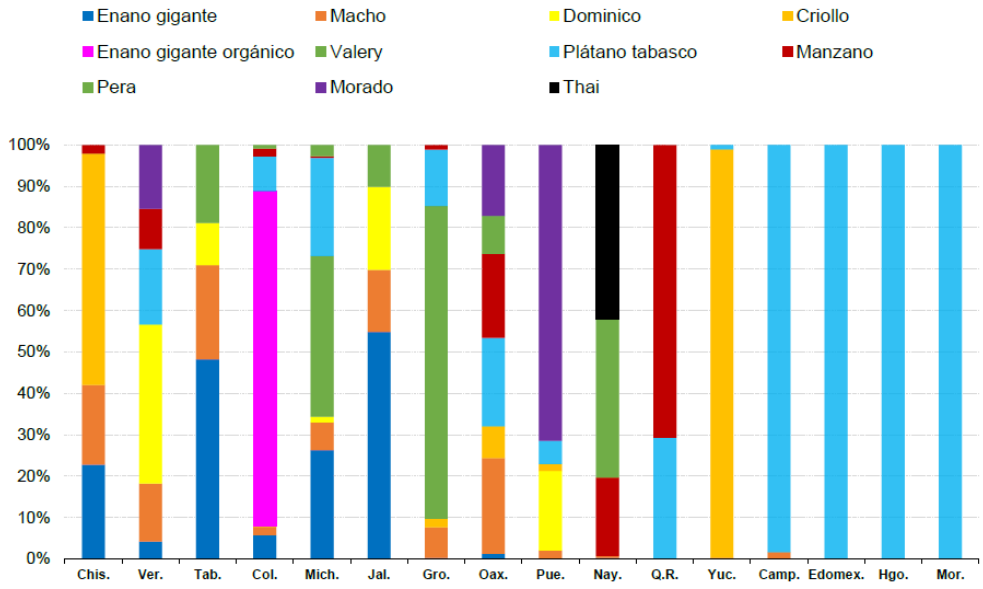
Gráfica 13. Valor de la producción por estado 2021 (miles de pesos). Fuente: SIAP, 2022 [49].



Gráfica 14. Rendimiento por estado 2021 (toneladas/hectárea). Fuente: SIAP, 2022 [49].

El estado de Chiapas es el principal productor de plátano criollo (roatán) con el 88.0% de la superficie sembrada, también destaca en el cultivo de enano gigante con un 35.9%, y de macho, con un 30.4%. Por otro lado, Veracruz es líder en la

producción de la variedad dominico, abarcando el 74.0% de la superficie sembrada, también sobresale en el cultivo de plátano tabasco con un 35.0% y de la variedad morado con un 29.6%. Por último, en el estado de Tabasco se siembra principalmente enano gigante (25.4%), macho (12.0%) y valery (9.9%), como se muestra en la Gráfica 15.



Gráfica 15. Porcentaje estatal de la superficie sembrada por variedad de plátano 2021. Fuente: SIAP, 2022.

6.5.5 Producción a nivel estatal Oaxaca

El estado de Oaxaca se encuentra en el suroeste del territorio mexicano y limita al norte con Veracruz y Puebla, al sur con el océano Pacífico, al este con Chiapas y al oeste con Guerrero, ocupa el quinto lugar en extensión a nivel nacional, pero en términos de densidad demográfica, se mantiene por debajo del promedio nacional [51].

Figura 8. Escudo de armas del estado de Oaxaca. Fuente: Gobierno del estado de Oaxaca [51]

El clima varía significativamente a lo largo de sus diferentes zonas. Oaxaca es uno de los estados más montañosos de México debido a la convergencia de la sierra Madre Oriental, la Sierra Madre del Sur y la Sierra Atravesada. Las áreas montañosas tienen temperaturas bajas, mientras que las regiones como el istmo, la cañada (particularmente Cuicatlán) y la costa tienen un clima cálido; el río Papaloapan es el principal cuerpo de agua en la región y recibe afluentes del Río Tomellín y del Río Santo Domingo [51].

Tradicionalmente, el Estado está dividido en siete regiones, las cuales son: el Valle, la Sierra, la Costa, la Cañada, las Mixtecas Alta y Baja, el Papaloapan y el Istmo. Estas regiones se encuentran representadas en su escudo de armas como 7 estrellas como se muestra en la Figura 8. Anteriormente, se consideraban también como regiones la Chinantla, la Zona Trique, la Mixe, la Chontalpa, el Rincón, la Providencia, el Bule y la Montaña [51].

La división política actual del Estado es la más complicada del país, ya que está formada por ocho regiones geográficas y culturales, con 570 municipios divididos en 30 distritos rentísticos que albergan a poco más de 11 mil comunidades. Las regiones son: Cañada, Costa, Istmo, Mixteca, Papaloapan, Sierra Sur, Sierra Norte y Valles Centrales como se muestra en él Mapa 2 [51].

Mapa 2. Mapa del estado de Oaxaca y sus regiones Fuente: Oaxaca, gobierno del estado de Oaxaca (2023) https://www.oaxaca.gob.mx/regiones/

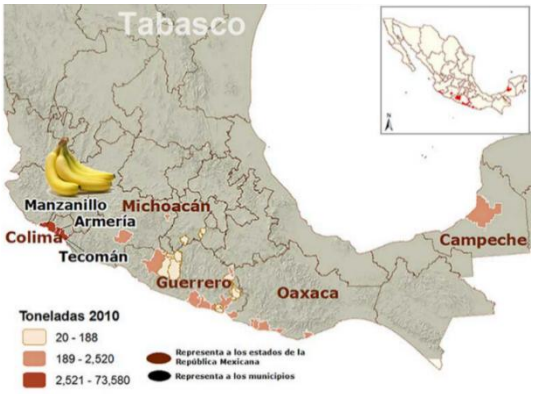
El nombre del estado proviene de la denominación náhuatl Huāxyacac impuesta por los conquistadores Aztecas en el siglo XV en el momento de su incorporación al imperio Tenochca. Huāxin significa en español huaje, planta común en la región de los valles centrales, yacatl significa literalmente “nariz”, pero se traduce mejor como “punta” y el sufijo locativo c, “lugar de”, dando así el significado de "El lugar en la punta del guaje”. Su nombre, en las lenguas binnizá (zapoteca) y ñusabi (mixteco) es Lulaa o Ñuhundua respectivamente, y significan “en la punta del guaje” o “en la punta de la nariz del guaje” [51].

El cultivo de plátano en el estado de Oaxaca en el período Junio-Octubre de 2008 tuvo una producción de 13,516.0 ton, siendo la superficie promedio sembrada de este cultivo de 3,322 ha, mientras que la superficie cosechada fue de 2,851 ha. El costo de producción de plátano en promedio es de $5,500.00/ha; los jornaleros utilizados en el proceso de producción son de 13 a 15 jornaleros/ha, generándose un total de 46,508 jornaleros anuales en promedio en la totalidad de la superficie. El valor de la producción es de aproximadamente de $22,084,500.00 pesos [52].

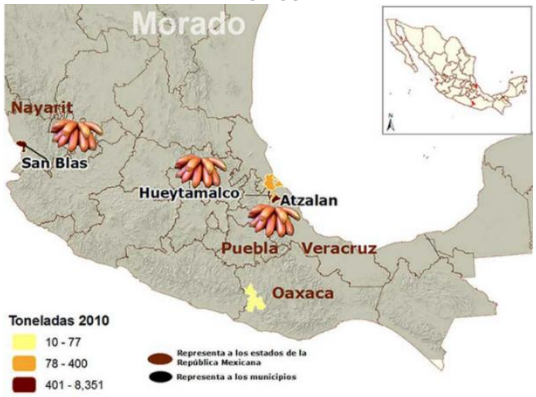
En la Gráfica 15 mostrada en la sección 6.3.4 se puede observar las variedades de plátano cultivadas en el estado de Oaxaca, en las que tenemos el plátano morado, Valery, manzano, plátano tabasco, criollo, macho y enano gigante. Destacando que el estado de Oaxaca es uno de los estados donde se tiene una mayor variedad de especies de plátano cosechada. La distribución de las diferentes variedades cultivadas de plátano se muestra en la Figura 9 (ver Mapa 3 al Mapa 8).

Mapa 3. Producción de plátano macho en México.

Mapa 4. Producción de plátano enano gigante en México.

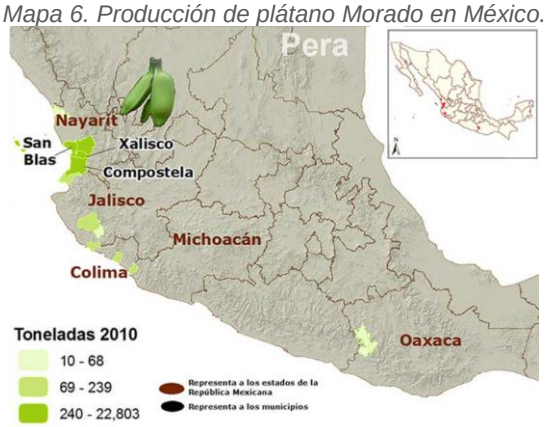


Mapa 5. Producción de plátano Tabasco en México.



Mapa 6. Producción de plátano Morado en México.

Mapa 7. Producción de plátano Manzano en México extraído de.



Mapa 8. Producción de plátano Pera en México.

Figura 9. Variedades de plátano producidas en México que se cultivan en el estado de Oaxaca. Fuente: Programa Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria, Comite Estatal De Sanidad Vegetal De Oaxaca [52].

El destino de la producción de plátano de las regiones de la costa y la mixteca es el mercado local principalmente, en cambio en la región de Tuxtepec, el destino de la producción es la central de abastos de Guadalajara y Puebla, principalmente [52].

6.6 Cáscara de Musa x Paradisiaca o plátano Tabasco

La cáscara de Musa x Paradisiaca o plátano tabasco se clasifica como biomasa lignocelulósica. Los materiales lignocelulósicos, incluyendo los productos de origen agrícola y forestal, están constituidos por tres polímeros estructurales: celulosa, hemicelulosa y lignina, y una serie de compuestos de bajo peso molecular solubles en agua (fracción hidrosoluble) o solventes orgánicos (los denominados extraíbles), también presentan pequeños contenidos de proteína y sales minerales. La celulosa es el componente mayoritario sobre un 50%, seguida de la lignina alrededor de un 20% y de la hemicelulosa alrededor de un 15% [53].

El contenido total de compuestos fenólicos en la cáscara de plátano de la variedad Musa acuminata Colla AAA varía de 0.9 a 3 g/100 g en base seca [44]. Someya et al en el año 2002 identificaron la galocatequina en concentraciones de 160 mg/100 g en base seca, siendo este compuesto al que se le relaciona la capacidad antioxidante de la cáscara [44]. La cáscara de plátano maduro también contiene otros compuestos tales como las antocianinas (delinidina y cianidina) y catecolaminas [45]. En estado inmaduro (verde), el plátano posee una alta concentración de almidón (70%) [46] a comparación de la fruta en estado maduro; este almidón se degrada a una pequeña porción de monosacáridos mientras que el resto del almidón se degrada a sacarosa [47]. La cáscara de plátano también tiene un alto contenido de fibra dietética (50 g/100g) por lo que es una buena fuente de fibra. Se ha determinado que la maduración del plátano muestra un impacto positivo en la composición de fibra de la cáscara, compuesta principalmente de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina [48].

Lignocelulosa

La lignocelulosa es el principal componente de la pared celular de las plantas, y una de las fuentes de carbono renovable más prometedora para solucionar los actuales problemas energéticos. Su principal desventaja, es la falta de tecnología

de bajo costo que puedan remover la lignina e hidrolizar la hemicelulosa a azúcares fermentables, para reducir la cristalinidad de la celulosa y liberar la glucosa, que es el nutriente principal de los microorganismos, para que de este modo puedan actuar con efectividad sobre la biomasa [54].

Composición de la lignocelulosa

Los residuos lignocelulósicos, tienen un porcentaje en peso de composición generalmente de 48% C, 6% H y 45% O, y el resto de material orgánico, aunque esta composición varía según los factores medioambientales [54]. El material lignocelulósico se divide en cinco grupos: maderas duras, maderas blandas, residuos agrícolas, biomasa herbácea y residuos celulósicos. La lignocelulosa está compuesta por polisacáridos, lignina y material orgánico los cuales se describen a continuación.

- **Polisacáridos**. Conforma del 60-80% del material lignocelulósico. Este componente hace referencia a la celulosa y a la hemicelulosa que son hidrocarbonos de alto peso molecular [55]

    - **Celulosa**. Es un polímero de alto peso molecular ($C_6H_{10}O_5$), lineal y polidisperso, que compone las paredes celulares de las plantas. Está compuesto de moléculas de β-D-Glucosa unidos por enlaces glucosídicos β-1,4, que forman largas cadenas lineales, las cuales son unidas por puentes de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals [56]. Los enlaces de hidrógeno son los responsables de la alta cohesión molecular de este polímero que al no tener ramificaciones permite que las cadenas se alineen de forma organizada como se muestra en la Figura 10, creando estructuras cristalinas que a su vez se unen a estructuras amorfas, teniendo como resultado una macromolécula semicristalina 60% hidrofílica, pero insoluble en agua, por ende, altamente resistente a la hidrólisis y a la degradación enzimática [57].

- **Hemicelulosa**. Es un heteropolisacárido, que representa del 15-35% de la biomasa vegetal [58]. Está formado por monosacáridos unidos por enlaces β-14, compuesto por pentosas, hexosas, desoxihexosas, que forman una cadena lineal ramificada, lo que hace que sea amorfa y relativamente fácil de hidrolizar a sus azúcares constitutivos, que son azúcares fermentables [59].

- **Lignina**. Es un polímero tridimensional, amorfo y ramificado, como se muestra en la Figura 11, más abundante en la tierra después de los polisacáridos y un componente fundamental de la pared celular vegetal. También es considerada como un mecanismo de defensa pues su biosíntesis y deposición en las paredes celulares aumenta cuando la planta es sometida a situaciones de estrés, creando así una barrera física contra el ingreso de fitopatógenos o para evitar el crecimiento de estos; al depositarse en la pared celular dificulta la degradación enzimática [60].

- **Material orgánico**. Se refiere a las otras sustancias que están presentes en la pared celular como: grasas, ceras, alcaloides, proteínas, fenoles simples y complejos, azúcares simples, pectinas, mucílagos, gomas, resinas, terpenos, etc., que pueden estar involucrados en la actividad metabólica o solo aportar propiedades físicas [61].

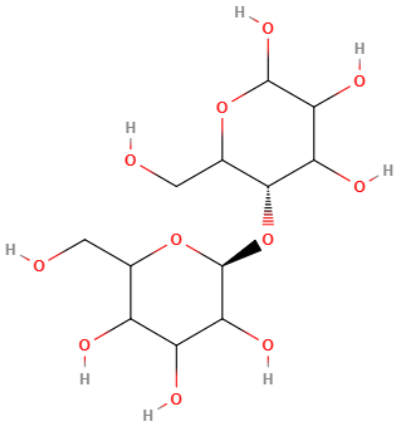


Figura 10. Estructura molecular de la celulosa. Fuente: Compositional analysis of some renewable biofuels, American Laboratory [62]

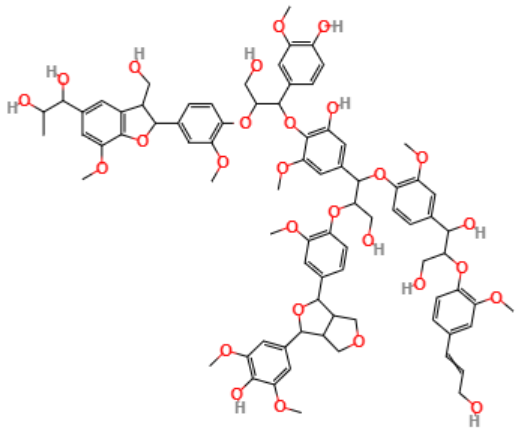


Figura 11. Estructura molecular de la lignina. Fuente: Compositional analysis of some renewable biofuels, American Laboratory [62]

Los rangos de las temperaturas para el inicio de la pirólisis de diferentes compuestos de biomasa son: para la hemicelulosa: 150-350 °C; la celulosa 275-350 °C; y para la lignina: 250-500 °C [63], como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Principales productos gaseosos y condiciones de proceso de pirólisis de los componentes principales de la biomasa. Fuente: Integrated processes of anaerobic digestion and pyrolysis for higher bioenergy recovery from lignocellulosic biomass: A brief review [64]

Componentes de la biomasa	**Proporción en la biomasa (%)**	**Temperatura de descomposición (°C)**	**Energía de activación Ea (kJ/mol)**	**Principal producto gaseoso**
Celulosa	40-50	250-380	145-285	CO
Hemicelulosa	20-40	200-380	90-125	CO_2
Lignina	10-25	180-900	30-39	H_2, CH_4

La cantidad y calidad de los productos generados en el proceso de pirólisis están influenciados por diversos factores, que incluyen la temperatura de reacción, la presión, la velocidad de calentamiento y el tiempo de permanencia. En condiciones de baja temperatura y largos tiempos de permanencia, se promueve la formación de residuos sólidos con contenido de carbono, mientras que altas temperaturas y tiempos de permanencia cortos son más propicios para obtener mayores cantidades de productos líquidos

Además, temperaturas elevadas junto con tiempos de permanencia extendidos favorecen la producción de productos gaseosos no condensables, lo cual es atribuible a la ocurrencia de reacciones secundarias [63].

El producto gaseoso o gas de pirólisis está compuesto por CO_2, CO, CH_4, H_2 e hidrocarburos de bajo peso molecular en proporciones variables, estos compuestos químicos poseen masas molares inferiores a 100 g/mol [63]. El gas de pirólisis tiene un alto valor calorífico debido a la presencia de metano y otros hidrocarburos de bajo peso molecular.

La hemicelulosa con mayor contenido de grupos funcionales carboxilo, representa un mayor rendimiento de CO_2, la celulosa muestra un mayor rendimiento de CO, principalmente atribuido al craqueo térmico de los grupos carbonilo y carboxilo con una mayor presencia de grupos funcionales metoxilo en anillos aromáticos, y finalmente la pirólisis de lignina contribuye al aumento de gases de H_2 y CH_4 [63]. En la Figura 12 se muestran las reacciones involucradas en la pirolisis de la celulosa [65]

$$(C_6H_{15}O_5)_n + calor \rightarrow nCH_4 + \ 3_nH_2O + \ 2_nCO + \ 3_nC$$

$$(C_6H_{15}O_5)_n + calor \ \rightarrow 2.5_nCH_4 + 1,5_nCO_2 + \ 2_nCO$$

$$(C_6H_{15}O_5)_n + calor \ \rightarrow 2,5_nCH_4 + 2,5_nCO_2 + nC$$

$$(C_6H_{15}O_5)_n + calor \rightarrow 5nH_2 + 1{,}5nCO_2 + 2nCO + 2{,}5nC$$

Figura 12. Reacciones involucradas en la pirolisis de la celulosa [65].

6.7 Microscopia Raman

Figura 13. Chandrasekhara Venkata Raman

La espectroscopía Raman es una técnica fotónica de alta resolución que permite obtener en un breve lapso de tiempo información detallada tanto química como estructural de prácticamente cualquier material, ya sea orgánico o inorgánico, lo que facilita su identificación precisa. El análisis se basa en la observación de la luz dispersada por el material al ser irradiado con un haz de luz monocromática. Una pequeña fracción de dicha luz se dispersa inelásticamente, presentando leves variaciones en la frecuencia que son propias del material examinado e independientes de la frecuencia de la luz incidente. Esta técnica se realiza directamente sobre la muestra sin requerir ninguna preparación especial y no provoca alteraciones en la superficie del material, por lo que se considera un método no destructivo [66].

El fenómeno conocido como efecto Raman fue descrito por el físico indio Chandrasekhara Venkata Raman (Figura 13) en el año 1928, lo que le supuso la obtención del premio Nobel de física en 1930. Este científico dio nombre al fenómeno inelástico de dispersión de la luz que permite el estudio de rotaciones y vibraciones moleculares [67].

El análisis mediante espectroscopía Raman se fundamenta en dirigir un haz de luz monocromática con una frecuencia V_0 sobre una muestra cuyas características moleculares se desean determinar, y posteriormente examinar la luz dispersada por dicha muestra. La mayor parte de la luz dispersada presenta la misma frecuencia que la luz incidente, pero una fracción muy reducida experimenta un cambio en la frecuencia, resultado de la interacción de la luz con la materia. La luz que conserva la frecuencia V_0 del haz incidente se denomina dispersión Rayleigh, y no proporciona información relevante acerca de la composición de la muestra, la luz dispersada que presenta variaciones en su frecuencia respecto a la radiación

incidente es la que ofrece datos sobre la estructura molecular de la muestra, y se conoce como dispersión Raman. Las nuevas frecuencias $+V_r$ y $-V_r$, son las frecuencias Raman, características de la naturaleza química y el estado físico de la muestra e independientes de la radiación incidente [66].

Las variaciones de frecuencia observadas en el fenómeno de dispersión Raman son equivalentes a cambios en la energía. Los iones y átomos al estar químicamente enlazados para formar moléculas y redes cristalinas se encuentran en constante movimiento vibracional y rotacional; estas oscilaciones se producen a frecuencias específicas, determinadas por la masa de las partículas implicadas y la dinámica de los enlaces entre ellas. Cada uno de los movimientos vibracionales y rotacionales de la molécula está asociado con un valor particular de energía molecular [66].

Un diagrama energético en el que cada estado de energía se representa por la línea horizontal se muestra en la Figura 14.

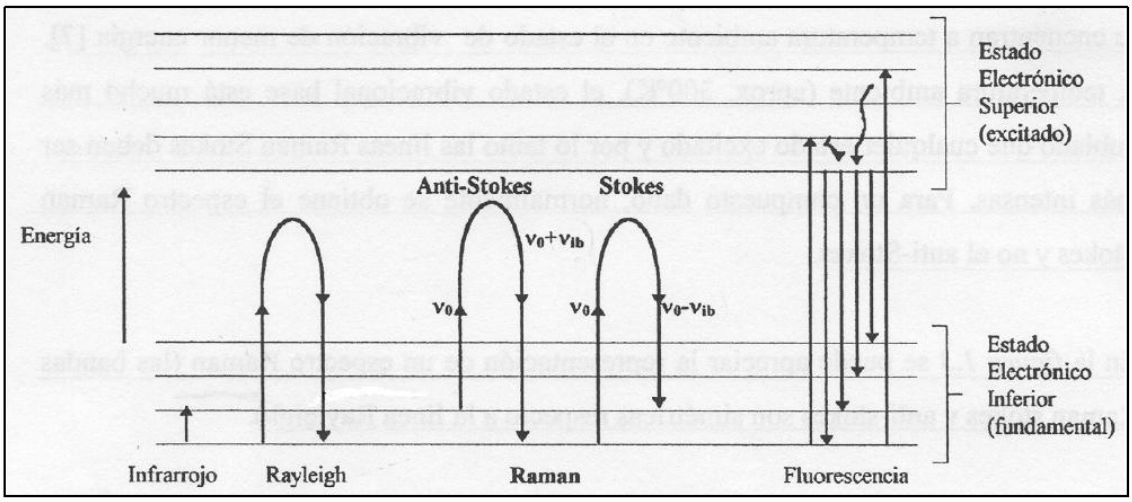


Figura 14. Diagrama energético en el que las lineas horizontales representan distintos estados vibracionales y en el que se muestran las transiciones entre estados energéticos para diferentes interacciones luz-materia. Fuente: Procesado y optimización de espectros Raman mediante técnicas de lógica difusa: Aplicación a la identificación de materiales pictóricos [66].

Cuando los fotones del haz de luz incidente, con energía $h\nu_0$ (donde h es la constante de Planck), significativamente mayor que la diferencia de energía entre dos niveles vibracionales o rotacionales de la molécula, interactúan con esta, la

mayoría atraviesan la molécula sin alteración; sin embargo, una pequeña fracción es dispersada (aproximadamente 1 fotón dispersado por cada 10^{11} fotones incidentes). Este fenómeno puede interpretarse del siguiente modo: el fotón incidente eleva temporalmente la molécula a un estado energético vibracional o rotacional superior no permitido, del cual la molécula desciende rápidamente a uno de los niveles permitidos, emitiendo un fotón en el proceso. La frecuencia de este fotón emitido dependerá de la variación energética que experimente la molécula durante su transición [66].

Se pueden identificar los siguientes escenarios:

- Si como resultado de la interacción entre el fotón y la molécula, el fotón dispersado conserva la misma frecuencia que el incidente, se considera que la colisión es elástica, ya que ni el fotón ni la molécula experimentan cambios en su estado energético. En este caso, la molécula retorna a su nivel energético original y el fotón dispersado mantiene la misma frecuencia v_0 que el incidente, lo que se conoce como dispersión Rayleigh [66].
- Si el resultado de la interacción fotón-molécula es un fotón dispersado a una frecuencia distinta de la incidente, se dice que el choque es inelástico (existe transferencia de energía entre la molécula y el fotón); en este caso pueden darse dos fenómenos:
    - Si el fotón dispersado tiene una frecuencia inferior a la del incidente, esto indica una transferencia de energía del fotón a la molécula. La molécula, después de alcanzar temporalmente un estado energético no permitido, regresa a un nivel permitido más alto que el original. En consecuencia, el fotón es dispersado con una frecuencia de v_0-v_r, lo que genera el fenómeno conocido como dispersión Raman Stokes [66].
    - Si el fotón dispersado posee una frecuencia mayor que la del incidente, esto indica una transferencia de energía desde la molécula hacia el fotón. Esto implica que, antes de la colisión, la molécula no se encontraba en su estado vibracional fundamental, sino en uno de

mayor energía. Tras la interacción, la molécula retorna a ese estado y el fotón es dispersado con una frecuencia de v_0+v_r, generando la dispersión Raman anti-Stokes [66].

Cada material presenta un conjunto específico de valores de v_r, los cuales dependen de su estructura poliatómica y de la naturaleza de los enlaces químicos que lo componen.

El espectro Raman representa los fenómenos observados mediante la relación entre la intensidad óptica dispersada y el número de onda normalizado υ. Este número de onda es proporcional a la frecuencia e inversamente proporcional a la longitud de onda, y se expresa en cm^{-1} [66].

$$\upsilon = \frac{v}{c} = \frac{1}{\lambda}[cm^{-1}]$$

Como se muestra en la Figura 15, el espectro Raman se compone de una banda principal llamada Rayleigh y dos series de bandas secundarias conocidas como Raman Stokes y anti-Stokes. Estas bandas se encuentran distribuidas simétricamente a ambos lados de la banda Rayleigh.

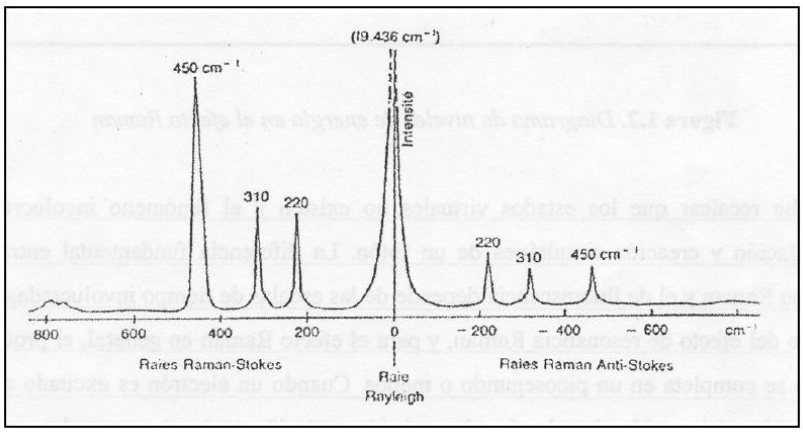


Figura 15. Bandas Rayleigh, Raman Stokes y Raman anti-Stokes. Fuente:

El desplazamiento de las frecuencias Raman en relación con la frecuencia incidente v0 es independiente de esta última, como se observa en la Figura 16. Por esta razón dicho desplazamiento se usa como coordenada horizontal al representar

los espectros Raman, colocando el centro de la banda Rayleigh en el origen del eje. El eje de abscisas muestra la diferencia entre la frecuencia Raman y la frecuencia de excitación del láser, normalizada en función de la velocidad de la luz [66]:

$$\upsilon = \frac{(\nu - \nu_0)}{c} \; [cm^{-1}]$$

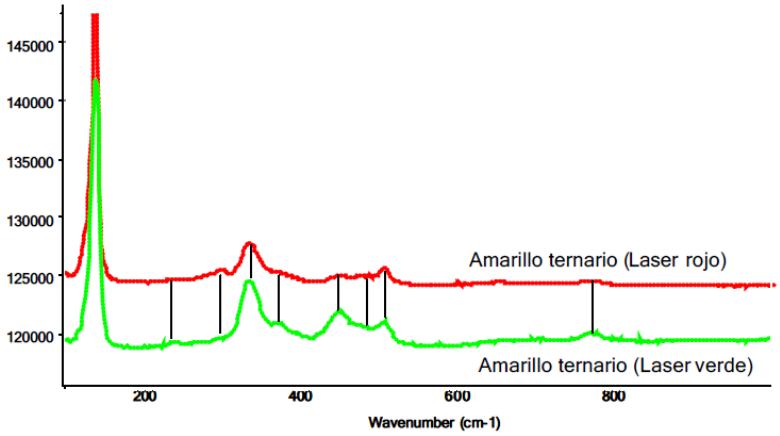


Figura 16. Espectros del amarillo ternario obtenidos con láser rojo y láser verde en los que vemos que las bandas Raman aparecen en las mismas posiciones frecuenciales en ambos casos. Fuente:

A temperatura ambiente, según la ley de distribución de Maxwell-Boltzmann, el 99% de las moléculas se encuentra en su estado vibracional más bajo. Esto hace que la probabilidad de dispersión Raman Stokes sea mucho mayor que la de anti-Stokes. Como resultado, la intensidad de la dispersión Stokes es aproximadamente 100 veces mayor que la de anti-Stokes [68]. Debido a esta diferencia de intensidades, es habitual enfocarse únicamente en la dispersión Stokes y representarla en el lado positivo del eje como se muestra en la Figura 17.

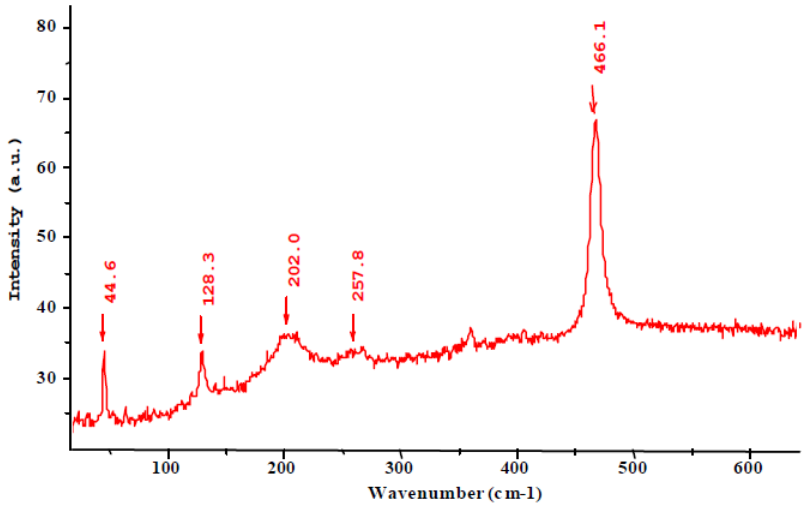


Figura 17. Espectro Raman habitual, compuesto por las bandas Raman Stokes. Fuente:

La naturaleza química del material analizado junto con el efecto Raman en algunas ocasiones puede provocar fluorescencia, un fenómeno de absorción de luz que puede ocultar las bandas Raman. En estos casos, puede ser útil medir el espectro anti-Stokes, ya que, aunque el efecto Raman es más débil a esas frecuencias, también lo es la fluorescencia, lo que permite que aparezcan bandas Raman en el espectro anti-Stokes que permanecen ocultas en la parte Stokes [68].

La fluorescencia es otro fenómeno que ocurre cuando un haz de luz incide sobre un material, aunque no tiene relación directa con el proceso de dispersión Raman. En la fluorescencia la molécula absorbe por completo el fotón incidente, lo que provoca su transición hacia un estado electrónico excitado, tras un cierto período de tiempo conocido como vida media la molécula regresa a un estado electrónico inferior y re-emite radiación generalmente con una longitud de onda mayor que la del fotón absorbido [69]. En el efecto Raman el fotón nunca es absorbido en su totalidad, en lugar de ello interactúa con la molécula induciendo una transición electrónica.

La diferencia esencial entre ambos procesos radica en que la fluorescencia puede ser suprimida introduciendo especies que a través de colisiones reduzcan la energía de la molécula excitada antes de que esta emita radiación. Sin embargo, en la dispersión Raman este proceso no es posible, ya que la molécula nunca alcanza

un estado excitado estable en el que pueda permanecer el tiempo suficiente para que se produzca una colisión inhibidora [69]. El estado que la molécula adquiere durante la dispersión Raman es un estado virtual, que no necesariamente coincide con ninguno de los estados propios de la molécula.

En la Figura 18 se presenta el diagrama de Jablonski, donde se ilustran las transiciones energéticas mencionadas, mostrando la diferencia entre los procesos fluorescentes y la dispersión Raman [69].

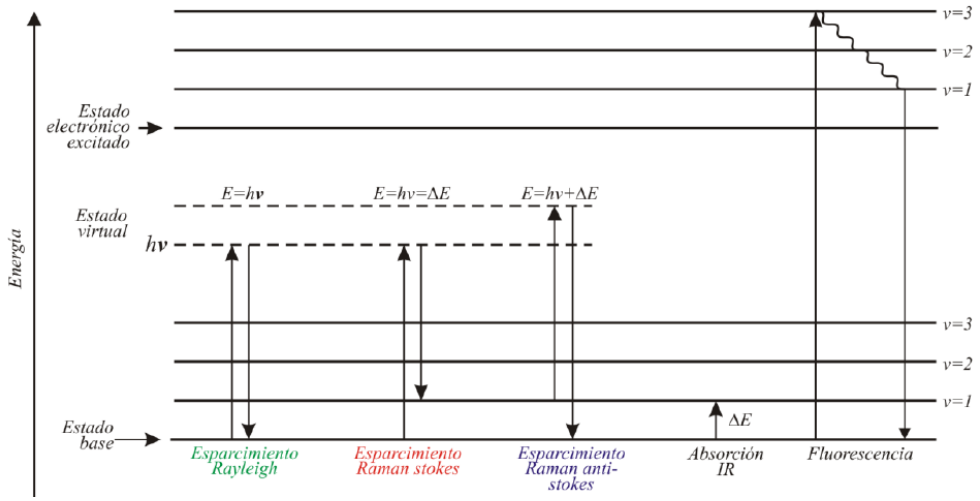


Figura 18. Saltos energéticos de un electrón. En su decaimiento se emiten tres fotones dando lugar al esparcimiento Rayleigh, anti-Stokes y Stokes. Fuente: Espectroscopia Raman y sus aplicaciones [69].

VII. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

En este trabajo de investigación se pretende producir hidrógeno por medio de la fotopirólisis (pirolisis flash) utilizando una lámpara de xenón a partir de la cáscara de *Musa x paradisiaca.* Las etapas en las que se divide el trabajo son: 1. Adecuación de la cáscara de *Musa x paradisiaca* para ser utilizada en el proceso de fotopirólisis, 2. Diseño del reactor en donde se realizara la fotopirólisis, 3. Diseño experimental del proceso de fotopirólisis variando el tiempo de exposición a la luz de la lámpara flash de xenón asi como disparando a distintas velocidades, 4. Caracterización de los gases obtenidos en la fotopirólisis por medio de la cromatografía de gases para confirmar la presencia de hidrógeno.

7.1 Adecuación de la cáscara de Musa x paradisiaca

Para poder realizar el proceso de fotopirólisis es necesario que la muestra de cáscara de plátano tenga la menor cantidad de agua posible, para conseguirlo la cáscara de plátano se sometió a un proceso de secado en un horno, hasta llegar a un peso constante, indicando que la mayoría del agua ya fue evaporada.

Durante el proceso de secado fueron tomadas pequeñas muestras de aproximadamente 1cm de cáscara de plátano, colocadas en una pequeña charola de papel aluminio, primero se programó el horno para que llegara a una temperatura de 80 °C y se mantuviera constante durante el tiempo que durara el secado, como se muestra en la Gráfica 16, para el caso 1.

Gráfica 16. Rampa de calentamiento del horno. Elaboración propia.

Una vez que el peso de la cáscara de Musa x paradisiaca fuera constante, se dio por terminado el proceso de secado para pasar a la siguiente etapa del proceso.

7.2 Diseño del sistema

7.2.1 Reactor

El reactor del sistema de fotopirólisis para contener la biomasa fue diseñado en base a las características del espacio de trabajo, adaptándose a las condiciones de éste. Teniendo en cuenta las limitaciones por el equipo requerido, ya que al manejar un gas es necesario contar con muchas especificaciones en cuanto al almacenamiento y durante el proceso fototérmico a los diversos factores que está expuesto.

Para poder realizar la fotopirólisis es necesario que la materia orgánica este en contacto con la luz de la lámpara, para que ésta junto con el calor pueda transmitirse de manera rápida, por lo tanto, se buscó la manera de contar con un

recipiente (reactor) que pudiera cerrarse y abrirse de manera fácil, reemplazando su tapa con vidrio para facilitar el paso de la luz de la lámpara.

El reactor que contiene la biomasa debe de sellar para evitar la fuga de gases, además de resistir la temperatura a la que será sometido durante el proceso. En este trabajo se utilizó un recipiente pequeño para fines prácticos y de material resistente.

Al someterse a un proceso fototérmico, se necesita que el material del reactor seleccionado sea resistente a las temperaturas que el proceso de fotopirólisis pueda alcanzar, de esta manera se optó por usar un recipiente de acero inoxidable como contenedor de la biomasa, ya que cumple con la propiedad de soportar altas temperaturas, como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Límites de temperatura aproximados que soportan algunos tipos de metales. Fuente: Corrosión de Aceros Inoxidables y Galvanizados de Alta Resistencia, como alternativa a los Aceros Convencionales de Pretensado. [70]

Metal	Límite de Temperatura (°C)
Acero Inoxidable 304	Hasta 925 °C en servicios continuos. Hasta 1150 °C en condiciones específicas.
Acero Inoxidable 310	Resiste temperaturas de hasta 1150 °C.
Acero Inoxidable 316L	Buen comportamiento hasta 840 °C.
Acero al Carbono	420 °C a 860 °C: No recomendado debido a la sensibilidad a las precipitaciones de carburos de cromo.

En la Figura 19 se muestra el reactor utilizado en este trabajo de investigación, el cual es un recipiente prefabricado de acero inoxidable 316L.

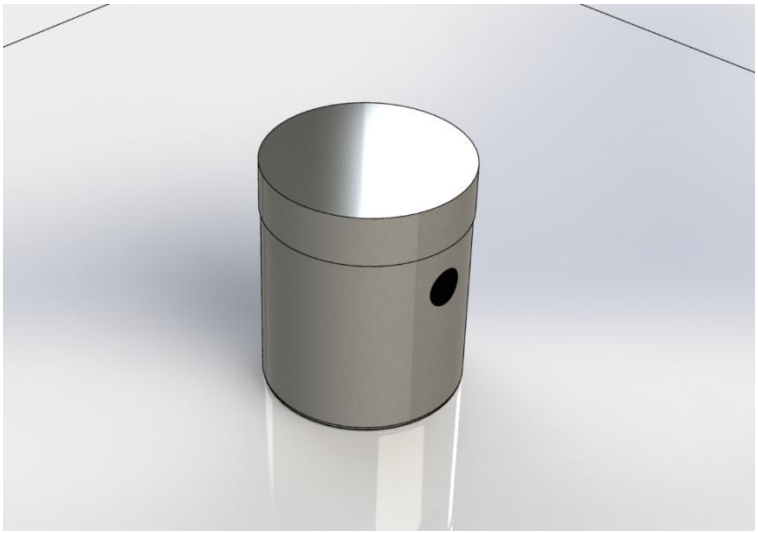


Figura 19. Modelo del reactor

El acero inoxidable 316L posee las siguientes características [70]:

- Durabilidad y Resistencia. El acero inoxidable es conocido por su alta resistencia a la corrosión y su durabilidad. Esto asegura que el reactor pueda soportar condiciones químicas y térmicas extremas durante su funcionamiento sin degradarse con el tiempo.
- Tamaño y Espacio. Los recipientes prefabricados de acero inoxidable están disponibles en una variedad de tamaños estándar. Elegir uno que se ajuste al tamaño requerido para el proyecto permite que su forma compacta ahorra espacio en el área de trabajo.
- Costo y Disponibilidad. El acero inoxidable es un material ampliamente utilizado en la industria, lo que facilita su adquisición y reduce los costos en comparación con la fabricación personalizada.
- Compatibilidad con Procesos Químicos. El acero inoxidable es resistente a una amplia gama de productos químicos y solventes, lo que lo hace adecuado para diversas aplicaciones de reacción y procesamiento, es fácil de limpiar y mantener en condiciones higiénicas, esto es crucial para aplicaciones en las que se requiere un alto nivel de esterilidad, como en procesos químicos o farmacéuticos.

7.2.2 Lámpara

El proceso fototérmico necesita de una fuente de luz que alcance altas temperaturas para poder realizar el proceso de fotopirólisis, en primera instancia se optó por revisar las lámparas disponibles en el mercado, las cuales se muestran en la Tabla 9.

Dentro de los tipos de lámparas que se encontraron en el mercado se tienen las lámparas de LED (Light Emitting Diode o Diodo Emisor de Luz), siendo éstas altamente eficientes en términos de consumo de energía convirtiendo la mayor parte de la electricidad en luz, minimizando las pérdidas por calor; sin embargo, para este proyecto este tipo de lámparas no serán de utilidad puesto que su objetivo es producir el menor calor posible.

Otro tipo de lámpara en el mercado son las lámparas halógenas, las cuales son una evolución de las lámparas incandescentes, el filamento de tungsteno en estas lámparas se calienta a aproximadamente 3000 °C; este tipo de lámparas están siendo paulatinamente reemplazadas por lámparas de luz LED complicando su accesibilidad.

Tabla 9. Tipos de lámparas contempladas. Fuente: Tipos de lámparas [71]

Lámpara	Precio al publico
Excelitas CERMAX 300 W Xenón Lámpara pe300bfa	$5,358.39
PHILIPS 85415 Lámpara Delantera Xenon HID Estándar	$954.93
Reflector	$200
Foco de Halógeno de Repuesto para H-3398	$1,056

Después de comparar las opciones en el mercado, se optó por utilizar un reflector con lámpara de xenón mostrada en la Figura 20, puesto que fue más

accesible en cuanto al precio. En la Tabla 10 se pueden observar sus especificaciones,

La lámpara de xenón utilizada se caracterizó utilizando un programa en Arduino para medir la temperatura, parte de este programa se ilustra en la Figura 21, el programa en extenso se muestra en el Apéndice A. La temperatura se midió con un termopar K y el módulo Max6675, sus características se encuentran en el Apéndice B.

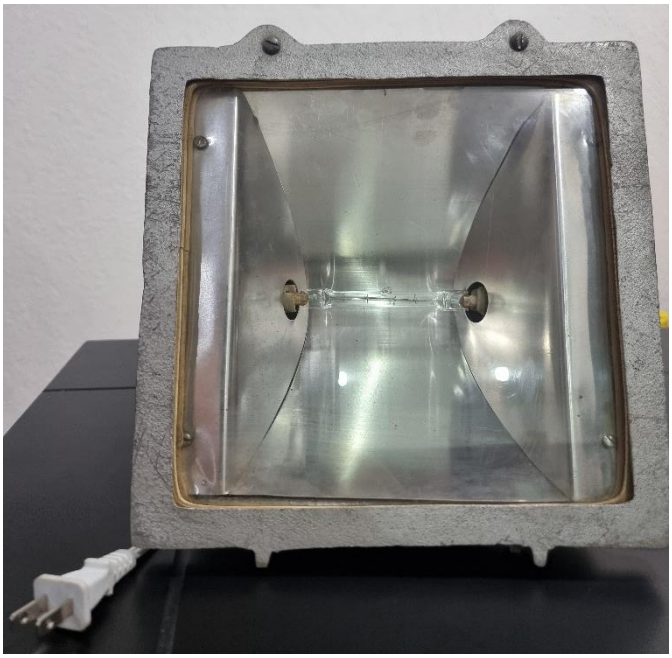


Figura 20. Lámpara

Tabla 10. Especificaciones de la lámpara de xenón utilizada. Elaboración propia.

Voltaje	120 V
Corriente	3.79 A
Frecuencia	60 Hz
Potencia	454.8 W

```
#include <SPI.h>
#include "max6675.h"
#include <BluetoothSerial.h>

BluetoothSerial BT;

const int thermoCLK = 18; // Pin SCK
const int thermoCS = 5;   // Pin CS
const int thermoDO = 19;  // Pin SO

MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    Serial.println("Termopar tipo K con MAX6675");
    BT.begin("ESP32_LED_Control"); // Nombre del dispositivo Bluetooth
}

```

Figura 21. Parte del código con el que se realizó la caracterización.

7.2.3 Cámara de madera

A medida que se avanzó en el diseño del sistema, se observó que una de las complicaciones para el posicionamiento de la lámpara era su tamaño y peso; ya que después de encenderla se calienta lo que hace complicada su manipulación, lo que podría causar algún incidente durante el proceso experimental.

De esta manera, se diseñó una cámara que pudiera dar soporte a la lámpara para que se mantuviera en una posición fija (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**); dentro de la cámara se introduce el reactor con la muestra, concentrándose el calor en un área específica ya que esto facilita la contención la luz en su interior.

Dentro de los materiales disponibles para elaborar la cámara se optó por el que fuera accesible y resistente a las condiciones que será expuesto durante el proceso de fotopirólisis. La madera tipo MDF (tablero de fibra de densidad media) es un material compuesto fabricado a partir de fibras de madera y resinas sintéticas. Este tipo de material tiene un punto de ignición de aproximadamente 400 °C estando expuesto a una llama directa, aunado a esto el precio del material es accesible, además disponible en el mercado. De esta manera se optó por realizar la cámara con este material, para poder facilitar el manejo de la lámpara y el reactor.

Figura 22. Cámara de madera con puertas cerradas. Elaboración propia.

7.3 Diseño experimental del proceso de fotopirólisis

7.3.1 Fotopirólisis

El proceso mediante el cual se buscó obtener una mezcla de gases donde se encuentre inmerso el hidrógeno es la fotopirólisis, la cual consiste en la descomposición de la biomasa mediante la acción de la luz, mediante la ruptura de enlaces químicos debido a la absorción de energía luminosa, para lograrlo, se posiciono la lámpara de modo que la luz puedo llegar directamente al interior del reactor donde se colocó la biomasa; una vez terminado el proceso el gas resultante será analizado mediante microscopia Raman

7.4 Caracterización

7.4.1 Módulo C. MICRORAMAN

La espectroscopía Raman se explica a partir del fenómeno ilustrado en la Figura 23. Cuando un haz de luz monocromática incide sobre una sustancia y atraviesa su estructura, una porción de esa luz se dispersa en diferentes direcciones debido a la interacción con las moléculas presentes, este proceso se conoce como dispersión. La nube de electrones que rodea el núcleo de una molécula es susceptible de ser polarizada, es decir, deformada, por la acción de un campo eléctrico, si se aplica un campo eléctrico oscilante, como el generado por un haz de luz, la nube electrónica se deforma de

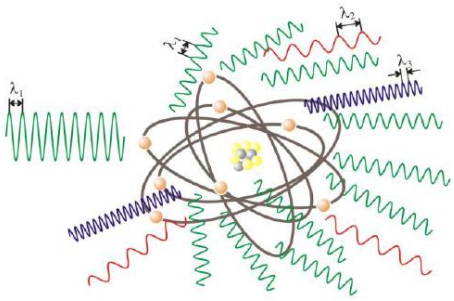


Figura 23. Esparcimiento Raman incide una longitud de onda y se emiten otras longitudes de onda λ2 y λ3. Fuente: Espectroscopia Raman y sus aplicaciones [69].

manera oscilatoria siguiendo la frecuencia del haz incidente [69]. Esta oscilación da lugar a un dipolo oscilante, el cual emite luz nuevamente pero en distintas direcciones manteniendo la misma frecuencia de la luz original, este fenómeno se conoce como dispersión Rayleigh y es el responsable del color blanco de las nubes cuando son iluminadas por la luz solar, cuando un haz de luz, que es una onda electromagnética, interactúa con un átomo o molécula, provoca que la nube de electrones se desplace, lo que a su vez genera la emisión de ondas con la misma frecuencia. Este proceso es identificado como dispersión Rayleigh (Figura 23) y explica la re-emisión de luz en múltiples direcciones con la misma frecuencia de la fuente original [69].

En las moléculas no solo ocurren transiciones electrónicas (cambios de los electrones entre diferentes niveles orbitales) también experimentan movimientos vibratorios y rotacionales estos movimientos están asociados a transiciones energéticas adicionales. Existe una pequeña probabilidad de que la radiación incidente transfiera parte de su energía a alguno de los niveles vibracionales o rotacionales de las moléculas que componen la sustancia, como consecuencia la frecuencia de la radiación dispersada será inferior a la del haz original, como se ilustra en la Figura 23. De manera análoga es posible que una molécula en un estado excitado a nivel vibracional o rotacional transfiera energía adicional a la radiación incidente, lo que provoca que la radiación dispersada tenga una frecuencia superior a la del haz de entrada [69].

Este fenómeno da lugar a tres tipos de líneas en la radiación dispersada [69]:

- Una línea correspondiente a la dispersión Rayleigh, donde la longitud de onda se mantiene sin cambios (representada en verde).
- Dos líneas Raman:
    - La línea Stokes, con frecuencia más baja que la de la luz incidente (en rojo).
    - La línea anti-Stokes, con frecuencia superior (en azul).

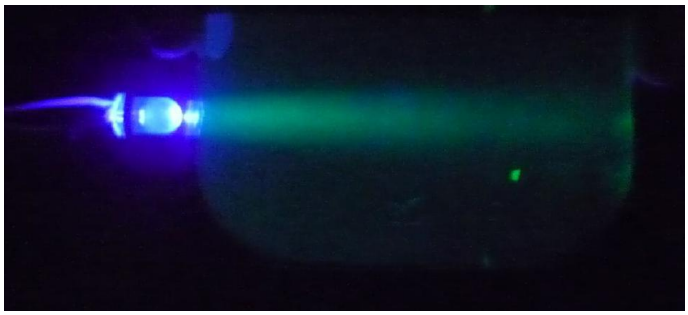


Figura 24. Esparcimiento Raman. Un haz incidente violeta y un haz emergente verde, resultado de las vibraciones moleculares de la sustancia iluminada (agua carbonatada y azúcar).

Estas líneas Raman se representan en las Figura 23 y Figura 24 en comparación con la dispersión Rayleigh, son de intensidad extremadamente baja, representando solo 1/10,000 de la intensidad total dispersada. La señal Raman es significativamente menos intensa que la de la luz incidente. En la Figura 23 se ilustra cómo un haz de luz violeta incide sobre la muestra y emerge con una longitud de onda mayor (en verde), resultado de la interacción entre la luz incidente y las vibraciones y rotaciones de las moléculas, la absorción ocurre cuando la frecuencia de la radiación incidente coincide con la frecuencia vibracional de la molécula, provocando que esta pase a un estado excitado electrónico [69].

El equipo usado para caracterizar las muestras fue Olympus BX41 Horiba Jobin Yvon Raman Division perteneciente al Instituto de Física “Ing. Luis Rivera Terrazas”, ubicado en el laboratorio central EMA1 mostrado en la Figura 25.

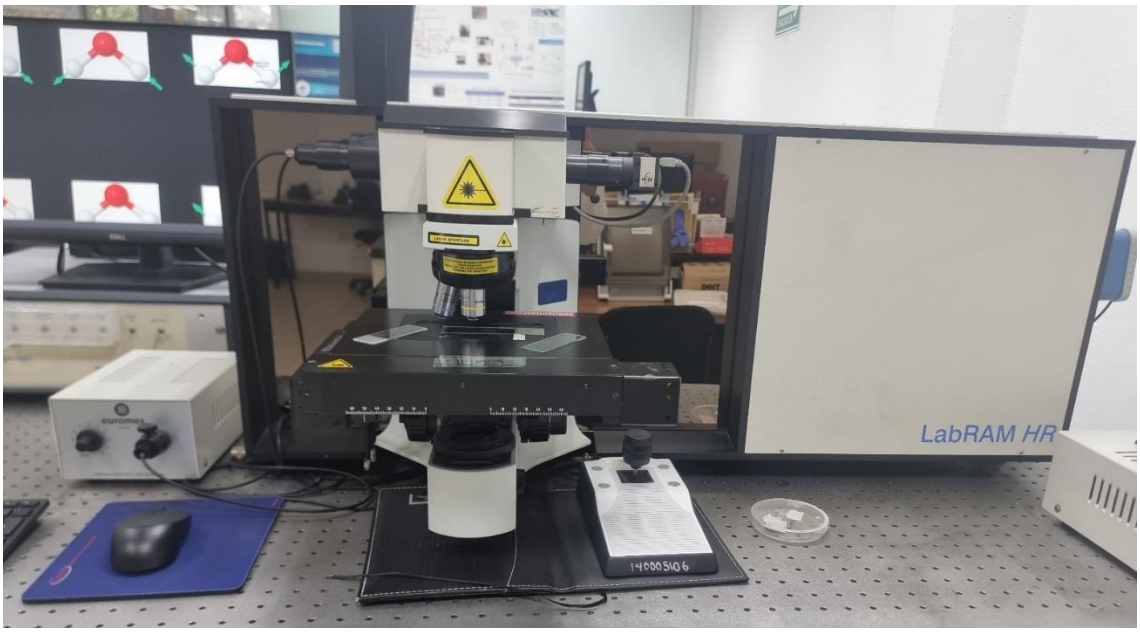


Figura 25. Equipo de Espectroscopía de Micro Raman (Horiba-LabRAM) ubicado en el laboratorio central EMA 1

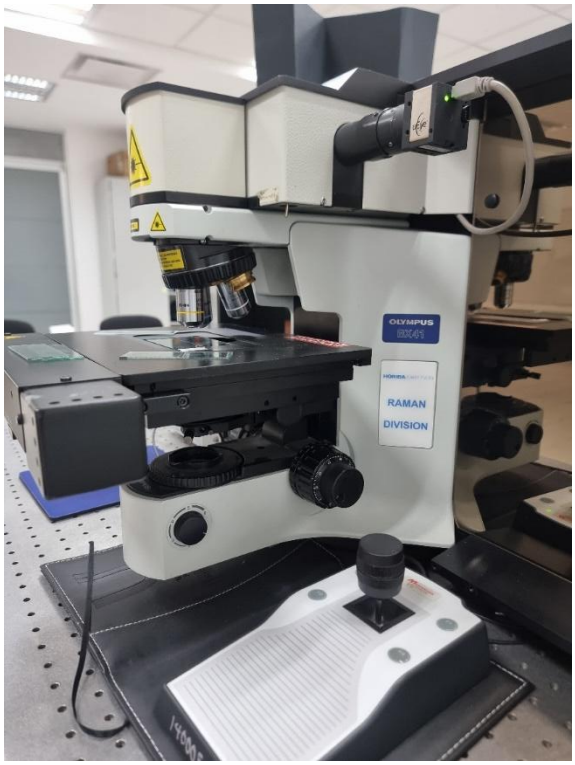


Figura 26. Equipo de Espectroscopía de Micro Raman (Horiba-LabRAM) ubicado en el laboratorio central EMA 1

La combinación de los espectrómetros Raman de Horiba Jobin Yvon con el microscopio Olympus BX41 (Figura 26) permite realizar análisis químicos detallados a nivel microscópico. Las características principales de esta configuración son [72]:

Espectrómetro Raman Horiba Jobin Yvon:

- Excitaciones Láser: Generalmente, se utilizan láseres de 632 nm y 785 nm, aunque pueden incorporarse otras longitudes de onda según las necesidades específicas.
- Rejillas de Difracción: Disponibles con 1800 y 600 líneas por milímetro, permitiendo una resolución espectral ajustable.
- Pinhole Confocal: Ajustable desde 0 hasta 1500 µm, lo que mejora la resolución espacial y la capacidad de análisis en profundidad.
- Detector CCD: Utilizado para la captura de espectros con alta sensibilidad y bajo ruido.

Microscopio Olympus BX41:

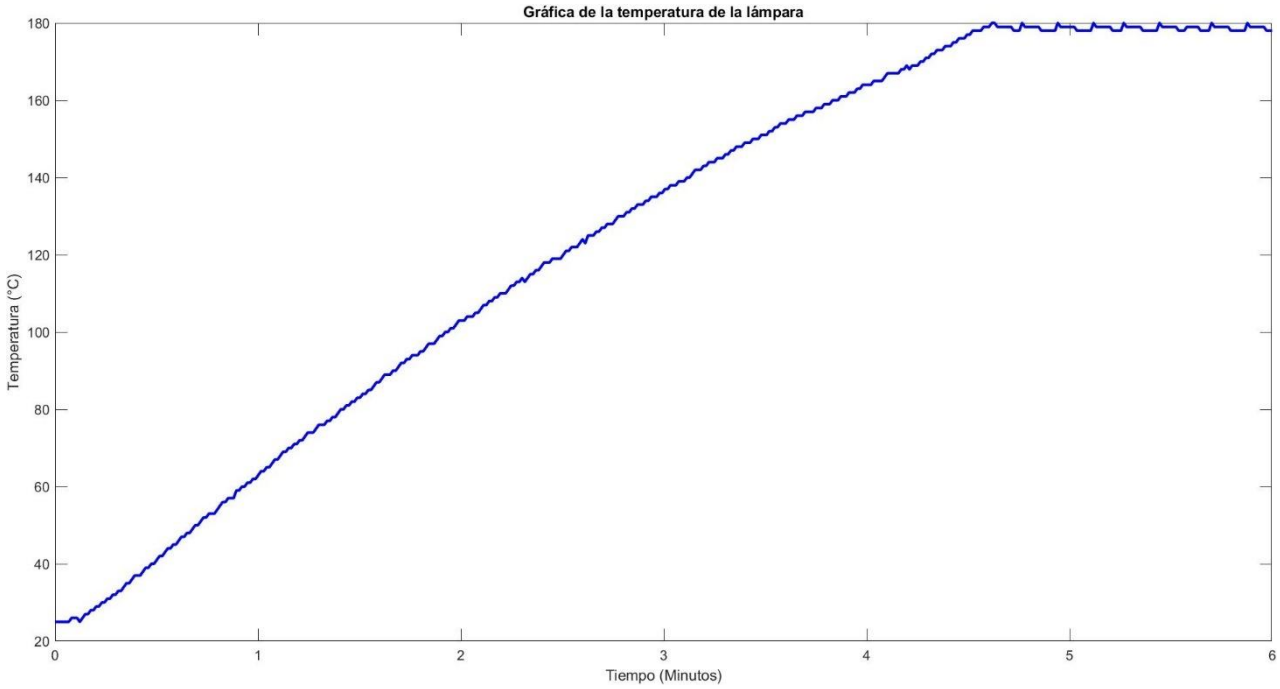
- Objetivos: Equipado con objetivos de 10x, 50x y 100x, facilitando la observación y análisis de muestras a diferentes aumentos.
- Sistema de Iluminación: Diseñado para proporcionar una iluminación uniforme y adecuada para aplicaciones de espectroscopía Raman.
- Compatibilidad: Integración fluida con sistemas de espectroscopía Raman, permitiendo un análisis con focal eficiente.

Esta configuración es ideal para aplicaciones en investigación de materiales, química, biología y otras disciplinas que requieren análisis espectroscópicos precisos a nivel microscópico [72].

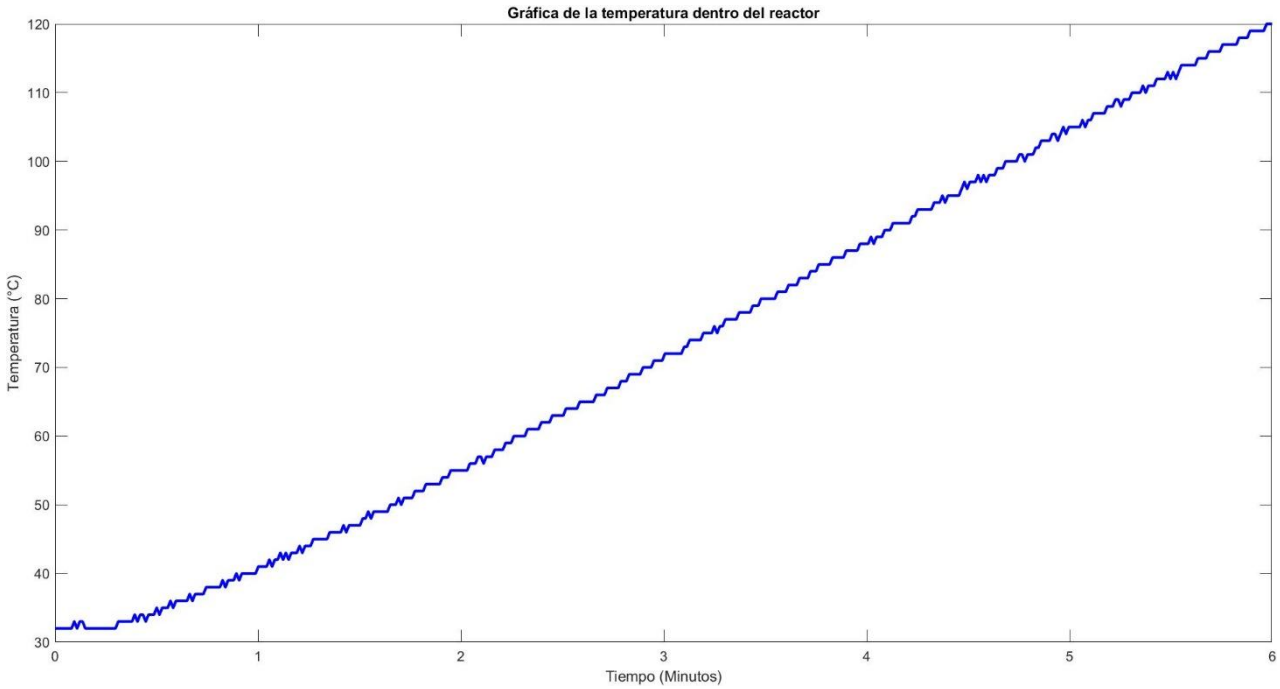
VIII. RESULTADOS

8.1 Caracterización de la lámpara

Se realizó una prueba para caracterizar la lámpara, comprobar la temperatura que podría alcanzar y el tiempo aproximado que tarda en incrementar; en la Gráfica 17 se muestra la temperatura alcanzada por la lámpara medida fuera del reactor y en la Gráfica 18 se muestra la temperatura alcanzada medida dentro del reactor.



Gráfica 17. Temperatura de la lámpara



Gráfica 18. Temperatura dentro del reactor.

Se optó por utilizar este reflector para el proyecto debido a que éste cumple con los requisitos de temperatura necesarios para calentar el reactor y así facilitar el proceso de fotopirólisis. La decisión fue tomada tras considerar que las lámparas comerciales disponibles en el mercado que cumplen con las necesidades de temperatura tienen un costo aproximado de $50000, una cifra que excede el presupuesto del proyecto y hace inviable su adquisición. Por lo tanto, el uso del reflector no solo es una solución práctica y económica, sino que también garantiza el cumplimiento de las condiciones térmicas requeridas para el experimento.

8.2 Cámara de madera

Al realizar las primeras mediciones de temperatura en la lámpara, se notó como ésta alcanzaba altas temperaturas rápidamente, haciendo difícil su manejo entre una prueba y otra, sumándole al tamaño que tiene, se buscó la manera de poder

darle un soporte para poder realizar cambios sin afectar la posición de la lámpara, al igual que contener en lo mayor posible la luz que irradia para no afectar la visión durante el proceso y concentrar el calor que emite hacia el reactor.

Para contener el reactor y poder dejar la lámpara de manera estática en una posición se diseñó y construyó una cámara de madera Figura 27, con una puerta frontal donde se introduce el contenedor de la biomasa que actúa como reactor y en la parte superior tiene una apertura por donde la lámpara quedara empotrada enfocando hacia el interior de la caja, para calentar el recipiente.

Figura 27. Cámara puertas abiertas

El sistema montado con todos los elementos se muestra en la Figura 28

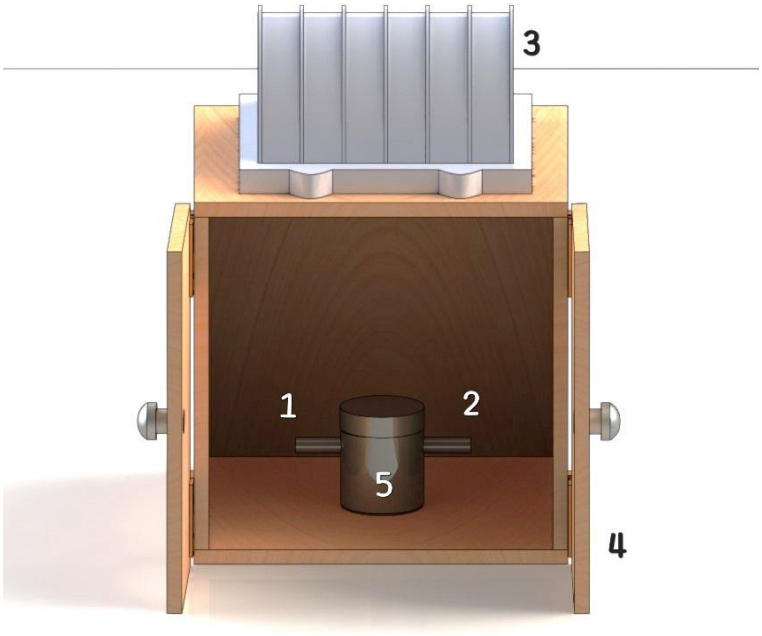


Figura 28. Sistema montado con todos los elementos

Donde:

1. Entrada de gas
2. Salida de gas
3. Lámpara
4. Cámara contenedora
5. Reactor

La muestra de cáscara seca se depositó dentro del reactor (5) donde la luz de la lámpara (3) pasará por el vidrio que tiene la tapa del recipiente calentando el recipiente y dando lugar al proceso de pirólisis, el gas entrará por el tubo (1) llenando el reactor con gas inerte para después salir por el tubo (2).

8.3 Muestra I

En esta sección se presenta un análisis del proceso que condujo al desarrollo y ensamblaje del modelo final del sistema diseñado. A lo largo del proceso de adecuación, se llevaron a cabo una serie de pruebas y evaluaciones para garantizar la eficacia, la funcionalidad y practicidad del sistema. Estas pruebas no solo se centraron en la verificación de la precisión técnica del modelo, sino también en su capacidad para cumplir con los requisitos que debe cumplir ya que será expuesto a condiciones particularmente específicas y adaptarse a posibles escenarios de aplicación.

Para poder comprobar el funcionamiento del sistema planeado, se realizó una prueba sin llegar a caracterizar el gas resultante; como primer paso se realizó el secado de la cáscara de plátano, usando un plátano tabasco mostrado en la Figura 29

Figura 29. Plátano tabasco usado para la prueba 1

Se usó una parte de la cáscara para cortarla Figura 30 en pequeños cuadros de aproximadamente 1 cm. de lado y facilitar el secado, después de programar el horno se colocaron las muestra Figura 31, y se tomaron las mediciones con intervalos de aproximadamente de 10 minutos entre una, los resultados se muestran en la Tabla 11.

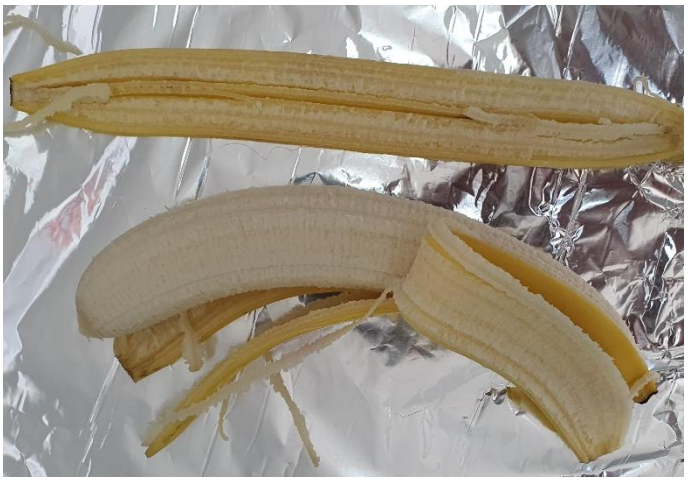


Figura 30. Cáscara de plátano Tabasco

Figura 31. Muestras en el horno

Tabla 11. Peso de la cáscara de plátano Muestra I. Elaboración propia

Muestra	Masa recipiente (g)	Masa cascara (g)	1ra revisión (g)	2da revisión (g)	3ra revisión (g)	4ta revisión (g)	Temperatura horno (°C)
MI_A	1.226	0.791	1.700	1.504	1.388	1.322	80
MI_B	1.392	1.801	2.644	2.252	1.650	1.620	80
MI_C	1.705	1.067	2.345	2.086	1.832	1.837	80

Para después trasladar el sistema al laboratorio donde se realizarían la prueba mostrado en la Figura 32 la adecuación realizada, ya que la entrada del gas se tuvo que cambiar de posición porque el almacenamiento del gas nitrógeno se encontraba del lado contrario, al momento de montar el sistema nos percatamos que la entrada del gas no embonaba con el dispensador del gas usado en el laboratorio.

Figura 32. Sistema montado sin la lámpara

El tamaño del tubo de entrada que tenía el reactor era demasiado grande para el tipo de entrada que usan en el laboratorio, es parecido a una pistola que regula el flujo de gas con su interruptor y las adecuaciones que se realizaron se

muestran en la Figura 33, donde con una manguera de látex más pequeña se intentó evitar la mayor cantidad de fuga de gas.

Figura 33. Entrada de gas nitrógeno

Una vez colocado el sistema y conectado al flujo de gas, se depositó una muestra de la cáscara de plátano seca y se cerró el recipiente, se procedió a dejar el paso del gas para que se creara la atmosfera inerte, pasando 5 minutos se pinchó la manguera de salida para que no entrara oxígeno y se cumplieran con las condiciones propicias para el experimento, se encendió la lámpara y comenzó a calentarse el reactor como se aprecia en la Figura 34.

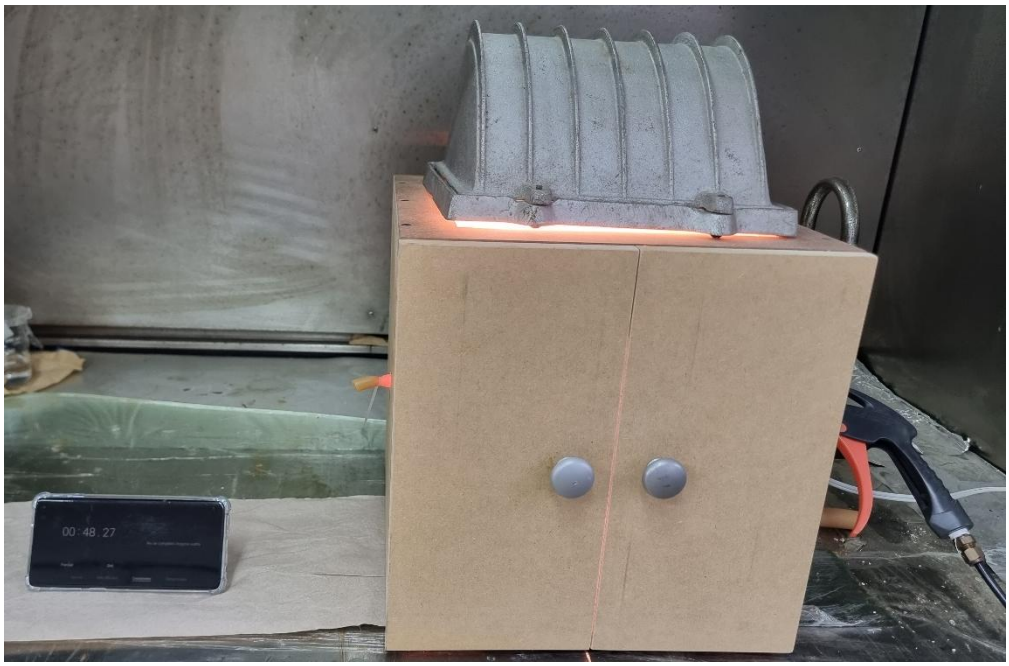


Figura 34. Prueba 1 de fotopirólisis.

La prueba duró alrededor de 50 minutos y la medición de temperatura dentro de la cámara llego a los 250°, transcurrido ese tiempo se dejó que la temperatura descendiera para que el manejo fuera más sencillo, mostrando como quedó la muestra de biomasa en la Figura 35, desafortunadamente en esta ocasión no fue posible analizar el gas resultante, en la Tabla 12 se muestran los parámetros para el proceso de pirólisis, Muestra I

Figura 35 Muestra de cascara de plátano después de la prueba 1

Tabla 12. Parámetros para el proceso de pirólisis, Muestra I. Elaboración propia

Peso cáscara a pirolizar (g)	Tiempo de flujo gas nitrógeno (min.)	Tiempo lámpara encendida (min.)	Temperatura máxima alcanzada (°C)	Muestra molida
MI_B 1.620	5	50	250	No

8.4 Muestra II

Se realizaron nuevamente los pasos de la Muestra 1, teniendo los siguientes parámetros para el tiempo de secado y temperatura, asi como el peso de las muestras enlistados en la Tabla 13.

Tabla 13. Peso de la cáscara de plátano Muestra II. Elaboración propia.

Muestra	Masa recipiente (g)	Masa Cascara (g)	1ra revisión (g)	7ª revisión (g)	Temperatura máxima alcanzada (°C)
MII_A	0.615	2.033	2.149	0.873	80
MII_B	0.595	2.063	2.218	0.867	80

Después de secar la cáscara, en esta ocasión se procedió a pasar por el mortero la muestra MII_A, para que fuera óptimo el proceso de pirólisis y la muestra 2 se quedó tal como salió del horno, posteriormente se realizó el proceso de pirólisis,

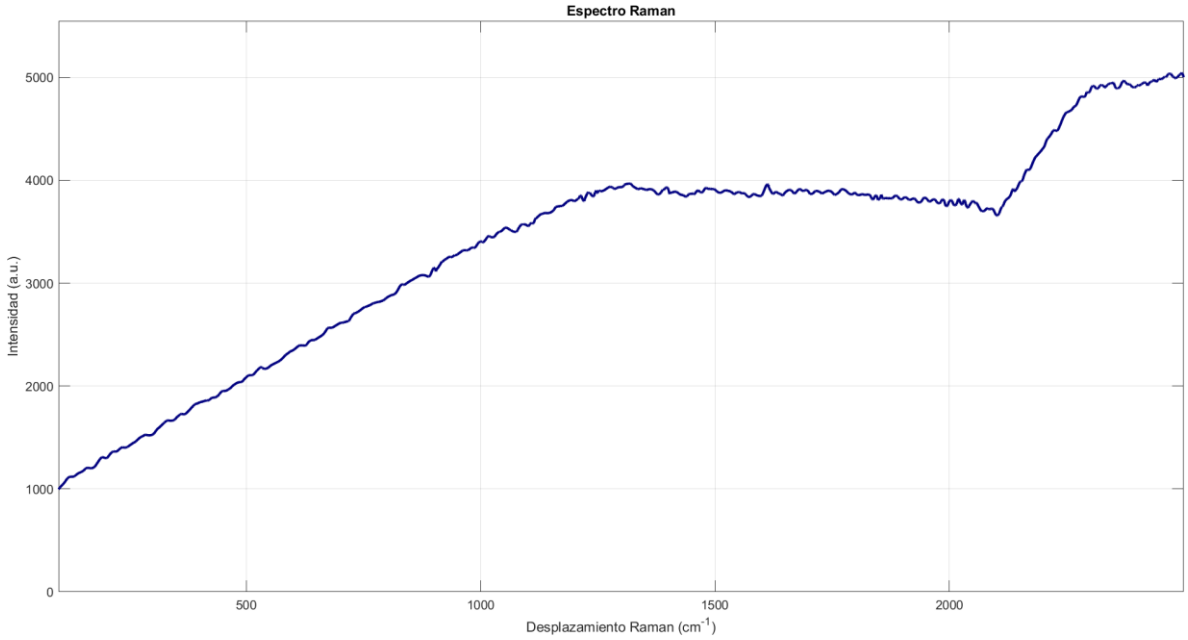
instalando el sistema de la misma manera que en el caso 1, con los siguientes parámetros Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros para el proceso de pirólisis, Muestra II Elaboración propia.

Peso cáscara a pirolizar (g)	Tiempo de flujo gas nitrógeno (min.)	Tiempo lámpara encendida (min.)	Temperatura máxima alcanzada (°C)	Muestra molida
Muestra MII_A y MII_B 1.620	5	50	210	Muestra MII_A

Terminando el proceso de pirólisis al querer posicionar el reactor para analizar el gas obtenido, nos encontramos con el inconveniente de que la altura del reactor no permitía que el láser del microscopio incidiera correctamente para realizar la caracterización.

Teniendo en cuenta que no se pudo analizar el reactor cerrado, se optó por analizar la muestra pirolizada fuera del reactor, teniendo como resultado lo siguiente, en la Gráfica 19 se muestra el espectro Raman de la Muestra MII_A.



Gráfica 19. Gráfico del espectro Raman de la muestra MII_A. Elaboración propia.

El pico más alto en 2495.61 cm^{-1} probablemente corresponde a vibraciones de enlaces triples C≡C, indicando la formación de alquinos durante la pirólisis de la cáscara de plátano. Los alquinos tienden a generar picos en la región de **2400-2500 cm^{-1}** [73], es probable que este pico corresponda a la vibración de estiramiento del enlace C≡C. Esto es común en procesos de descomposición térmica de biomasa, donde se generan compuestos insaturados a partir de la ruptura de los enlaces de biopolímeros. El entorno inerte de nitrógeno previene la oxidación, lo que permite la formación de estos enlaces insaturados [73].

La muestra MII_B fue analizada fuera del reactor, en un portaobjetos ya que se necesitaba apreciar mejor la muestra para poder ser analizada en el microRaman, que se puede apreciar en la Figura 36, 37 y 38.

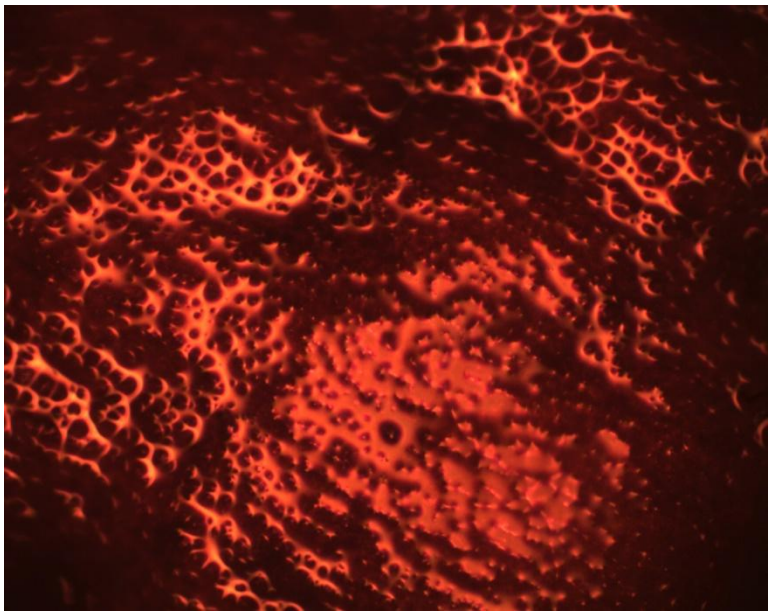


Figura 36. Vista de la muestra MII_B bajo el microscopio Raman a 10x

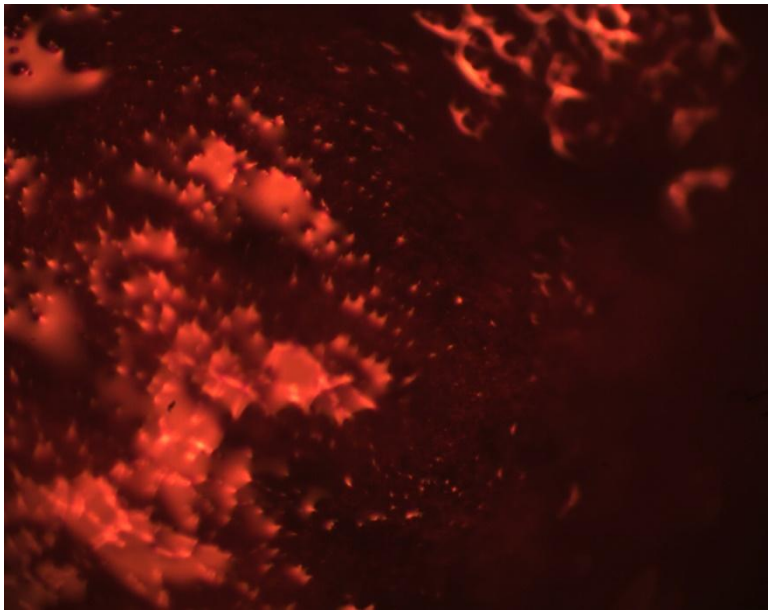


Figura 37. Vista de la muestra MII_B bajo el microscopio Raman 10x

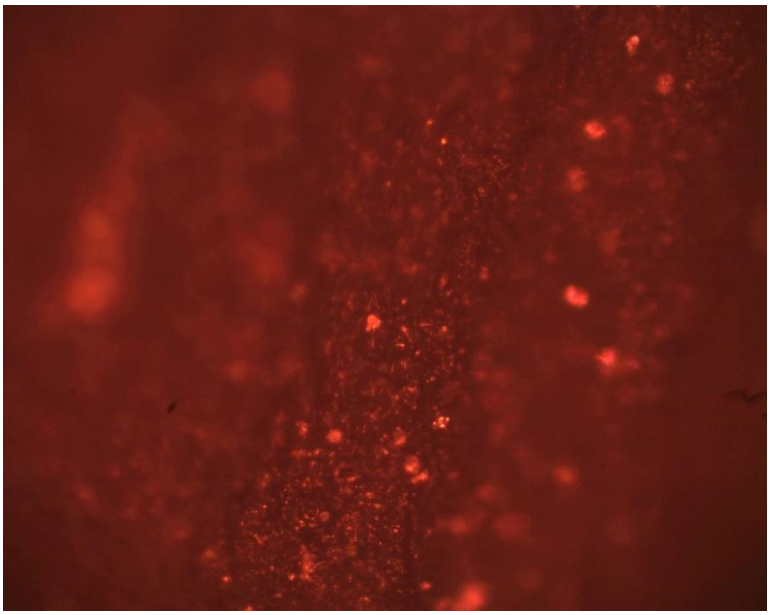


Figura 38. Vista de la muestra MII_B bajo el microscopio Raman, sin lente

La estructura visual indica patrones de porosidad y texturas que son características de los materiales carbonizados, y sugieren una alta actividad superficial, típica de los biocarbónes obtenidos a partir de biomasa [73]; Los patrones observados en la Figura 39 y podrían sugerir la formación de una estructura tipo carbono amorfo o grafítico, que es típico en procesos de pirolizacion.

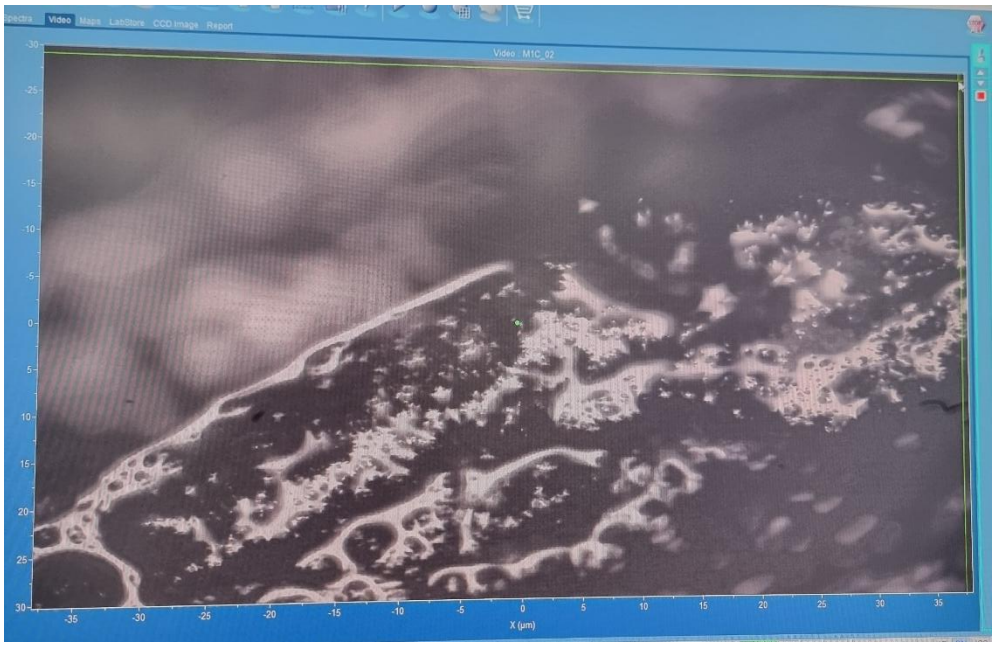
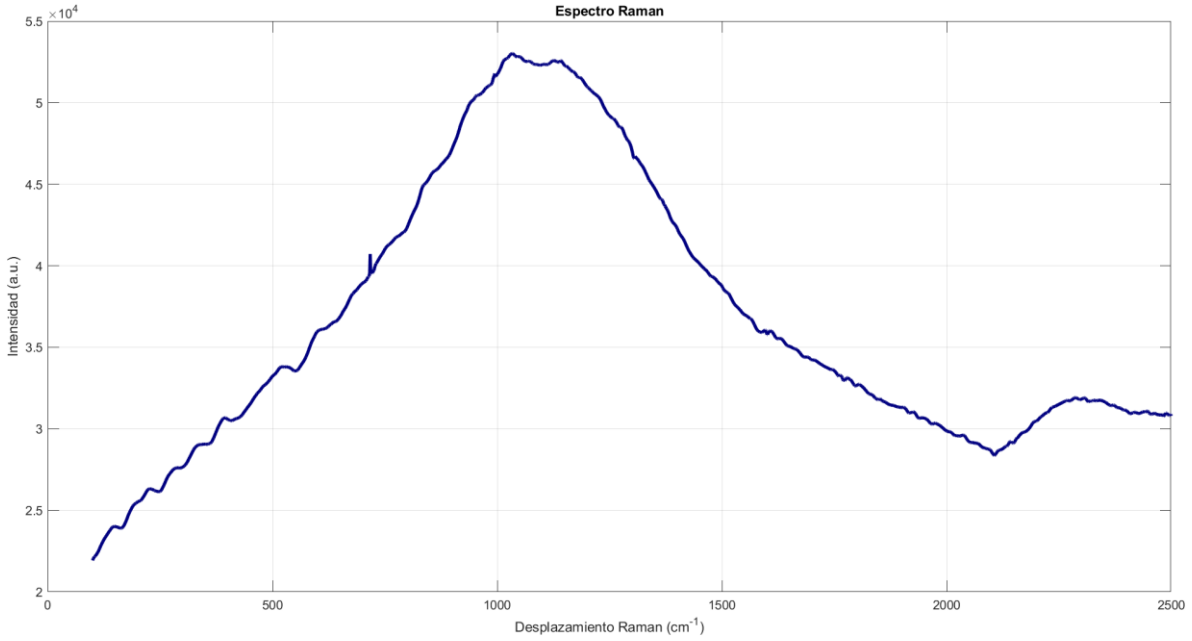


Figura 39. Vista de la muestra MII_B

La vista bajo el microscopio revelo que la cáscara de plátano no se había carbonizado completamente y aun había presencia de materia orgánica sin carbonizar por este motivo se realizaron cambios en la temperatura de secado para la siguiente muestra.

Como se aprecia en la Gráfica 20 un pico alrededor de 1033 cm^{-1} indica la posible presencia de estructuras que incluyen enlaces C-O o C-C en moléculas residuales derivadas de la celulosa o hemicelulosa, que no se descomponen completamente durante la pirólisis, esto sugiere que la muestra tiene componentes carbonizados junto con restos de compuestos oxigenados [73].



Gráfica 20. Gráfico del espectro Raman de la muestra MII_B. Elaboración propia.

El espectro parece presentar varias bandas características que podrían estar asociadas con la carbonización o compuestos carbonosos. En general, cuando se observan picos alrededor de 1350 cm^{-1} y 1580 cm^{-1}, estos corresponden a las bandas "D" y "G", que son indicativas de la presencia de carbono. La banda "D" está relacionada con la desordenación o defectos en la estructura del carbono, mientras que la banda "G" se asocia con la vibración de los átomos de carbono en una red grafítica. En este caso los valores observados alrededor de 1365 cm^{-1} y 1590 cm^{-1} podrían coincidir con estas bandas, lo que sugiere la presencia de una estructura parcialmente ordenada o grafítica junto con una cantidad significativa de desorden.

El espectro muestra variaciones en otras áreas que podrían indicar la presencia de otros compuestos o fases. Los picos en la región más alta, cercanos a los 2900 cm^{-1}, podrían estar asociados con estiramientos C-H, lo que podría indicar la presencia de compuestos hidrocarbonados.

8.5 Muestra III

Se realizó una vez más el proceso de fotopirólisis, en esta ocasión se tomaron distintos parámetros en el secado y temperatura, en la Tabla 15 se enlistan.

Tabla 15. Peso de la cáscara de plátano Muestra III. Elaboración propia

Muestra	Masa recipiente (g)	Masa Cascara (g)	1ra revisión (g)	7ª revisión (g)	Muestra triturada	Temperatura máxima alcanzada (°C)
MIII_A	0.930	2.173	3.103	1.186	1.185	100
MIII_B	0.908	2.251	3.159	1.213	1.170	100
MIII_C	0.786	1.509	2.295	0.998	0.995	100
MIII_D	0.797	1.919	2.716	1.090	1.085	100

Debido a que para el análisis Raman se requiere que la muestra cubra el fondo del recipiente para que el láser del microscopio logre abarcar la mayor área posible, se colocó el peso total de la muestra III (MIII_A - MIII_D) dando un total de muestra a pirolizar en este experimento de 1.014 g.

En la Tabla 16, se muestra el tiempo de permanencia del proceso de pirólisis y los ajustes en los parámetros.

Tabla 16. Parámetros para el proceso de pirólisis, Muestra III Elaboración propia.

Peso cáscara a pirolizar (g)	Tiempo de flujo gas nitrógeno (min.)	Tiempo lámpara encendida (min.)	Temperatura máxima alcanzada (°C)	Muestra molida
(Muestra MIII_A a MIII_D) 1.014	5	50	210	Sí

Después del proceso, se transportó el reactor al laboratorio central para poder realizar el análisis de la muestra, colocando el reactor debajo del lente como se muestra en la Figura 40 y 41

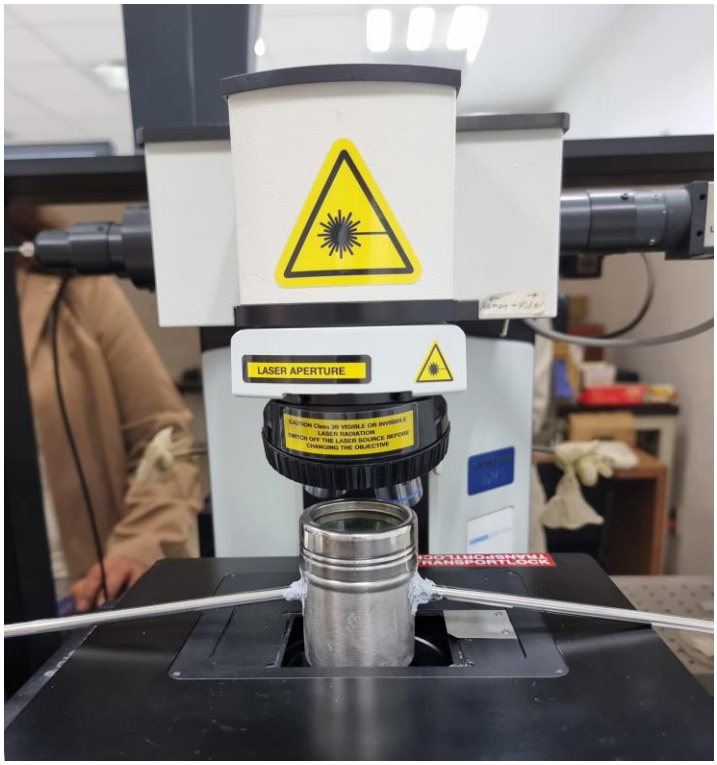


Figura 40. Reactor con la muestra MIII

Figura 41. Laser incidiendo en el reactor para analizar la muestra

El espectro Raman resultante de la Muestra 3 se aprecia en la Figura 42:

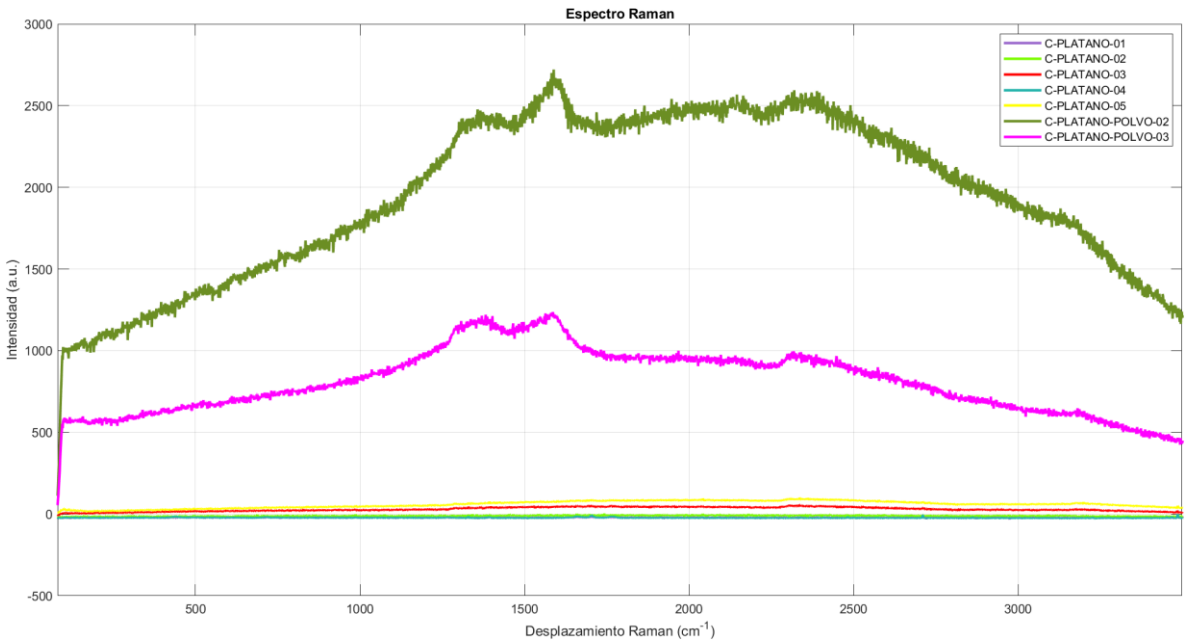


Figura 42. Espectro Raman resultante del análisis de la Muestra III

En la Figura 43. se muestra el espectro Raman del interior del reactor donde las lineas inferiores en color amarillo, rojo, verde, lila y verde agua que corresponden a los distintos barridos del láser.

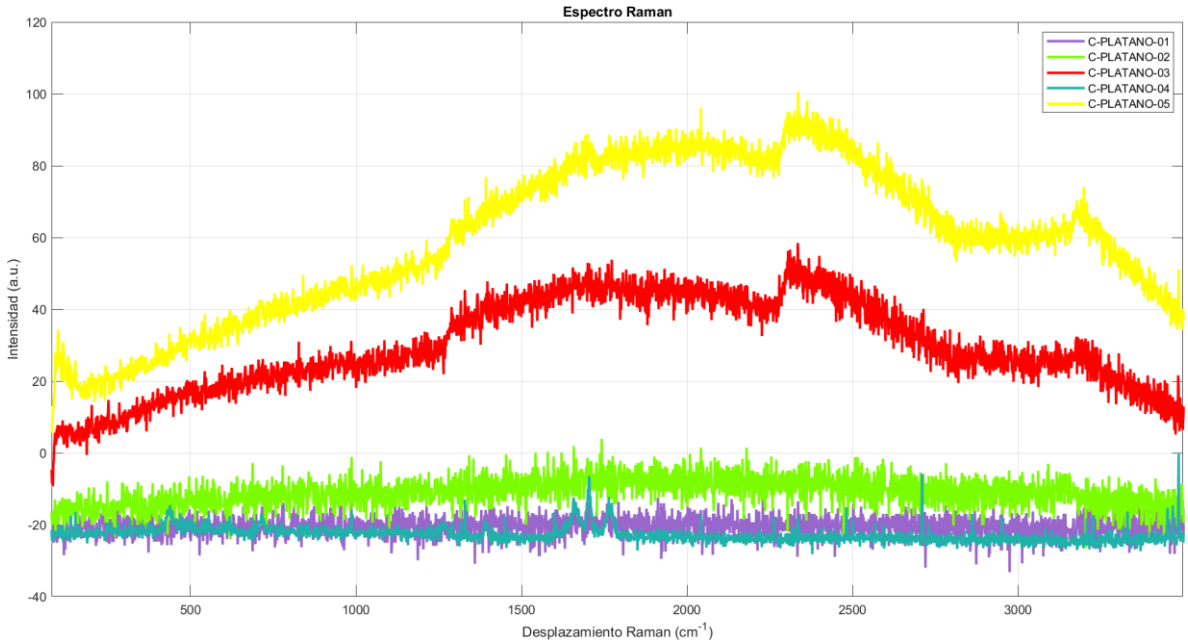


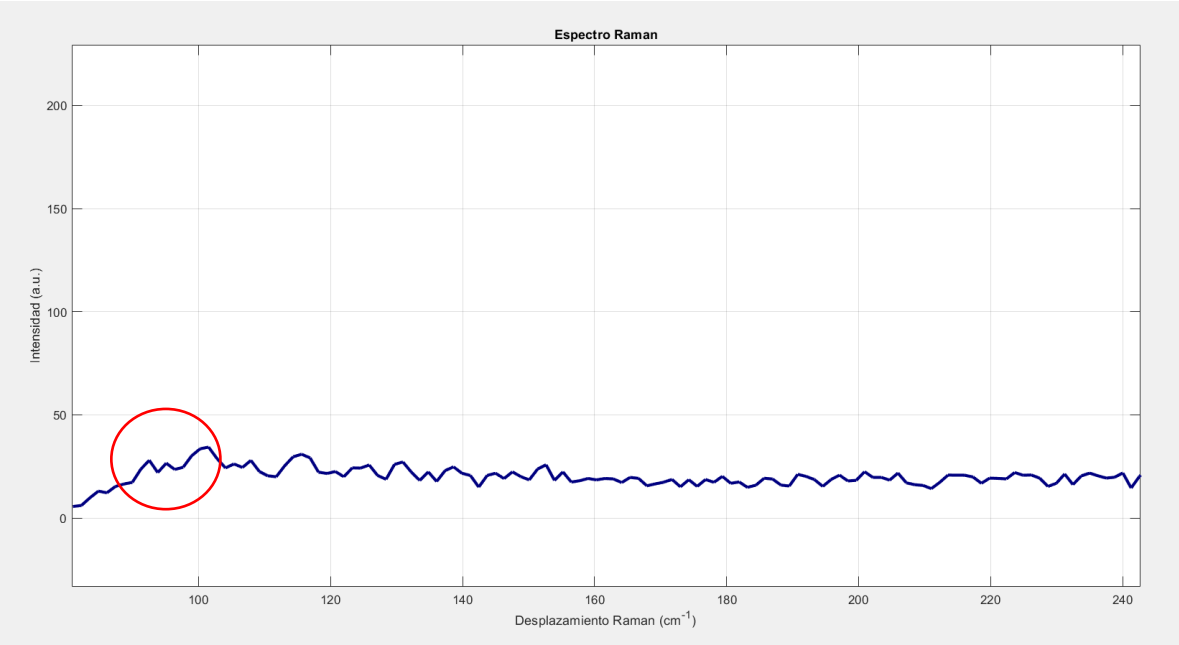
Figura 43. Espectro Raman del gas en el interior del reactor

En este espectro Raman del gas resultante después del proceso de fotopirólisis, la presencia de hidrógeno no se detecta directamente a través de picos específicos como ocurre con compuestos que contienen enlaces H_2 vibracionales (en el rango de 4155 cm^{-1} para H_2 molecular); sin embargo, el hidrógeno puede estar implícito en la composición química de grupos funcionales presentes en la estructura del carbono amorfo o grafítico. Teniendo en cuenta los siguientes indicadores de hidrógeno en materiales pirolíticos:

- Grupos funcionales hidrogenados: se detectan en las bandas en el rango de 2800−3000 cm^{-1}, pueden surgir debido a vibraciones de estiramiento del enlace C-H presentes en compuestos hidrocarbonados

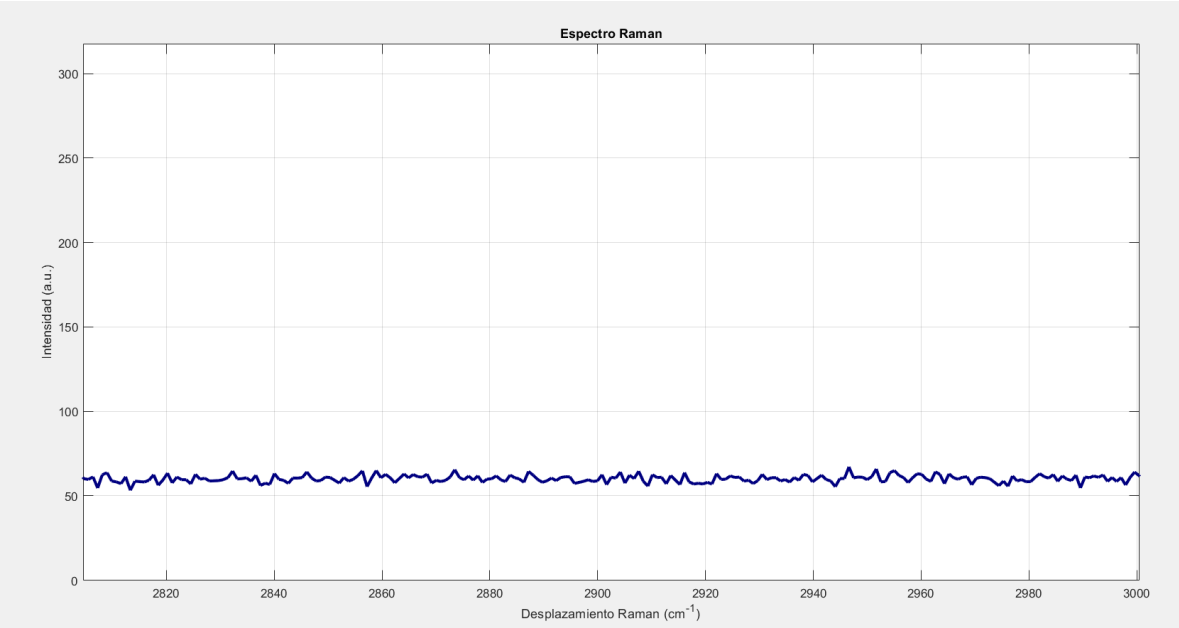
- Picos débiles en bajas frecuencias (<100 cm^{-1}): Si el hidrógeno molecular está atrapado en la estructura carbonosa, pueden aparecer características asociadas a transiciones rotacionales.

De acuerdo con lo anterior, en el espectro Raman ilustrado en la Gráfica 21 se observan picos a bajas frecuencias que indican la presencia de hidrógeno.



Gráfica 21. Espectro Raman donde se señala las bajas frecuencias <100 cm^{-1} que señalan la presencia del hidrógeno

También se observan en el rango de 2800 a 3000 cm^{-1} la presencia del hidrógeno, debido al tamaño de la muestra es la presencia que éste tiene en el espectro de la Gráfica 22.



Gráfica 22. Espectro Raman donde se muestran las frecuencias de 2800 a 3000 cm-1 que señalan la presencia del hidrógeno

Como podemos observar en las Gráficas 21 y 22 los rangos muestran la presencia de alquinos los cuales son indicadores de la presencia de hidrógeno [74], como observamos en la Figura 45.

$$RC \equiv CH \xrightarrow{Calor} RC \equiv C\cdot + H\cdot$$

$$RC \equiv CH \xrightarrow{Calor} R\cdot + C \equiv CH$$

$$C \equiv CH \xrightarrow{Calor} C = C + H_2$$

Figura 44 Mecanismo de reacción de los alquinos donde se produce hidrógeno molecular [75]

De acuerdo con el mecanismo de reacción propuesto por McMurry (2017) [75], (ilustrado en la figura 45) se tiene que, a temperaturas elevadas, el enlace $C - H$ en los alquinos puede romperse homolíticamente (cada átomo se lleva un electrón del enlace), liberando radicales de hidrógeno (H·), estos pueden recombinarse rápidamente para formar moléculas de hidrógeno $H\cdot + H\cdot \rightarrow H_2$ o reaccionar con otros fragmentos presentes como radicales de carbono o grupos funcionales,

formando productos secundarios y liberando hidrógeno; posteriormente los enlaces triples del alquino pueden romperse generando más radicales que facilitan la liberación de hidrógeno y el carbono insaturado generado puede estabilizarse liberando más hidrógeno [76].

Después de analizar el gas resultante dentro del reactor, se procedió a tomar un poco de la muestra MIII pirolizada, para colocarla en un portaobjetos y analizarla en el microscopio Raman, teniendo como resultado el espectro color rosa y verde de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, y separadas se aprecian de la siguiente manera (Figura 45 y 46)

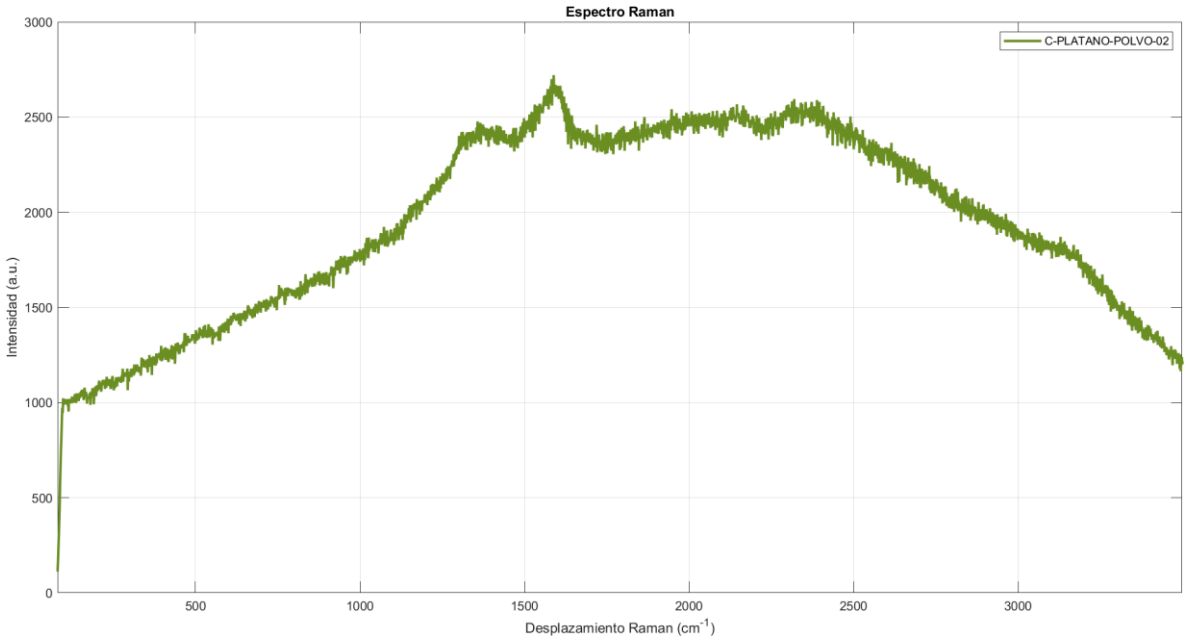
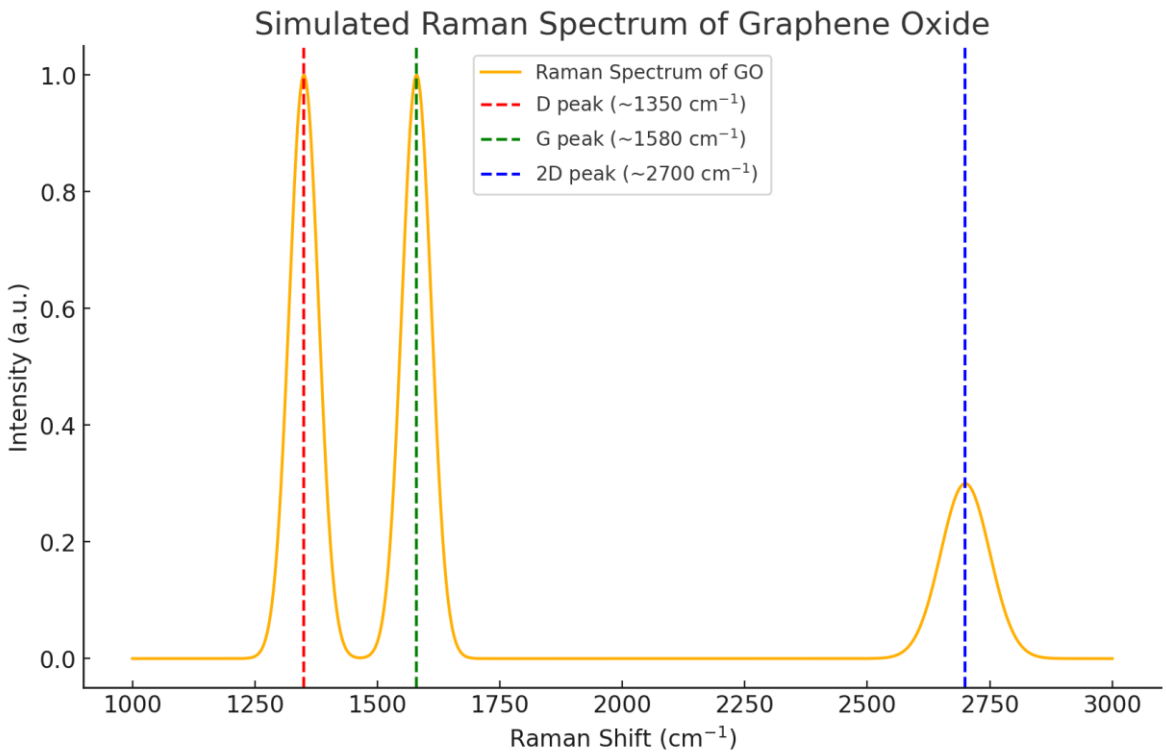


Figura 45. Espectro Raman del plátano pirolizado.

En la Figura 45, podemos apreciar el espectro Raman correspondiente a la muestra III fuera del reactor, la cáscara molida y pirolizada. Donde se observan picos alrededor de los 1200 a 1400 que son indicadores de la presencia del oxido de grafeno.

El espectro Raman del óxido de grafeno (GO, por sus siglas en inglés) típicamente se caracteriza por dos picos principales: el modo D (~1,350 cm^{-1}) y el

modo G (~1,580 cm^{-1}) como se muestra en la Gráfica 23. El pico D está asociado a los defectos estructurales y las imperfecciones en la red del carbono, como bordes o grupos funcionales oxigenados, mientras que el pico G está relacionado con la vibración de los átomos de carbono en el plano sp^2. En el caso del óxido de grafeno reducido (rGO), estos picos pueden sufrir ligeros desplazamientos debido a la restauración parcial de las estructuras de carbono sp^2 y la eliminación de oxígenos funcionales.



Gráfica 23. Espectro Raman ideal del oxido de grafeno. Fuente: Caracterização De Materiais Carbonosos Por Espectroscopia Raman [77].

Además de los picos D y G, en algunos casos también se puede observar el pico 2D (~2,700 cm^{-1}), que es característico de las interacciones entre capas de grafeno y proporciona información sobre el nivel de exfoliación o apilamiento del material como se muestra en la figura.

De la misma manera, cambiando en ancho de barrido del láser, obtenemos el siguiente espectro Raman, donde una vez más aparecen los picos en los rangos correspondientes a la presencia del oxido de grafeno

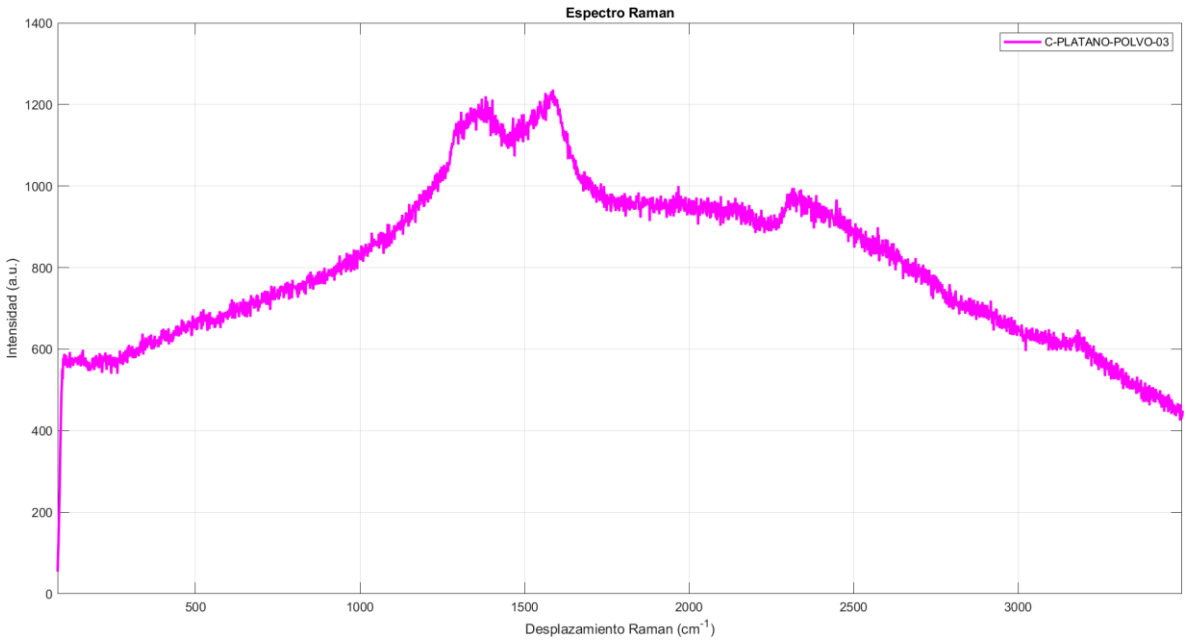


Figura 46. Espectro Raman del plátano fuera del reactor

Los espectros Raman de todos los materiales carbonosos presentan picos característicos en la región entre 1000 y 1800 cm^{-1} para energías de excitación en el visible e infrarrojo. Para los materiales grafíticos, esta región corresponde a las bandas D, G y D', donde la banda G (1500 a 1600 cm^{-1}) es un modo de primera orden con simetría E2g, y las bandas D (1200 a 1400 cm^{-1}) y D' (1600-1630 cm^{-1}) surgen debido a procesos Raman de doble resonancia [77]. El espectro del óxido de grafeno se caracteriza por la presencia del pico D (1350 cm^{-1}) con una intensidad menor o similar al pico G.

El óxido de grafeno reducido (RGO) es el producto de la reducción del óxido de grafeno mediante tratamientos térmicos, químicos o eléctricos. La Figura 47 muestra aspectos de los espectros Raman del óxido de grafeno (GO) y del óxido de grafeno reducido (RGO). La estructura generada aún conserva algunos grupos

funcionales oxigenados y un gran número de defectos. El espectro Raman del RGO se caracteriza por la presencia del pico D con una intensidad mayor que la del pico G [77].

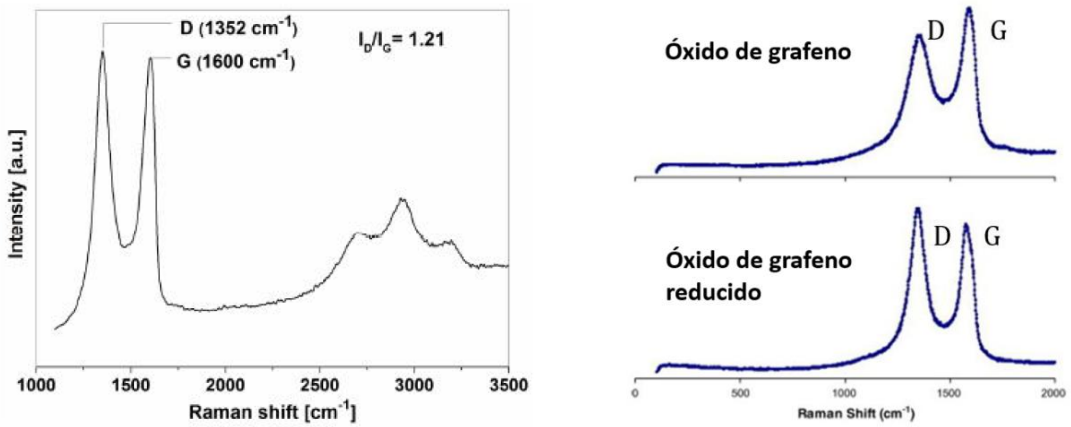
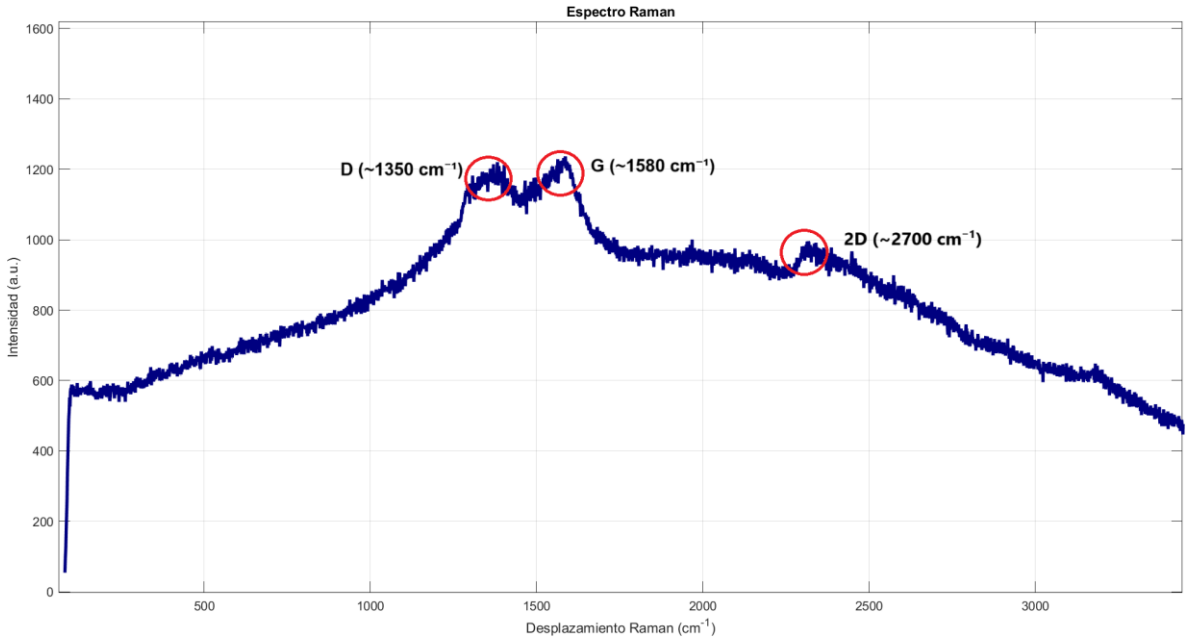


Figura 47. Espectros Raman de óxido de grafeno (GO) y óxido de grafeno reducido. Fuente: Caracterização De Materiais Carbonosos Por Espectroscopia Raman [77].

Teniendo en cuenta lo anterior, analizaremos el espectro Raman de la figura 45 a detalle, como se aprecia en la Gráfica 24 ya que los picos se acentúan más.



Gráfica 24. Espectro Raman de la muestra fuera del reactor. Elaboración propia

En la gráfica 24, se puede observar lo siguiente [77]:

- **Pico D (~1350 cm^{-1}):** Este pico indica la presencia de defectos o desorden en la red cristalina, como bordes, vacantes, o grupos funcionales oxigenados. Es característico de los materiales de carbono que presentan interrupciones en la estructura de grafeno ordenado.
- **Pico G (~1580 cm^{-1}):** Representa las vibraciones de estiramiento dentro de las zonas sp^2 (carbono ordenado) en la red del material. Este pico se encuentra en todas las estructuras de carbono con regiones bien organizadas, como en el grafeno y sus derivados.
- **Pico 2D (~2700 cm^{-1}):** Es una sobretonalidad del modo D y está relacionado con la interacción entre capas de grafeno o el grado de exfoliación. En el óxido de grafeno reducido (rGO) o grafeno puro, este pico puede proporcionar información sobre la calidad y la cantidad de capas.
- **Picos adicionales:** Algunos picos menores pueden aparecer dependiendo del grado de funcionalización (introducción de grupos químicos oxigenados), dopaje, o la presencia de impurezas en el material. Estos se reflejan a menudo como características menores en rangos de 500-1000 cm^{-1} o picos amplificados en regiones más altas.

Los picos en la gráfica no están tan definidos ya que la obtención del óxido de grafeno no estaba dentro de los objetivos por lo cual cabe destacar que la pureza de este no es óptima en su totalidad, sin embargo, podemos considerar la viabilidad del experimento orientado a la obtención de óxido de grafeno.

Algunas aplicaciones principales del óxido de grafeno son:

- Energía [78]
    - Baterías y supercondensadores: Utilizado en baterías de ion-litio, sodio, y otros sistemas electroquímicos como ánodo o recubrimiento.

Mejora la capacidad y la eficiencia de los supercondensadores debido a su alta área superficial y conductividad.

    - Celdas solares: Actúa como material de transporte de electrones en celdas solares de perovskita o sensibilizadas por colorante.

- Medio Ambiente
    - Purificación de agua: Filtración de contaminantes, metales pesados, y sales gracias a su capacidad de adsorción y propiedades de tamiz molecular. Se utiliza en membranas para desalinización y eliminación de sustancias orgánicas tóxicas.
    - Sensores ambientales: Detecta gases, contaminantes y toxinas mediante cambios en su conductividad eléctrica.
- Electrónica
    - Electrónica flexible: Como material conductor en dispositivos electrónicos flexibles y transparentes. Usado en pantallas táctiles, dispositivos "wearables" y sensores electrónicos.
    - Circuitos impresos: Integrado en tintas conductoras para impresión de circuitos electrónicos.
- Medicina y Biotecnología [79]
    - Liberación controlada de medicamentos: Transportador para fármacos gracias a su capacidad de funcionalización química y biocompatibilidad.
    - Imágenes biomédicas: Como agente de contraste en técnicas de imagen como la resonancia magnética y la tomografía computarizada.
    - Ingeniería de tejidos: Mejora de andamios para regeneración de tejidos debido a su resistencia mecánica y capacidad de soportar el crecimiento celular.
    - Sensores biomédicos: Utilizado en dispositivos para la detección de biomoléculas como glucosa, proteínas, y ADN.
- Materiales avanzados [80]
    - Revestimientos anticorrosión: Proporciona una barrera contra la oxidación y corrosión en metales y aleaciones.

    - Nanocompuestos: Refuerza materiales poliméricos, cerámicos y metálicos, mejorando sus propiedades mecánicas y térmicas.
    - Membranas funcionales: Usado en separación de gases, nanofiltración y ultrafiltración.
- Energías renovables [81]
    - Producción de hidrógeno: Catalizador en la producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua.
    - Celdas de combustible: Mejora el transporte de protones y la eficiencia en celdas de combustible.
- Otras aplicaciones
    - Dispositivos optoelectrónicos: Integrado en LEDs, láseres y detectores ópticos.
    - Recubrimientos superhidrofóbicos: Usado para fabricar superficies repelentes al agua y autolimpiables.
    - Almacenamiento de información: Material prometedor en dispositivos de memoria no volátil.

IX. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

9.1 Conclusiones

La investigación presentada se enfocó en el diseño de un sistema de fotopirólisis para la producción de hidrógeno a partir de cáscara de plátano (Musa x paradisiaca), utilizando tecnología de fotopirólisis con una lámpara de xenón. El trabajo destacó la importancia del hidrógeno como un vector energético versátil y sostenible, con el potencial de contribuir significativamente a la transición hacia energías limpias y renovables. Asimismo, se enfatizó la necesidad de explorar fuentes alternativas para la producción de hidrógeno, como la biomasa residual, debido a los altos costos y huella de carbono asociados con los métodos convencionales.

Entre las principales motivaciones del proyecto, se resaltó que la cáscara de plátano, un residuo agrícola rico en fibra, lignina y celulosa poseía un gran potencial como biomasa para la generación de hidrógeno. Esto resultó particularmente relevante en regiones como Oaxaca, donde el cultivo del plátano es abundante, pero sus desechos suelen ser desaprovechados y descartados, contribuyendo a la acumulación de residuos. La investigación tuvo como objetivo no solo innovar en la producción de hidrógeno mediante procesos termoquímicos, sino también ofrecer soluciones para la gestión de residuos orgánicos y fortalecer la autosuficiencia energética local.

Aunque el hidrógeno se planteó como una alternativa viable y amigable con el medio ambiente, se identificó como desafío crítico la necesidad de una producción eficiente y de bajo impacto ambiental. En este contexto, la fotopirólisis, caracterizada por la rápida descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno, fue propuesta como una solución prometedora para optimizar la producción de biogases, incluido el hidrógeno, y biocarbón.

Durante las pruebas, se empleó una lámpara de xenón como fuente de energía para inducir la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno, maximizando la generación de gases y biocarbón. Los resultados demostraron que este proceso permitió obtener una cantidad significativa de hidrógeno, junto con subproductos como biocarbón y compuestos volátiles. La proporción de hidrógeno en el gas producido se destacó como un avance relevante, considerando que la biomasa utilizada era un residuo agrícola.

Se observó que la eficiencia del proceso estuvo directamente influenciada por condiciones experimentales como la intensidad y duración de la exposición a la lámpara de xenón, así como la temperatura alcanzada durante la pirólisis. La experimentación reveló que las temperaturas más altas favorecieron la descomposición completa de los componentes lignocelulósicos de la cáscara de plátano, incrementando la producción de hidrógeno. Además, se registró una mejora en el rendimiento cuando la muestra fue sometida a tiempos de exposición más precisos y controlados.

Otro resultado relevante fue la producción simultánea de biocarbón, un subproducto sólido con alto contenido de carbono, que podría ser aprovechado en distintas aplicaciones. Este enfoque apuntó a una gestión integral de los residuos, generando hidrógeno como vector energético y subproductos útiles para otros sectores.

Se llevó a cabo el diseño y la construcción de un sistema de pirólisis que incorpora una lámpara de xenón con especificaciones técnicas de 120 V, 3.79 A, 60 Hz y 454.8 W, la cual fue estratégicamente instalada en la parte superior de una cámara de madera con forma cúbica y dimensiones de 30 cm por lado. Esta cámara fue diseñada con puertas de apertura hacia el exterior y ranuras específicas para alojar los tubos conductores de gas, permitiendo así la generación de una atmósfera inerte en su interior. La atmósfera inerte se establece en un recipiente de acero inoxidable que actúa como reactor, el cual fue modificado para incluir una cubierta superior de vidrio, con el propósito de permitir la interacción efectiva con la luz

incidente emitida por la lámpara, optimizando así las condiciones para el proceso de pirólisis.

Se logró la automatización del inicio y paro del sistema mediante la incorporación de un sistema basado en microcontrolador, el cual incluye un módulo Bluetooth que permite establecer comunicación con un dispositivo smartphone, mejorando así la accesibilidad y el control remoto del proceso. Asimismo, se integró un termopar para el monitoreo continuo de la evolución de la temperatura en función del tiempo, lo que proporciona un registro preciso y en tiempo real de las condiciones operativas. Estos avances representan una mejora significativa en la funcionalidad y la capacidad de supervisión del sistema, contribuyendo a su eficiencia y versatilidad.

Una vez construido y validado el sistema de fotopirólisis, se procedió a preparar la cáscara de Musa x paradisiaca mediante un proceso de secado para reducir al máximo su contenido de humedad, facilitando así su posterior tratamiento. El proceso de pirólisis se inició creando una atmósfera inerte dentro del reactor mediante un flujo de nitrógeno durante cinco minutos. Posteriormente, se encendió la lámpara de xenón, que operó durante aproximadamente 50 minutos, alcanzando una temperatura máxima de 210 °C.

Concluido el proceso de fotopirólisis, el reactor fue sellado y trasladado al laboratorio central, donde se llevó a cabo el análisis del gas generado utilizando espectroscopia Raman. Adicionalmente, se realizó un análisis del biocarbón obtenido como subproducto del proceso, aprovechando la oportunidad para estudiar su composición y características. Estos pasos permitieron validar la funcionalidad del sistema y obtener información valiosa sobre los productos resultantes del proceso de fotopirólisis.

Tras concluir el proceso de caracterización de los productos obtenidos mediante fotopirólisis, se confirmó la presencia de hidrógeno a través de picos débiles en bajas frecuencias ($<100\ cm^{-1}$) y bandas en el rango de $2800-3000\ cm^{-1}$, lo que valida que el sistema implementado opera bajo un mecanismo de fotopirólisis lenta. Adicionalmente, el análisis del biocarbón generado arrojó resultados significativos,

destacando la presencia de óxido de grafeno identificado mediante el Pico D (~1350 cm^{-1}), Pico G (~1580 cm^{-1}) y Pico 2D (~2700 cm^{-1}).

Se confirmó que el sistema diseñado en este trabajo de investigación sí realiza la pirólisis lenta, por lo cual puede ser un sistema usado para la producción de óxido de grafeno realizando las adecuaciones correspondientes, entre las cuales se encuentra un proceso de purificación del oxido de grafeno, para lograr conseguir unos picos más definidos en el espectro Raman.

La importancia del óxido de grafeno (OG) radica en sus diversas aplicaciones en sectores clave. En el ámbito energético, su integración en baterías, supercondensadores y celdas solares optimiza el almacenamiento y la conversión de energía. Su eficacia en la purificación de agua y sensores ambientales resalta su relevancia para mitigar problemas de contaminación.

En electrónica y biotecnología, el OG impulsa avances en dispositivos flexibles, liberación controlada de medicamentos y regeneración de tejidos. Además, su uso en revestimientos anticorrosión, nanocompuestos y membranas funcionales mejora significativamente las propiedades de materiales avanzados. En energías renovables, desempeña un papel crucial en la producción de hidrógeno y la eficiencia de celdas de combustible. Estas aplicaciones destacan al óxido de grafeno como un material esencial para afrontar desafíos tecnológicos y ambientales, consolidando su relevancia en el desarrollo sostenible.

Aunque si bien utilizando la técnica de caracterización Raman se detectó la presencia de hidrógeno, se identificó una limitación en la cuantificación de los resultados debido a la ausencia de instrumentos especializados para la caracterización y medición precisa del gas resultante. Estos hallazgos confirman el potencial del sistema de fotopirólisis para la producción de hidrógeno y abren oportunidades para futuras investigaciones en la síntesis de óxido de grafeno.

Es importante señalar que durante el proceso de diseño y experimentación se enfrentaron diversas dificultades que afectaron la realización exitosa del proyecto. Una de las principales limitaciones fue la escasa disponibilidad de gases en el

laboratorio, dado que pocos espacios cuentan con acceso y manejo adecuado de estos recursos. Asimismo, el acceso al material necesario estuvo condicionado por su disponibilidad, lo que complicó ciertos aspectos del desarrollo experimental.

Otra dificultad significativa fue el almacenamiento del gas resultante del proceso de pirólisis, ya que su transporte representó un desafío considerable. Además, identificar y disponer del equipo adecuado para realizar el análisis del gas, con los aditamentos necesarios, generó retrasos significativos en el cronograma previsto para el análisis. Ante estas limitaciones, se tomó la decisión de proceder con el análisis mediante microscopía Raman, lo que permitió avanzar en la caracterización del material producido pese a las restricciones encontradas.

9.2 Trabajo a futuro

Se considera que el sistema de fotopirólisis diseñado y construido puede ser optimizado para mejorar su eficiencia en la producción de hidrógeno y subproductos útiles. En este sentido, una línea de trabajo futura podría centrarse en realizar ajustes al diseño del sistema, como la mejora de la lámpara de xenón mediante la variación de su potencia y la duración de la exposición, así como la incorporación de materiales aislantes que minimicen las pérdidas de calor durante el proceso.

Asimismo, es fundamental avanzar en la caracterización y cuantificación precisa de los gases producidos, particularmente del hidrógeno. Para ello, se sugiere integrar instrumentación especializada, como cromatografía de gases o espectrometría de masas, que permita obtener datos más detallados sobre la composición y la cantidad de los subproductos gaseosos generados.

Por otra parte, se identifica una oportunidad significativa en el desarrollo de procesos de purificación del óxido de grafeno obtenido como subproducto del proceso de pirólisis. Este enfoque permitiría mejorar la calidad del material y obtener picos más definidos en el espectro Raman, ampliando su potencial para aplicaciones en sectores como el almacenamiento de energía o la fabricación de materiales avanzados.

La evaluación de otras fuentes de biomasa residual representa otra dirección prometedora para futuras investigaciones. Explorar materiales alternativos permitiría determinar su viabilidad para la producción de hidrógeno y biocarbón, promoviendo así un uso más amplio de residuos agrícolas y orgánicos, especialmente en contextos donde estos recursos son abundantes.

Además, resulta esencial realizar un análisis exhaustivo del ciclo de vida y la sostenibilidad del sistema de fotopirólisis. Este estudio podría evaluar el impacto ambiental del proceso en comparación con métodos tradicionales de producción de hidrógeno, proporcionando información clave para respaldar su implementación a mayor escala.

Otra línea de trabajo relevante consiste en escalar el sistema de fotopirólisis para aplicaciones industriales, lo cual implicaría evaluar su desempeño en condiciones de mayor capacidad. Este paso permitiría explorar la viabilidad técnica y económica del proceso en contextos más amplios, promoviendo su adopción en sectores productivos.

También se sugiere incorporar tecnologías avanzadas de control y monitoreo al sistema, como sensores de última generación y sistemas de automatización, para mejorar la supervisión en tiempo real de las variables operativas. Esto no solo incrementaría la reproducibilidad del proceso, sino que también facilitaría su optimización.

En cuanto al biocarbón producido, se propone investigar sus posibles aplicaciones como adsorbente de contaminantes, material para el almacenamiento de energía o componente para mejorar la calidad de suelos agrícolas. Estas iniciativas podrían fomentar un aprovechamiento integral de los residuos procesados.

Se plantea el desarrollo de modelos matemáticos que permitan simular el proceso de fotopirólisis. Estos modelos podrían proporcionar herramientas predictivas útiles para ajustar y mejorar los parámetros operativos del sistema.

Finalmente, se considera relevante explorar la transferencia de esta tecnología a comunidades agrícolas, especialmente en regiones como Oaxaca, donde la producción de plátano es abundante. Este enfoque permitiría abordar de manera simultánea la gestión de residuos agrícolas y la autosuficiencia energética local, promoviendo soluciones sostenibles que beneficien tanto al medio ambiente como a las economías regionales.

X. BIBLIOGRAFÍA

[1] Enel green power, «ENEL GREEN POWER,» Global Digital Solutions , 15 Junio 2020. [En línea]. Available: https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/transicion-energetica/fuentes-renovables. [Último acceso: 29 Junio 2022].

[2] Gobierno de Oaxaca, «Plátano, fortaleza agroalimentaria de Oaxaca: Adolfo Toledo,» QUADRATIN Oaxaca, Oaxaca, 2018.

[3] F. J. Gómez Montaño, V. E. Bolado García y G. Blasco López, «Análisis bromatológico de cáscaras de diferentes variedade de plátano (Musa spp.) para su posterior utilización en la formulación de harinas enriquecidas,» *Acta Universitaria,* vol. 29, nº e2260, pp. 1-14, 2019.

[4] Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climatico, «Calentamiento global de 1,5°C,» IPPC, 2019.

[5] A. González García Conde, «Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno,» *Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.*

[6] A. C. Morales Ramos, M. Pérez Figueroa, J. R. Pérez Gallardo y S. De León Almaraz, «Energías renovables y el hidrógeno: un par prometedor en la transición energética de México,» *Energías renovables y el hidrógeno: un par prometedor en la transición energética de México,* nº 70, pp. 92-101, 2017.

[7] P. L. Arias Ergueta, I. Aguirre Arisketa y V. L. Barrio Cagigal, «El futuro del hidrógeno verde,» *DYNA,* pp. 567-569, 2022.

[8] H. Rodríguez, «Propiedades del hidrógeno (H),» National Geographic, 16 Septiembre 2022. [En línea]. Available: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-hidrogeno-h_18653 . [Último acceso: 5 Septiembre 2023].

[9] UNECE, «Defining sustainable hydrogen: beyond colours,» 25-26 marzo 2021. [En línea]. Available: https://unece.org/sed/documents/2021/06/post-session-documents/defining-sustainable-hydrogen-beyond-colours. [Último acceso: 6 marzo 2022].

[10] C. Fernández-Bolaños Badía, Energética del Hidrógeno Contexto, Estado actual y Perspectivas de Fututo, Sevilla: Departamento de Energética y Mecánica de Fluidos, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, 2005.

[11] K. Rajeshwar, R. McConnell y S. Licht, Solar Hydrogen Generation : Toward a Renewable Energy Future, New York: Springer, 2008.

[12] J. J. de Troya Calatayud, L. Carral Couce, C. Álvarez Feal y J. M. Rodríguez Guerreiro, Estudio Comparativo Del Uso De Hidrógeno Frente A Combustibles Fósiles En Motores De Combustión Interna En Buques., La Coruña: Universidad de La Coruña.

[13] R. B. Gupta, Hydrogen Fuel Production, Transport, and Storage, Boca Ratón: Taylor & Francis Group, 2008.

[14] E. Junyent Guinart, Hidrógeno. Estudio de sus propiedades y diseño de una planta de licuado., Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña · Barcelona Tech - UPC, 2011.

[15] Ó. Santiago Carretero, «Apilados,» 12 Agosto 2018. [En línea]. Available: https://apilados.com/blog/es-el-hidrogeno-peligroso/. [Último acceso: 7 Marzo 2023].

[16] P. Ordin, W. Brown , H. Beeson, M. Pedley, D. Griffin, C. Bryan, T. Wayne y F. Wayne, SAFETY STANDARD FOR HYDROGEN AND HYDROGEN SYSTEMS, Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 1997.

[17] G. E. Acosta Quishpe y C. R. Salgado Rojas, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTROLIZADOR DE CORRIENTE CONTINUA DE 200 WATIOS CON ENERGÍA SOLAR E INSTRUMENTACIÓN NECESARIA PARA MEDIR LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO, Quito: FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2010.

[18] D. Brooks, «Energías renovables: qué son los hidrógenos verde, azul y negro (y por qué se invierten miles de millones en 2 de ellos),» *BBC News Mundo,* 2020.

[19] R. Martín Mateo, «La verde energía de la biomasa,» *Aranzadi,* p. 23, 2008.

[20] J. Fernández, «Biomasa,» de *Energías Renovables para Todos*, Haya Comunicación, pp. 2,3.

[21] J. M. Fernandez Delgado, TECNOLOGÍA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES, Antonio Madrid Vicente, 2009.

[22] J. A. Sánchez Sáez, «Las demandas de suelo derivadas del desarrollo de la biomasa como fuente de energía renovable,» de *El Derecho de la Energía: Congreso Italo-Español de Profesores de Derecho Administrativo*, Sevilla, 2006.

[23] D. Arias Aguilar, Tecnologías para la generación de energía a partir de la biomasa forestal, Siguatepeque: Universidad Nacional de Ciencias Forestales UNACIFOR, 2017.

[24] G. San Miguel y F. Gutiérrez Martín, Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética, Madrid: Mundi-Prensa, 2015.

[25] A. I. de Lucas Herguedas, «BLOQUE II. BIOCOMBUSTIBLES,» de *BIOMASA, BIOCOMBUSTIBLES Y SOSTENIBILIDAD*, Palencia, Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA.CT, 2012, pp. 134-136.

[26] J. M. Rincón Martínez, R. Gastón Mejía, J. M. Islas Samperio y J. de Esteban Lizarde, «Potencial de la biomasa y perspectivas en diferentes países,» de *Bioenergía*, Bogotá, La Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, 2014, pp. 17-56.

[27] E. E. Silva Lora, M. García-Pérez y R. Lesme Jaén, «Procesos Termoquímicos,» de *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*, Bogotá, Charlie's Impresores Ltda, 2015, pp. 165 - 216.

[28] P. Mckendry, «Energy production from biomass (part 2): conversion technologies,» *Bioresource technology,* vol. 83, nº 1, pp. 47-57, 2002.

[29] A. Urien Pinedo, Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual, Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia Departamento de Ciencias Analíticas, 2013.

[30] A. Demirbaş, «Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals,» *Energy Conversion and Management,* vol. 42, nº 11, pp. 1357-1378, 2001.

[31] M. J. Antal, W. L. Mok, J. C. Roy, A. T. -Raissi y D. Anderson, «Pyrolytic sources of hydrocarbons from biomass,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,* vol. 8, pp. 291-303, 1985.

[32] A. L. Sullivan y R. Ball, «Thermal decomposition and combustion chemistry of cellulosic biomass,» *Atmospheric Environment,* vol. 47, nº 1352-2310, pp. 133-141, 2012.

[33] A. V. Bridgwater, «Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,* vol. 51, nº 1-2, pp. 3-22, 1999.

[34] M. Balat, . M. Balat, E. Kırtay y H. Balat, «Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems,» *Energy Conversion and Management,* vol. 50, nº 12, pp. 3147-3157, 2009.

[35] N. Özbay , E. Apaydın-Varol, B. Burcu Uzun y . A. Eren Pütün, «Characterization of bio-oil obtained from fruit pulp pyrolysis,» *Energy,* vol. 33, nº 8, pp. 1233-1240, 2008.

[36] A. V. Bridgwater, «Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading,» *Biomass and Bioenergy,* vol. 38, pp. 68-94, 2012.

[37] Oxford Languages, «Oxford Languages,» 2023. [En línea]. Available: https://www.google.com/search?q=etimologia+del+platano+&sxsrf=APwXEdcuifkY9_Djk3BPTlGcXZsI2YAvQQ%3A1683676992752&source=hp&ei=QN9aZMKgK_K-kPIP0fiv2AU&iflsig=AOEireoAAAAAZFrtUATetxcBoRY9lM6KE9f45gqmdMtN&ved=0ahUKEwjCwMTIuen-AhVyH0QIHVH8C1sQ4dUDCAk&uact=5&o. [Último acceso: 2023 Abril 28].

[38] INECOL, «Origen y domesticación del plátano: un cultivo de gran importancia para México,» 26 Junio 2017. [En línea]. Available: https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2017-06-26-16-35-48/17-ciencia-hoy/1429-origen-y-domesticacion-del-platano-un-cultivo-de-gran-importancia-para-mexico. [Último acceso: 28 Mayo 2023].

[39] G. Blasco López y F. J. Gómez Montaño, «Propiedades funcionales del plátano (Musa sp),» *Facultad de Nutrición Xalapa,* pp. 15-20, 2014.

[40] Veracruz Gobierno del Estado, «Monografía del plátano,» Veracruz, Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, 2010, pp. 2-6.

[41] R. González-Montelongo, M. G. Lobo y M. González, «Antioxidant activity in banana peel extracts: Testing extraction conditions,» *Food Chemistry,* vol. 1, pp. 1030-1039, 2010.

[42] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, «Plátano: la fruta tropical más cultivada en México,» 21 Enero 2020. [En línea]. Available: https://www.gob.mx/agricultura/articulos/hoy-dia-del-platano?idiom=es. [Último acceso: 8 Agosto 2023].

[43] T. Happi Emaga, R. Herinavalona Andrianaivo, B. Wathelet, J. Tchango Tchango y . M. Paquot, «Effects of the stage of maturation and varieties on the,» *Food Chemistry,* vol. 103, nº 2, pp. 590-600, 2007.

[44] S. Someya , . Y. Yoshiki y K. Okubo, «Antioxidant compounds from bananas (Musa Cavendish),» *Food Chemistry,* vol. 79, nº 3, pp. 351-354, 2002.

[45] K. Kanazawa y H. Sakakibara, «High content of dopamine, a strong antioxidant, in Cavendish banana,» *Journal of agricultural and food chemistry,* vol. 48, nº 3, pp. 844-848, 2000.

[46] S. Suntharalingam y G. Ravindran , «Physical and biochemical properties of green banana flour,» *Plant Foods for Human Nutrition,* vol. 43, pp. 19-27, 1993.

[47] R. Stover, Bananas: Tropical Agriculture series, New York: John Wiley and Sons, Inc., 1987.

[48] T. Happi Emaga , R. Herinavalona Andrianaivo, B. Wathelet, J. Tchango Tchango y M. Paquot, «Effects of the stage of maturation and varieties on the chemical composition of banana and plantain peels,» *Food Chemistry,* vol. 103, nº 2, pp. 590-600, 2007.

[49] SENASICA, Estudio para determinar el impacto económico de Foc R4T en México, Ciudad de México: Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021.

[50] «La marchitez del banano por Fusarium Raza 4 Tropical: ¿Una creciente amenaza al mercado mundial del banano?,» *Food Outlook BIANNUAL REPORT ON GLOBAL FOOD MARKETS,* pp. 12-20, 2019.

[51] «ESTADO DE OAXACA,» Diciembre 2022. [En línea]. Available: https://www.oaxaca.gob.mx/oaxaca/. [Último acceso: 5 Septiempre 2023].

[52] COMITE ESTATAL DE SANIDAD VEGETAL DE OAXACA, «Programa Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria,» COMITE ESTATAL DE SANIDAD VEGETAL DE OAXACA, 2015. [En línea]. Available: https://www.cesvo.org.mx/vigilancia-inspeccion-fitosanitaria/impacto.html. [Último acceso: 19 Julio 2023].

[53] G. Gómez Alvarez y G. Martin Rodriguez, OBTENCIÓN ARTESANAL DE BIObtención Artesanal de Bioetanol Mediente Desechos de la cáscara de plátano, Bogotá: Fundación Universidad de América, 2021.

[54] M. Molina Sabio y F. Rodríguez Reinoso, «Role of chemical activation in the development of carbon porosity,» *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,* vol. 24, nº 1-3, pp. 15-25, 2004.

[55] C. Bellido Díez, Obtención de Bioetanol 2G a partir de hidrolizados de paja de trigo: Fermentación conjunta de los Penta y Hexa carbohidratos con Pichia stpitis, Valladolid: Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales , 2014.

[56] L. Cuervo, J. L. Folch y R. E. Quiroz, «Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol,» *Bio Tecnol,* vol. 13, nº 3, pp. 11-25, 2009.

[57] L. García García, E. Bordallo López, D. Dopico Ramírez y D. Cordero Fernández , «Obtención de celulosa microcristalina a partir del bagazo de la caña de azúcar,» *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar,* vol. 47, nº 1, pp. 57-67, 2013.

[58] M. D. Córdoba Pérez y M. E. Molina Córdoba, «Determinacion del efecto de la concentracion de celulasa, celobiasa y naoh en la hidrólisis para la

produccion de etanol a partir del rastrojo de la piña,» *Rev. Ing.,* vol. 24, nº 2, pp. 35-51, 2014.

[59] M. Chávez Sifontes y M. E. Domine, «LIGNINA, ESTRUCTURA Y APLICACIONES: MÉTODOS DE DESPOLIMERIZACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE DERIVADOS AROMÁTICOS DE INTERÉS INDUSTRIAL,» *Avances en Ciencias e Ingeniería,* vol. 4, nº 4, pp. 15-46, 2013.

[60] E. Lagunes Fortiz y E. Zavaleta Mejía, «Función de la Lignina en la Interacción Planta-Nematodos Endoparásitos Sedentarios,» *Revista Mexicana de FITOPATOLOGÍA,* vol. 34, nº 1, pp. 43-63, 2016.

[61] J. Santos Aguilar y D. A. Zabala García, Evaluación de la producción de etanol a partir de residuos orgánicos y sus diferentes mezclas, generados en la empresa Alimentos, Bogotá: Fundación Universidad de América, 2016.

[62] molview.org, «molview.org,» molview.org, 19 4 2024. [En línea]. Available: https://molview.org/?cid=16211032. [Último acceso: 19 4 2024].

[63] J. V. Kumar y B. C. Pratt, «Compositional analysis of some renewable biofuels,» *American Laboratory,* vol. 28, nº 8, p. 15.20, 1996.

[64] Q. Feng y L. Yunqin, «Integrated processes of anaerobic digestion and pyrolysis for higher bioenergy recovery from lignocellulosic biomass: A brief review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 77, pp. 1272-1287, 2017.

[65] G. P. Romanelli, D. M. Ruiz y G. A. Pasquale, «Pirólisis,» de *Química de la biomasa y los biocombustibles*, Provincia de Buenos Aires, Editorial de la Universidad de La Plata, 2016, pp. 73-80.

[66] R. Pérez Pueyo, Procesado y optimización de espectros Raman mediante técnicas de lógica difusa: Aplicación a la identificación de materiales pictóricos, Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Teoria de Teoría de la Señal y Comunicaciones, 2005.

[67] R. Chandrasekhara Venkata, «The Colour of the Sea,» *Nature,* vol. 108, nº 2716, p. 367, 1921.

[68] G. Turrell, Raman Microscopy: Developments and Applications, London: Academic Press, 1996.

[69] J. Castro Ramos, A. E. Villanueva Luna y C. M. Ortiz Lima, «Espectroscopia Raman y sus aplicaciones,» *ÓPTICA PURA Y APLICADA,* vol. 1, nº 46, pp. 83-95, 2013.

[70] F. J. Recio Cortés, Corrosión de Aceros Inoxidables y Galvanizados de Alta Resistencia, como alternativa a los Aceros Convencionales de Pretensado, Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETCC), 2010.

[71] «Lamparas incandescentes,» Tiposde.com, 25 08 2017. [En línea]. Available: https://www.tiposde.com/lamparas_incandescentes.html. [Último acceso: 13 05 2024].

[72] Texas A&M Engineering Experiment Station, «Raman Confocal Microscope,» Materials Characterization Facility, 2011. [En línea]. Available: https://mcf.tamu.edu/instruments/raman-ftir-confocal-microscope/. [Último acceso: 28 Octubre 2024].

[73] L. Ian R. y E. Howell, Handbook of Raman Spectroscopy From the Research Laboratory to the Process Line, Boca Raton: CRC Press, 2001.

[74] A. Matthew Méndez, . J. G. Penieres Carrillo y F. Ortega Jiménez, Alquinos (monografía), Ciudad de México : Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM, 2023.

[75] J. McMurry, «Alquinos: introducción a la síntesis orgánica,» de *QUÍMICA ORGÁNICA*, México, D.F., Cengage Learning, 2017, pp. 259-283.

[76] W. L.G. Jr, «Reacciones de alquenos y alquinos: Introducción a la síntesis multipasos,» de *Química orgánica*, Ciudad de México, Pearson Educación, 2017, pp. 103-130.

[77] A. O. Lobo, A. A. Martin, E. F. Antunes, V. J. Trava-Airold y E. J. Corat, «CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS CARBONOSOS POR ESPECTROSCOPIA RAMAN,» *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo,* vol. 24, nº 2, pp. 98-103, 2004.

[78] X. &. R. M. Li, «Graphene oxide-based composites as advanced electrode materials for energy storage,» *Chemical Society Reviews,* vol. 47, nº 3, pp. 680-699, 2018.

[79] C. W. X. &. Z. J. Xu, «Graphene-based materials in biomedical applications: Current advances and future outlook,» *Journal of Materials Chemistry B,* vol. 6, nº 30, pp. 4791-4812, 2018.

[80] S. &. S. S. Kumar, «Graphene oxide: A review of its properties and applications.,» *Materials Today Proceedings,* vol. 47, pp. 3991-3999, 2021.

[81] R. &. Z. T. Dong, «Graphene oxide as a catalyst in the water-splitting process for hydrogen generation,» *Energy & Environmental Science,* vol. 8, nº 3, pp. 940-946, 2015.

[82] M. L. Crosbie y D. Chapin, «Hydrogen Production by Nuclear Heat,» *GENES4/ANP2003,* nº 1143, pp. 15-19, 2003.

[83] M. Aguer Hortal y Á. L. Miranda Barreras, EL HIDRÓGENO, Fundamento de un futuro equilibrado, Segunda Edición ed., Madrid: Diaz de Santos, 2012.

[84] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, «siaprendes,» [En línea]. Available: http://siaprendes.siap.gob.mx/contenidos/2/04-platano/contexto-4.html. [Último acceso: 14 Marzo 2023].

[85] D. Bhowmik, S. Duraive, M. Umadevi y K. P. Sampath Kuma, «Traditional and Medicinal Uses of Banana,» *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry,* vol. 1, nº 3, pp. 51-63, 2012.

[86] D. Cruz Lucas, Caracterización y primeros ensayos de pirolisis de ligninas del proceso al sulfito, Cantabria: Escuela tecnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicación, 2018.

[87] A. Bridgewater, «Biomass Fast Pyrolysis,» *Thermal Science,* vol. 8, nº 2, pp. 21-49, 2004.

[88] M. N. d. C. Naturales, «Museo Nacional de Ciencias Naturales,» Enero 2024. [En línea]. Available:

https://www.mncn.csic.es/es/es/colecciones/archivo. [Último acceso: 20 Marzo 2024].

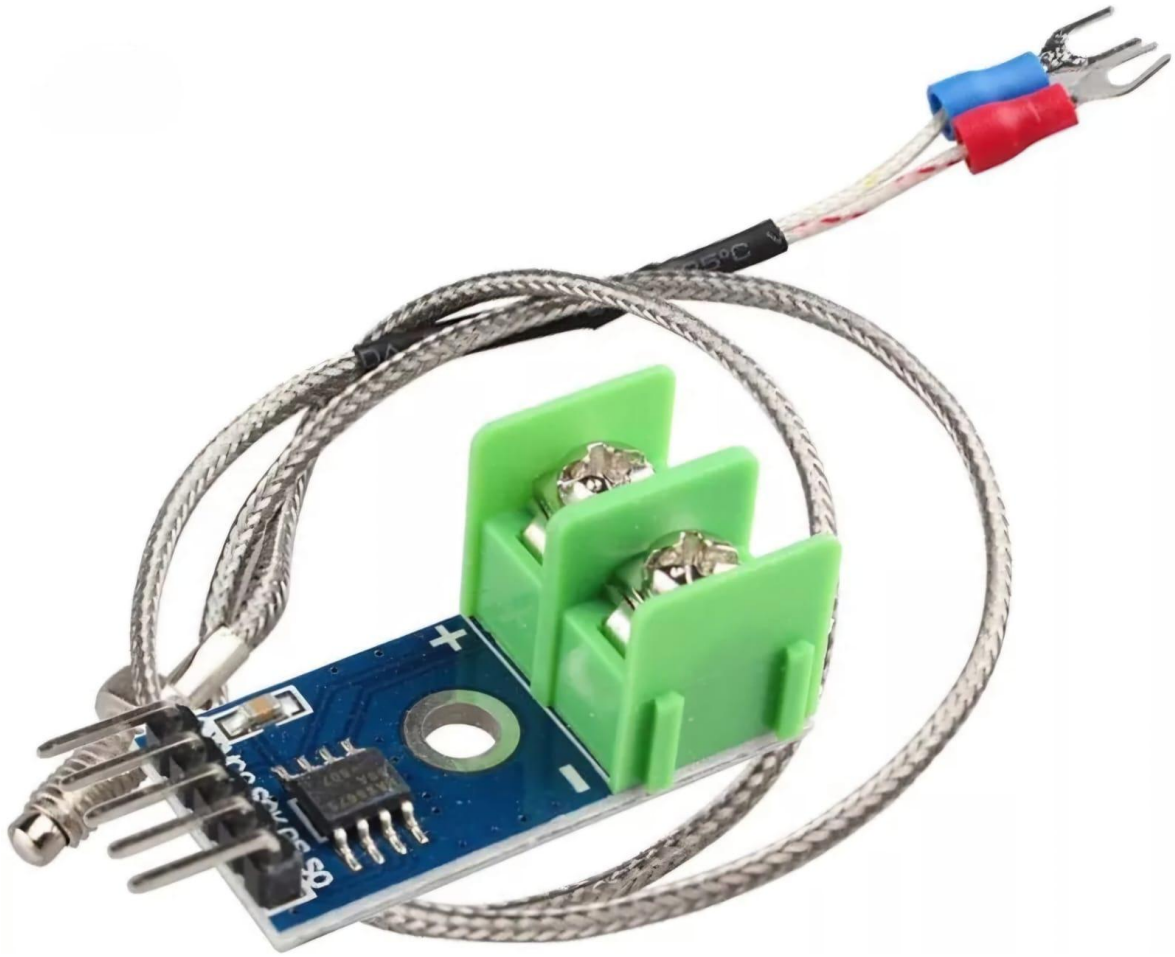
XI. APÉNDICES

Apéndice A: Código empleado para el desarrollo del programa utilizado en la caracterización de la lámpara de xenón.

```
#include <SPI.h>
#include "max6675.h"
#include <BluetoothSerial.h>

BluetoothSerial SerialBT;
const int LEDpin = 13; // Pin del LED

const int thermoCLK = 18; // Pin SCK
const int thermoCS = 5;   // Pin CS
const int thermoDO = 19;  // Pin SO

MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    //Serial.println("Termopar tipo K con MAX6675");
    SerialBT.begin("ESP32_NAD"); // Nombre del dispositivo Bluetooth
    pinMode(LEDpin, OUTPUT);
    //Serial.println("El dispositivo ha iniciado. ¡Empareja con Bluetooth!");
    digitalWrite(LEDpin, HIGH);
}

void loop() {
    if (thermocouple.readCelsius() != 0.0) {
        float tempC = thermocouple.readCelsius();
```

```
        //float tempF = thermocouple.readFahrenheit();
        //Serial.print("Temperatura (°C): ");
        Serial.println(tempC);
        //BT.println(tempC);
        //Serial.print("Temperatura (°F): ");
        //Serial.println(tempF);
    } else {
        Serial.println("Error al leer la temperatura.");
    }
    if (SerialBT.available()) {
        char receivedChar = SerialBT.read();
        if (receivedChar == 'a') {
            digitalWrite(LEDpin, LOW); // Encender el LED
        } else if (receivedChar == 'b') {
            digitalWrite(LEDpin, HIGH); // Apagar el LED
        }
    }
    delay(500); // Espera 1 segundo antes de la siguiente lectura
}
```

Apéndice B: Termopar utilizado para la medición de temperatura y sus especificaciones técnicas.



Apéndice C: Interfaz de LabVIEW empleada para la representación gráfica de la temperatura de la lámpara.