

**OBTENCIÓN DE UN MATERIAL ÓPTICO  
ABSORBEDOR SUSTENTABLE PARA SU  
APLICACIÓN EN RECUBRIMIENTOS  
ABSORBEDORES EN TECNOLOGÍAS  
TERMOSOLARES**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
**MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN  
INGENIERÍA ÓPTICA**

PRESENTA

**ING. PAOLA ELIZABETH MARTÍNEZ MIRELES**

DIRECTOR

**DR. MANUEL IGNACIO PEÑA CRUZ**

CODIRECTOR

**DRA. NANCY GUADALUPE GONZÁLEZ CANCHÉ**

AGUASCALIENTES, AGS, JUNIO, 2023

A mis padres, Claudia y Alfredo, gracias por su apoyo y amor incondicional,  
y por siempre motivarme a cumplir mis sueños y ser mejor persona.

A mi esposo, Angel, por brindarme toda su comprensión, apoyo y  
confianza.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Centro de Investigaciones en Óptica A.C. por la infraestructura y facilidades proporcionadas para realizar el presente trabajo de tesis.

Al Dr. Manuel Peña Cruz y a la Dra. Nancy Guadalupe González Canché, por su dirección, aportes y contribución al presente trabajo de tesis.

Al Dr. Iván Salgado Tránsito por su apoyo en el análisis termogravimétrico de las fuentes de biomasa.

A mi comité tutorial conformado por la Dra. Beatriz Escobar Morales y el Dr. José Gonzalo Carrillo Baeza, por sus valiosas aportaciones.

Al jurado conformado por la Dra. Liliana Pampillón González y el Dr. Iván Salgado Tránsito, por sus aportaciones en la mejora de la presente tesis.

Al Instituto de Ciencia y Tecnología del Estado de Aguascalientes (INCYTEA) por el financiamiento otorgado por el Fondo Estatal de Innovación Tecnológica 2022.

Al centro de Investigación y Asistencia Tecnológica y Diseño del Estado de Jalisco A.C. Sede Sureste a través de la Dra. Neith Aracely Pacheco López y Dra. Soledad Cecilia Pech Cohuo por proporcionar las harinas pulverizadas para la realización de este trabajo.

Al programa Estancias Posdoctorales para Mujeres Indígenas en Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas CONACYT-CIESAS-IDRC Canadá, cuyo presente trabajo de tesis se enmarca en el proyecto “Elaboración y caracterización óptica de pinturas selectivas a base de biocarbones como pigmentos y su implementación en receptores de concentradores parabólicos compuestos de baja temperatura”.

A Salvador Robles Velázquez, por su apoyo en la creación del banco de pruebas. A mi familia y amigos, por su apoyo y cariño que me motivaron en cada momento.

Y a Dios, por permitirme llegar hasta aquí, guiándome, dándome fortaleza y poniendo en mi camino a las personas maravillosas que me acompañan hasta hoy.

## RESUMEN

El aprovechamiento de la energía solar ha logrado posicionarse como una de las alternativas más utilizadas a nivel mundial, gracias a su versatilidad, la cual ha permitido expandir sus usos desde el sector doméstico hasta el industrial, convirtiéndose en una de las mejores opciones para solventar las necesidades energéticas de la sociedad.

Con el objetivo de promover una mejora en la eficiencia optotérmica de los sistemas termosolares, se ha implementado el uso de recubrimientos absorbedores, los cuales permiten aumentar la absorbancia en el rango del espectro solar. Sin embargo, los materiales que constituyen los recubrimientos suelen ser altamente contaminantes y tóxicos, además de requerir equipo especializado y costoso.

A raíz de esta problemática surge el presente proyecto, en el cual se propone el uso de fuentes de biomasa provenientes de residuos agroindustriales como precursoras de partículas de carbón, las cuales son usadas como material óptico absorbedor en la formulación de un recubrimiento sustentable.

Las partículas de carbón obtenidas son caracterizadas morfológica y fisicoquímicamente, permitiendo establecer condiciones adecuadas para la formulación de un recubrimiento, proponiendo temperaturas de pirólisis, selección de ligante y solvente, así como la formulación de la pintura. Finalmente, el recubrimiento fue evaluado para determinar su eficiencia y comprobar si se trata de una alternativa viable.

Con este proyecto se pretende establecer una metodología sencilla y replicable, creando una pintura absorbedora que reducirá el impacto ambiental a comparación de las pinturas comerciales, así mismo, se genera un valor agregado a residuos agroindustriales a través del desarrollo de materiales especializados.

# ÍNDICE

1. Capítulo 1 introducción .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Planteamiento del problema .....	3
1.3 Justificación .....	4
1.4 Hipótesis .....	5
1.5 Objetivos generales y específicos.....	6
1.5.1 Objetivo general.....	6
1.5.2 Objetivos específicos.....	6
1.6 Alcances del proyecto.....	6
2. Capítulo 2 Marco Teórico y Estado del arte.....	7
2.1 Generalidades de las tecnologías termosolares .....	7
2.1.1 Sistemas termosolares sin concentración solar.....	7
2.1.2 Sistemas termosolares con concentración sin seguimiento.....	9
2.1.3 Sistemas termosolares con concentración de seguimiento lineal (1 eje).....	10
2.1.4 Sistemas solares híbrido fotovoltaicos y térmicos (pvt) .....	14
2.1.5 Componentes de un sistema termosolar .....	16
2.2 Recubrimientos absorbedores .....	17
2.2.1 Selectividad espectral .....	18
2.2.2 Tipos de recubrimientos absorbedores solares.....	22
2.2.3 Técnicas de deposición.....	26
2.3 Materiales fototérmicos .....	28
2.4 Antecedentes de materiales base carbón y sus propiedades como material óptico .....	29
2.5 Partículas de carbón obtenidas por pirólisis.....	33
2.5.1 Generalidades del biocarbón.....	34

3. Capítulo 3: Descripción de actividades .....	36
3.1 Metodología .....	36
3.2 Materiales .....	37
3.3 Caracterización y procesamiento de la biomasa.....	37
3.3.1 Pirólisis .....	37
3.4 Caracterización del material base carbón .....	39
3.5 Formulación de pintura .....	41
3.5.1 Elección de agente ligante.....	42
3.5.2 Concentración de pigmento en volumen (pvc).....	43
3.5.3 Metodología para elaboración de pintura.....	44
3.5.4 Preparación de sustratos .....	45
3.6 Caracterización de la pintura absorbadora .....	46
4. Resultados.....	54
4.5 Análisis energético .....	54
4.6 Biomasa .....	56
4.7 Carbón .....	57
4.8 Pintura absorbadora.....	64
4.8.1 Determinación de variables y condiciones para la elaboración de pinturas .....	64
4.8.2 Resultados de pruebas de adherencia .....	66
4.8.4 Propiedades térmicas de la pintura.....	72
4.8.5 Caracterización química de la pintura absorbadora.....	74
4.8.6 Resultados de evaluación de sedimentación .....	75
4.8.8 Resultados preliminares de portamuestras.....	78
4.8.9 Resultados finales de portamuestras.....	84
4.9 Resultados académicos .....	87
5. Conclusiones .....	88
6. Referencias .....	91

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Resumen de sistemas termosolares .....	16
Tabla 2.2 Recubrimientos absorbedores.....	24
Tabla 3.1 Datos técnicos ACRI-TEC WB-19E.....	42
Tabla 3.2 Concentraciones sugeridas para pinturas .....	43
Tabla 4.1 Análisis de composición elemental de SOP600 y AC-COM .....	59
Tabla 4.2 Relación O/C de SOP600 y AC-COM .....	60
Tabla 4.3 Relación H/C de SOP600 y AC-COM.....	60
Tabla 4.4 Formulaciones de prueba.....	64
Tabla 4.5 Concentraciones para formulaciones de pintura. ....	66
Tabla 4.6 Rangos de reflectancia de pinturas con AC-COM con diferentes concentraciones .....	69
Tabla 4.7 Comparación de absorbancias para diversos recubrimientos absorbedores solares.....	77
Tabla 4.8 Configuración de termopares respecto a su posición.....	79
Tabla 4.9 Promedios de temperaturas alcanzadas por los termopares.....	82
Tabla 4.10 Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales .....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema de un colector de placa plana y sus componentes.....	8
Figura 2.2 Colector de tubo evacuado.....	9
Figura 2.3 Geometría de un CPC.....	10
Figura 2.4 Diagrama de Sistema de concentración de espejos Fresnel.....	11
Figura 2.5 Esquema de un Concentrador Cilindro Parabólico.....	12

Figura 2.6 Esquema de Sistema de torre central .....	13
Figura 2.7 Esquema de sistema de concentración solar de Disco Stirling .....	13
Figura 2.8 Esquema de un Sistema PVT .....	14
Figura 2.9 Clasificación de Sistemas PVT.....	15
Figura 2.10 Espectro solar y radiación de un cuerpo negro a diferentes temperaturas .....	19
Figura 2.11 Funcionamiento de un recubrimiento selectivo aplicado a un concentrado cilindro parabólico .....	21
Figura 2.12 Esquema de un absorbedor multicapa .....	23
Figura 2.13 Proceso de Deposición Física de Vapor.....	27
Figura 2.14 Técnica de dip coating o inmersión .....	28
Figura 2.15 Espectro Raman de la cáscara de naranja (SOPRAW) y los biocarbones SOP400, SOP600 Y SOP800 .....	32
Figura 2.16 Reflectancia difusa en UV-VIS-NIR del SOPRAW y los biocarbones obtenidos.....	33
Figura 2.17 Gráficas de análisis térmico de SOP a) Curva TGA-DTGA del SOPRAW; b) Curva DSC del SOPRAW.....	34
Figura 3.1 Metodología utilizada en el proyecto .....	36
Figura 3.2 Impacto de la temperatura de pirólisis en el rendimiento del biocarbón de varios materiales de biomasa.....	37
Figura 3.3. Arreglo experimental para pirólisis. 1) Entrada de flujo de nitrógeno, 2) Horno tubular, 3) Salida de gases y aceites, 4) Trampa de gases, 5) Salida de gases al exterior y 6) Muestra de harina de cáscara de naranja dentro del tubo de cuarzo .....	38
Figura 3.4 Analizador termogravimétrico NETZSCH STA 449F5.....	39
Figura 3.5 Espectrómetro FTIR Tensor II de Bruker.....	40
Figura 3.6 Difractómetro de rayos X modelo D2 PHASER marca Bruker .....	40
Figura 3.7 Analizador de elementos orgánicos Flash 2000 CHNS-O Thermo Scientific .....	41



Figura 3.8 Espectrofotómetro Cary 5000 UV-Vis-NIR .....	41
Figura 3.9 Disruptor Ultrasónico de Laboratorio UCD-150 .....	44
Figura 3.10 Homogeneizador de Alta Velocidad FSH-2A.....	45
Figura 3.11 Pesaje de pintura en molde antiadherente para formación de películas.....	45
Figura 3.12 a) Elcometer 3520 Baker Film Applicator, b) Indicador de grosor de película, c) Aplicación de pintura sobre sustrato.....	46
Figura 3.13 Kit de prueba de adhesión Elcometer.....	46
Figura 3.14 Cortador de trama cruzada, acercamiento a navaja.....	47
Figura 3.15 Paso 1 Procedimiento para prueba de adherencia (Cortes paralelos sobre recubrimiento) .....	47
Figura 3.16 Paso 2 Prueba de adherencia (Creación de entramado en revestimiento) .....	47
Figura 3.17 Paso 3 Procedimiento para prueba de adherencia (limpieza de residuos) .....	48
Figura 3.18 Paso 4 Procedimiento para prueba de adherencia (aplicación de cinta adhesiva).....	48
Figura 3.19 Paso 5 Procedimiento para prueba de adherencia (Retiro de cinta) ..	48
Figura 3.20 Clasificación de los resultados de prueba de adhesión.....	49
Figura 3.21 Vista superior de portamuestras a) Sin cubierta de vidrio, b) Con cubierta de vidrio.....	51
Figura 3.22 Vista frontal del portamuestras.....	51
Figura 3.23 Marco de portamuestras.....	51
Figura 3.24 Componentes de portamuestras a) Termopares tipo K, b) Data logger CR310, c) Data logger CR1000x.....	52
Figura 3.25 Sistema de carga, a) Batería recargable, b) Fuente de alimentación TXL 035-0512D.....	52
Figura 4.1 Curvas termogravimétricas de AC-COM y SOP600.....	57

Figura 4.2 Espectros FTIR de SOP600 y AC-COM.....	59
Figura 4.3 Difractograma de SOP600 .....	61
Figura 4.4 Difractograma de AC-COM .....	61
Figura 4.5 Reflectancia difusa UV-Vis-NIR de muestras de SOP600 y AC-COM .	63
Figura 4.6 Película de pintura.....	66
Figura 4.7 Formulación 20% C, 5% E, 1% D, Placa cubierta y prueba de adherencia .....	66
Figura 4.8 Formulación 20% C, 10% E, 1% D, Placa cubierta y prueba de adherencia .....	67
Figura 4.9 Formulación 40% C, 5% E, 1% D, Placa cubierta y prueba de adherencia .....	67
Figura 4.10 Formulación 40% C, 10% E, 1% D, Placa cubierta y prueba de adherencia .....	68
Figura 4.11 Formulación 40% C, 10% E, 10% D, Placa cubierta y prueba de adherencia .....	68
Figura 4.12 Reflectancias difusa de pinturas con AC-COM .....	69
Figura 4.13 Pintura con SOP600, 20%C, 1%D, 5%E (SOP600 sin proceso de molienda) .....	70
Figura 4.14 Pintura con SOP600, 20%C, 1%D, 10%E (SOP600 sin proceso de molienda).....	70
Figura 4.15 Molienda de SOP600, antes y después .....	70
Figura 4.16 Pintura con SOP600, 20%C, 1%D, 5%E (SOP600 con proceso de molienda).....	71
Figura 4.17 Pintura con SOP600, 20%C, 1%D, 10%E (SOP600 con proceso de molienda).....	71
Figura 4.18 Pinturas de SOP600 antes y después de proceso de molienda.....	71
Figura 4.19 Formulación de SOP600 40%C, 1%D, 5%E .....	72

Figura 4.20 Formulación de SOP600 40%C, 1%D, 10%E .....	72
Figura 4.21 Curvas termogravimétricas de pinturas con SOP600, AC-COM_M y Resina acrílica .....	73
Figura 4.22 Derivada de la masa de pinturas con SOP600, AC-COM_M y Resina acrílica .....	73
Figura 4.23 a) Espectros ATR-FTIR de AC-COM, AC-COM 20C 5E y Resina acrílica, b) Patrones DRX de AC-COM, AC-COM 20C 5E y Resina acrílica.....	74
Figura 4.24 Evaluación de sedimentación día inicial a) Formulación 20%C, 5%E, b) Formulación 20%C, 10%E, c) Formulación 40%C, 5%E, d) Formulación 40%C, 10%E .....	76
Figura 4.25 Evaluación de sedimentación 24 horas después a) Formulación 20%C, 5%E, b) Formulación 20%C, 10%E, c) Formulación 40%C, 5%E, d) Formulación 40%C, 10%E.....	76
Figura 4.26 Evaluación de sedimentación 48 horas después a) Formulación 20%C, 5%E, b) Formulación 20%C, 10%E, c) Formulación 40%C, 5%E, d) Formulación 40%C, 10%E.....	76
Figura 4.27 Absorbancia de recubrimientos de SOP600.....	77
Figura 4.28 Banco de pruebas .....	78
Figura 4.29 Configuración de placas sobre banco de pruebas .....	78
Figura 4.30 Resultados de temperaturas de placas del 27/07/22 al 11/08/22 .....	79
Figura 4.31 Temperatura de sustratos recubiertos del 28 de julio del 2022 .....	80
Figura 4.32 Temperatura de termopares de fila inferior del día 28 de julio del 2022.....	81
Figura 4.33 Temperatura de termopares de fila superior del día 28 de julio del 2022 .....	81
Figura 4.34 Configuración final de portamuestras.....	84
Figura 4.35 Resultados de temperaturas de placas cubiertas con AC-COM del 12/11/22 al 19/12/22.....	84
Figura 4.36 Resultados de temperaturas de placas cubiertas con AC-COM el 22 de noviembre del 2022.....	85

Figura 4.37 Resultados de temperaturas de placas cubiertas con SOP600 del 12/11/22 al 19/12/22.....86

Figura 4.38 Resultados de temperaturas de placas cubiertas con SOP600 el 22 de noviembre del 2022.....87

## **ANEXOS**

Anexo A: Temperaturas promedios de termopares del 27 de julio al 14 de septiembre del 2022

Anexo B: Temperaturas promedios de termopares del 12 de noviembre al 19 de diciembre del 2022

# 1. CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

La medición de la radiación solar es de gran importancia en un amplio rango de aplicaciones, ejemplo de ello es su uso como fuente de energía alterna para generación de electricidad y calor. La constante solar hace referencia a la cantidad de energía solar que atraviesa una superficie perpendicular (en la atmósfera) a los rayos a una distancia media entre la Tierra y el Sol (1 UA). El valor promedio de la constante solar es aproximadamente  $1367 \text{ W/m}^2$ , sin embargo, la intensidad de energía que llega a la superficie terrestre debido a pérdidas relacionadas con la interacción de los fotones con la atmósfera es en promedio de  $800$  a  $900 \text{ W/m}^2$ . La energía de un solo día brindada por el Sol permitiría cubrir la demanda energética mundial por más de 20 años (PROMÉXICO, IER, 2017).

A pesar de que el principal beneficio que recibimos del Sol es la luz, la energía también puede ser transformada en calor y electricidad. En las últimas décadas, la conversión de energía solar a electricidad ha sido posible gracias a que las tecnologías fotovoltaicas han mostrado un enorme avance mediante el incremento en la eficiencia de varios tipos de celdas solares, además de una considerable reducción en costos y cantidad de energía necesarios para la producción de paneles fotovoltaicos. Respecto a la generación de calor mediante energía solar, es posible capturar el calor recibido del sol mediante procesos relativamente sencillos y a partir de una gran variedad de equipos. Actualmente, estos procesos pueden ser utilizados para aplicaciones domésticas, como el calentamiento de agua y acondicionamiento de espacios, pero también puede aplicarse en procesos industriales que permiten la generación de electricidad.

El uso de la energía térmica ha implicado la adición de mejoras dirigidas a sus procesos y componentes, con el objetivo de alcanzar mayores eficiencias de conversión. Ejemplo de esto son los sistemas de seguimiento, tratamientos para los reflectores y recubrimientos absorbedores.

En el caso de éstos últimos, recae gran importancia ya que éstos juegan un papel fundamental en la eficiencia óptica del sistema completo, y de ellos depende que la radiación pueda ser absorbida por el receptor y se lleve a cabo una conversión a calor, mismo que se transfiere a un fluido de trabajo.

Sin embargo, siguiendo la línea del aprovechamiento de fuentes renovables con el objetivo de contribuir al desarrollo sustentable, es necesario establecer métodos de bajo impacto ambiental para la formulación de los recubrimientos absorbedores, ya que la producción de éstos involucra la participación de materiales tóxicos, además de métodos tanto de producción como de deposición, complejos y contaminantes, que representan un riesgo para la salud de los operadores así como para el medio ambiente.

El uso de partículas de carbón provenientes de fuentes de biomasa han tenido una gran variedad de aplicaciones en los últimos años, al ser activadas químicamente se ha logrado mejorar sus propiedades, pues la formación de poros ha favorecido su uso como absorbedora de metales y colorantes del agua (Yu et al., 2018), materia prima de supercapacitores para el almacenamiento de energía (Kaipannan et al., 2017; Wang & Kaskel, 2012) y recientemente se han hecho investigaciones para usar las partículas como pigmentos en la formulación de pinturas absorbedoras al poseer propiedades ópticas favorables (López-Sosa et al., 2020).

El aprovechamiento de la biomasa como precursora de partículas de carbón para posteriormente usarla en la formulación de pinturas absorbedores constituye una alternativa atractiva, ya que cualquier residuo orgánico puede fungir como precursor de materiales carbonosos, lo cual se traduce como menores costos y mayor disponibilidad, además de generar un valor agregado a los residuos.

Otra ventaja que poseen estos materiales son sus métodos sencillos para obtenerse, su versatilidad y su bajo impacto ambiental.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La evolución de las tecnologías de aprovechamiento de energía solar, así como su ramificación en distintas aplicaciones, ha requerido de mejoras tanto en los procesos de conversión como en sus materiales para alcanzar eficiencias mayores. Una de estas mejoras fueron los recubrimientos absorbedores, los cuales tienen su origen en la década de los 50's por el físico Harry Zvi Tabor (K. Xu et al., 2020).

Sin embargo, el uso de estos recubrimientos implicaba métodos contaminantes y materiales tóxicos como el níquel y cromo (Joly et al., 2013), además de que no poseían estabilidad térmica y química para alcanzar los requisitos de aplicación y producción. Posteriormente, nuevos métodos como la Deposición Física de Vapor (PVD por sus siglas en inglés), revestimiento de iones y bombardeo catódico (Sputtering) fueron ganando más atención para la producción de recubrimientos absorbedores solares (K. Xu et al., 2020).

El uso de nuevos materiales y métodos de deposición han permitido llegar a recubrimientos con al menos el 95% de absorción y una emitancia menor al 0.05. Sin embargo, gran parte de los métodos de deposición requieren de equipo especializado, métodos complejos que requieren condiciones estrictas, así como uso de materia prima de alto costo y con gran impacto ambiental (Joly et al., 2013). Un ejemplo de esto es el proceso de galvanoplastia, en el cual se emplean iones de cromo VI (Cr VI), por lo que es primordial contar con los cuidados pertinentes en el manejo de estos componentes con el objetivo de reducir el impacto ambiental, pues a pesar de que los recubrimientos depositados mediante este método son duraderos, conlleva un gran riesgo al ambiente debido a sus precursores utilizados. Por otra parte, el cromo VI (Cr VI) es altamente tóxico y dañino para la salud, provocando problemas respiratorios, daños en hígado y riñones, e incluso riesgo de cáncer (ATSDR, 2021; Joly et al., 2013).

Entre la variedad de recubrimientos que existe, el uso de pinturas selectivas resalta gracias a sus bajos costos y métodos de deposición sencillos como es el caso de aplicación por inmersión y spray (Kennedy, 2002). Además, al estar formadas por pocos compuestos (pigmentos, resina y solvente) es posible producir pinturas de bajo costo modificando sus materiales comunes, siendo las partículas de base carbón una

alternativa de pigmento, gracias a sus propiedades ópticas y mecanismos de fotoconversión.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Tras la crisis del petróleo en los años 70's, las energías renovables han tomado un papel cada vez más importante en el ámbito de generación de energía; para el año 2019 la capacidad de energía instalada proveniente de fuentes renovables alcanzó más de 200 Giga watts (GW), la cual ha sido el mayor incremento hasta la fecha (REN21, 2020).

Respecto a la energía solar, la capacidad instalada de sistemas fotovoltaicos para el año 2019 fue de 627 GW, para energía de concentración solar térmica fue de 6,2 GW y en relación con los sistemas termosolares para calentamiento y enfriamiento, ésta fue de 26.1 GW (REN21, 2020).

Gracias a la zona en la que se encuentra México, éste recibe un promedio de 5.5 kWh/m<sup>2</sup> de radiación diariamente, por lo que se posiciona como uno de los países con mejor recurso solar a nivel mundial, lo cual lo vuelve un candidato apto para el aprovechamiento de la energía solar (PROMÉXICO, IER, 2017).

La energía térmica es de gran importancia tanto en el sector doméstico como en el industrial. Entre sus principales usos se encuentra el calentamiento de agua y calefacción, refrigeración y calor de procesos industriales, tales como pasteurización, esterilización, secado, blanqueamiento y teñido de textiles, destilación, compresión y procesos de transformación de materiales. En el año 2019 la demanda de energía térmica constituyó el 51% de la energía final consumida, de la cual alrededor del 11.2% fue suplida por energías renovables. La mayor parte de los procesos industriales requieren calor en temperaturas que los sistemas solares térmicos pueden proporcionar, siendo los rangos de operación de 150 hasta 400 °C. El uso de Calor Solar para Procesos Industriales (SHIP, por sus siglas en inglés) permite reducir la dependencia de los combustibles fósiles, además de ahorrar costos a largo plazo, de manera que es una alternativa viable, sobre todo en nuevas plantas industriales, al integrar los sistemas termosolares en la construcción (IEA-ETSAP & IRENA, 2015; REN21, 2022).

Existen dos parámetros que definen la eficiencia de los sistemas termosolares: la eficiencia óptica de la concentración solar en el receptor, y la capacidad del receptor de



absorber y transmitir la energía radiativa al fluido de trabajo. En el caso del segundo parámetro, los recubrimientos absorbedores solares son utilizados para lograr una alta absorción en la región UV-Vis-NIR y una baja emitancia térmica en el espectro infrarrojo; esto se conoce como “selectividad espectral”.

A pesar de que los recubrimientos absorbedores cumplen con un papel muy importante para mejorar la eficiencia del sistema termosolar, éstos cuentan con varios inconvenientes al requerir equipos especializados, procesos complejos y materia prima tóxica; por lo tanto, su producción requiere de grandes inversiones económicas, así como personal capacitado para el manejo de compuestos y procesos peligrosos y contaminantes.

Bajo este contexto, el desarrollo de un recubrimiento absorbedor realizado a partir de materiales de bajo costo y con métodos de aplicación sencillos y de menor impacto ambiental representa una alternativa interesante al uso de recubrimientos absorbedores convencionales.

Es por ello que se propone como una nueva alternativa el uso de materiales de base carbón provenientes de la pirólisis de fuentes de biomasa como precursoras de pigmentos para la posterior formulación de pinturas selectivas. A pesar de ser una aplicación nueva, ya existen datos y resultados relacionados con sus propiedades ópticas, las cuales resultan favorables para su uso en este campo.

En el presente trabajo (López-Sosa et al., 2020) se han reportado resultados en los cuales se determina que la capacidad de absorción, así como la conductividad térmica del hollín muestra altas eficiencias como recubrimientos para aplicaciones en tecnologías termosolares (López-Sosa et al., 2020). También se ha demostrado que los materiales de base carbón poseen propiedades de absorción de contaminantes gracias a la formación de poros en su estructura (Kamsonlian et al., 2011) y también tienen aplicaciones para el almacenamiento de energía e hidrógeno (Kaipannan et al., 2017; Wang & Kaskel, 2012); por otra parte, resulta como una nueva alternativa para el tratamiento de residuos agroindustriales, brindándole un valor agregado a éstos.

#### **1.4 HIPÓTESIS**

Los biocarbones obtenidos a partir de la pirólisis de residuos de cáscara de *Citrus aurantium* poseen propiedades de absorción óptica y pueden ser utilizadas como

pigmento en la formulación de recubrimientos absorbedores solares.

## **1.5 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS**

### **1.5.1 Objetivo general**

Sintetizar un material con propiedades de absorción solar a partir de un pigmento hecho de partículas de carbón obtenidas de la cáscara de *Citrus aurantium* para la formulación de un recubrimiento absorbedor solar en tecnologías termosolares.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Obtener partículas de carbón a través de la pirólisis de los residuos de *Citrus aurantium*.
- Caracterizar morfológica y fisicoquímicamente a las partículas de biocarbón obtenidas.
- Incorporar las partículas de carbón obtenidas a un agente ligante compatible para la formulación del recubrimiento absorbedor.
- Estudiar las propiedades de adherencia de los recubrimientos formulados sobre sustratos metálicos mediante su caracterización morfológica y fisicoquímica.
- Determinar las propiedades ópticas y térmicas del recubrimiento absorbedor, evaluando su desempeño al exponer al ambiente sustratos recubiertos con la pintura obtenida, así como materiales de referencia para su comparación.
- Realizar pruebas de intemperismo acelerado y natural.

## **1.6 ALCANCES DEL PROYECTO**

Se pretende formular un recubrimiento absorbedor solar utilizando como pigmento el producto de la pirólisis de la cáscara del *Citrus aurantium*. Así mismo, se espera realizar la caracterización opto térmica del recubrimiento obtenido.

## 2. CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

### 2.1 GENERALIDADES DE LAS TECNOLOGÍAS TERMOSOLARES

La energía solar es aquella aprovechada mediante la radiación solar, la cual viaja a través del espacio en forma de radiación electromagnética, llegando a la atmósfera una pequeña parte. Esta puede llegar de tres formas diferentes: radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada (Guez, 2008).

La energía solar se puede clasificar en dos tipos: la energía fotovoltaica y la termosolar. Cuando se habla de energía termosolar, se hace referencia al aprovechamiento de la energía solar con el fin de generar calor a través del uso de colectores o concentradores solares. Este calor puede ser utilizado directamente para procesos industriales, calentamiento de agua, cocción de alimentos, etc., o también puede generar electricidad a partir de centrales termoeléctricas, las cuales masifican el uso de concentradores para producir suficiente calor, el cual se transfiere a un fluido de trabajo y es usado posteriormente en turbinas generadoras de electricidad.

Las tecnologías termosolares pueden clasificarse en función a su temperatura de operación, sistema de seguimiento y rango de concentración. Generalmente los sistemas de concentración con seguimiento son los que alcanzan mayores temperaturas. Existen gran variedad de sistemas termosolares, los cuales pueden ser instalados de acuerdo a la demanda del sector. A continuación, se presentarán las principales tecnologías termosolares, clasificadas con base en su sistema de seguimiento y rango de concentración.

#### 2.1.1 Sistemas termosolares sin concentración solar

Los sistemas termosolares (también llamados colectores solares) pueden suplir demandas de calor mínimas, alcanzando menos de 85 °C, lo cual resulta útil para calentamiento de piscinas, uso doméstico de agua y algunas actividades industriales. Operan con radiación directa y difusa, lo cual les permite alcanzar mayor eficacia en ángulos de incidencia bajos. Este tipo de colectores no poseen un sistema de

concentración, y entre éstos se encuentran los colectores planos y los colectores de tubos evacuados (SENER, 2018).

#### a) Calentador plano

Suele tener aplicaciones de baja temperatura, como calentamiento de agua sanitaria; su rango de temperaturas está entre 30 y 60 °C con una eficiencia promedio del 40 al 60% (Nandwani, 2005).

El funcionamiento de este sistema se basa en las leyes básicas de radiación, en donde una parte de los rayos se absorben al incidir sobre una superficie transparente, otra parte se refleja y otra se transmite. Cuando la energía es transmitida de la cubierta hacia la placa absorbidora se absorbe una parte de la radiación y se convierte en calor, el cual se transfiere a los tubos por donde circula el agua o el fluido caloportador dependiendo de la aplicación (Fauroux et al., 2016). Para reducir las pérdidas de calor, el colector posee aislamiento en el fondo y en los laterales de la carcasa, tal como se observa en la Figura 2.1 (Nandwani, 2005).

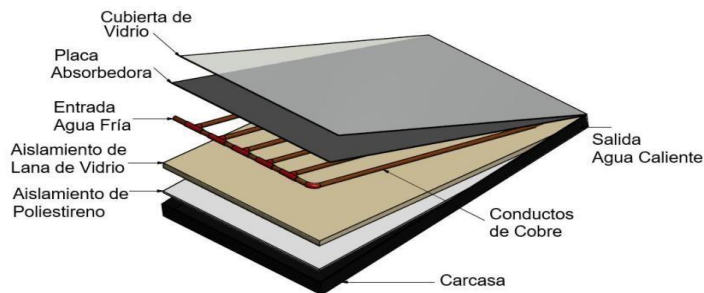


Figura 2.1 Esquema de un colector de placa plana y sus componentes

Fuente: Acosta, G.I., Abril, F.X., & Idrovo, G.E. (2017). Diseño de dos bancos de prueba para colectores solares de placa plana.

#### b) Calentador de tubo evacuado

Este sistema se encuentra conformado por tubos de vidrio sellados al vacío (lo que evita pérdidas de calor por conducción y convección), que contienen una placa absorbidora fundida a un tubo de calor (Figura 2.2). La radiación solar es absorbida por la placa absorbidora y el calor producido en el exterior del tubo se transfiere al fluido de transferencia de un sistema de agua caliente (Romero Gómez & Alfaro Ayala, 2015; SENER, 2018).

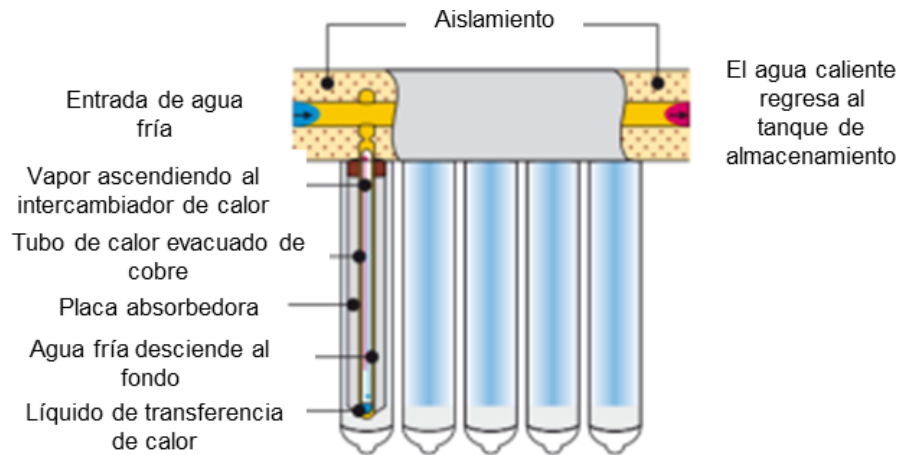


Figura 2.2 Colector de tubo evacuado

Fuente: IEA. (2012) MRT de calentamiento y enfriamiento solar

Este calentador puede clasificarse a su vez en tres tipos: de tubos de cambio de fase (Heat Pipe), terminación de tubos en U y tubos de termosifón; éstos últimos son de los más utilizados, y como su nombre lo menciona, funcionan bajo el efecto termosifón, el cual ocurre cuando el fluido se mueve dentro de los tubos evacuados debido a la diferencia de densidades relacionadas con la diferencia de temperatura, donde un líquido frío es más denso que uno caliente (Romero Gómez & Alfaro Ayala, 2015).

### 2.1.2 Sistemas termosolares con concentración sin seguimiento

También conocidos como concentradores de no imagen, este tipo de sistemas poseen la ventaja de lograr la concentración solar sin emplear sistemas de seguimiento, lo cual permite disminuir el costo del sistema, volviéndolo un tipo de concentrador muy atractivo para diversas aplicaciones.

#### a) Concentrador Parabólico Compuesto (CPC)

Los sistemas CPC son concentradores compuestos por dos superficies reflectoras parabólicas simétricas, las cuales están dispuestas de tal manera que un receptor plano o cilíndrico se encuentra sobre la línea que une el foco de las dos parábolas, y el foco de cada parábola se posiciona en el extremo contrario del receptor. Su geometría se observa en la Figura 2.3 (Villegas, 2009).

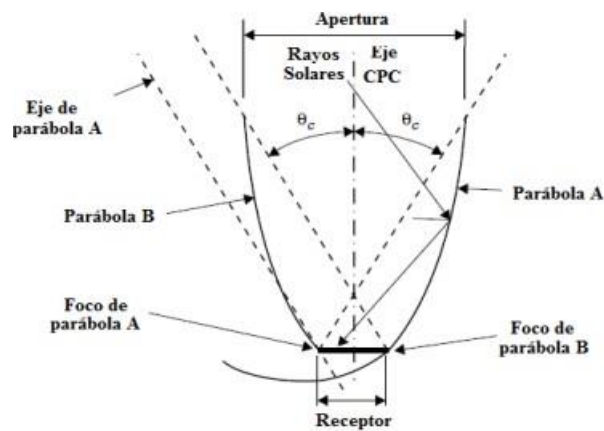


Figura 2.3 Geometría de un CPC de receptor plano

Fuente: Kalogirou, S. (2009) Solar energy engineering: processes and systems

Estos colectores permiten reflejar al receptor lineal toda la radiación incidente que es captada mediante reflexiones internas, permitiendo que cualquier radiación solar que entre al colector dentro de su ángulo de aceptación ( $2\theta_c$ ), llegue a la superficie receptora que se encuentra al fondo del sistema (Echevarria Lopez, 2011).

### 2.1.3 Sistemas termosolares con concentración de seguimiento lineal (1 eje)

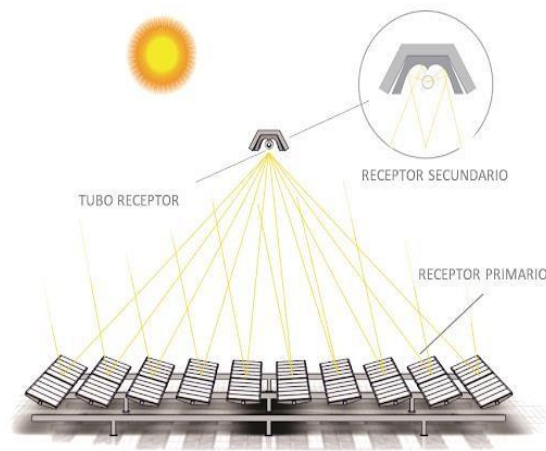
El mecanismo de las tecnologías termosolares con concentración permiten centralizar la luz del sol desde una superficie grande de apertura hacia un área reducida mediante el uso de espejos o lentes. Al concentrar la luz, ésta se convierte en calor alcanzando temperaturas mayores a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , clasificándose en tecnologías de media a altas temperatura. Por otra parte, las tecnologías termosolares de concentración pueden categorizarse según su tipo de seguimiento, siendo de dos tipos: lineal (o de un eje) o puntual (dos ejes). En el caso de los concentradores lineales, éstos siguen al sol a lo largo de un solo eje y focalizan la irradiación en un receptor lineal. Las tecnologías pertenecientes a esta categoría se presentan a continuación (SENER, 2018).

#### a) Concentrador tipo Reflector Fresnel

Es uno de los cuatro tipos de concentradores más usados para el aprovechamiento de la energía solar en temperaturas medias y altas. A pesar de que no es de los que alcanzan mayores eficiencias de conversión, su diseño sencillo y bajos costos lo hacen de interés (Coll, 2017).

Su principio se basa en recibir la radiación solar incidente en sus espejos Fresnel y redireccionarla hacia el receptor secundario, el cual hace que ésta incida sobre un tubo receptor donde es absorbida gracias a una superficie selectiva. Posteriormente, el calor absorbido se transmite a un fluido de trabajo y este calor puede ser utilizado para diversas aplicaciones, como podría ser el suministro de energía térmica en un sistema de aire acondicionado solar (Lara et al., 2013).

La temperatura de operación de una central eléctrica que opera con esta tecnología se encuentra en el rango de 250 a 390 °C y su concentración es mayor a 60 soles. La eficiencia máxima de planta es del 18% (Kuravi et al., 2013). La Figura 2.4 muestra los principales componentes de un sistema de espejos Fresnel.



*Figura 2.4 Diagrama de Sistema de concentración de espejos Fresnel*

Fuente: Millennium Energy Systems, Solar Térmica Fresnel

#### b) Concentrador cilindro parabólico

En este tipo de tecnología, la radiación solar es reflejada a través de reflectores parabólicamente curvados hacia un tubo absorbedor que pasa a lo largo del sistema, tal como se muestra en la Figura 2.5. El calor es utilizado para aumentar la temperatura de un fluido de transferencia que fluye por el tubo, y la energía radiativa absorbida suele ser aplicada para la generación de electricidad (Network, 2018).

Su rango de temperatura de operación va de 290 a 550 °C, y tiene una concentración de 70 a 80 soles con una eficiencia de planta máxima de 14 a 20% (Kuravi et al., 2013).

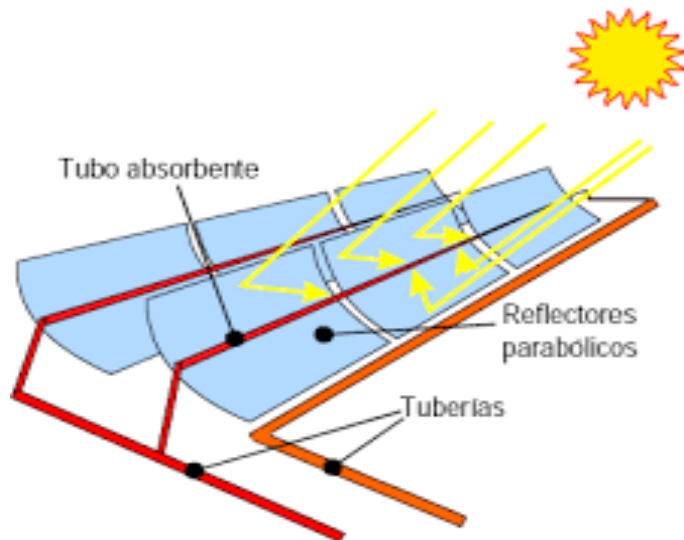


Figura 2.5 Esquema de un Concentrador Cilindro Parabólico

Fuente: García, S. "Concentradores cilindro parabólicos"

#### 4.5.1 Sistemas termosolares con concentración de seguimiento Puntual (2 ejes)

Los sistemas termosolares de seguimiento puntual rastrean al sol a lo largo de dos ejes, y mediante los reflectores, enfocan la irradiación en un receptor de un solo punto, lo cual permite alcanzar temperaturas más altas. Los sistemas de este tipo son los siguientes:

##### a) Sistema de torre central

Está formada por un conjunto de espejos planos llamados heliostatos, los cuales van cambiando su dirección según la posición del sol, de manera que lo van siguiendo a lo largo del día. Estos reflejan la radiación solar hacia el receptor central, el cual se encuentra en lo alto de una torre. En el receptor, un fluido caloportador extrae el calor y lo trasfiere al bloque de generación o al sistema de almacenamiento de energía. En el bloque de generación, la energía térmica del campo solar se utiliza para generar el vapor, mismo que se utiliza para impulsar una turbinageneradora de electricidad (Tian & Zhao, 2013).

El rango de temperatura de operación va de 250 a 650 °C y su concentración es mayor a 1000 soles (Kuravi et al., 2013). El esquema de este sistema se observa en la Figura 2.6.



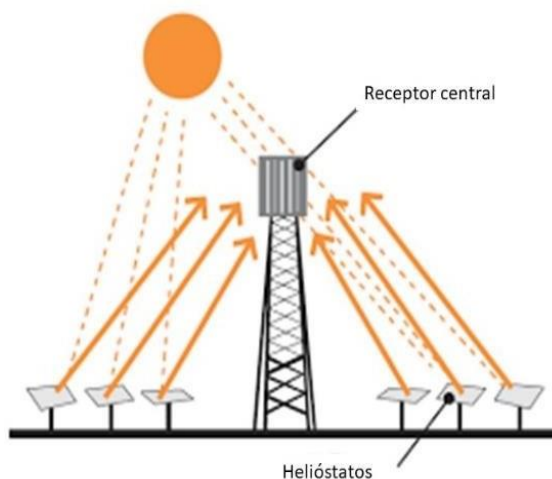


Figura 2.6 Esquema de Sistema de torre central

Fuente: Reyes, C. (2012), "Influencia del almacenamiento térmico en el desempeño de una planta termosolar para la generación de electricidad".

#### b) Disco Stirling

También llamado colector de disco parabólico está diseñado con un arreglo de espejos parabólicos en forma de disco para reflejar la energía solar en un receptor localizado en el punto focal del disco. El fluido de transferencia que se encuentra en el receptor es calentado a altas temperaturas y presiones, para posteriormente generar electricidad en un pequeño motor tipo Stirling (Tian & Zhao, 2013).

Su temperatura de operación va de 550 a 750 °C, posee una concentración mayor a 1300 soles y su eficiencia de planta máxima es de casi 30% (Kuravi et al., 2013).

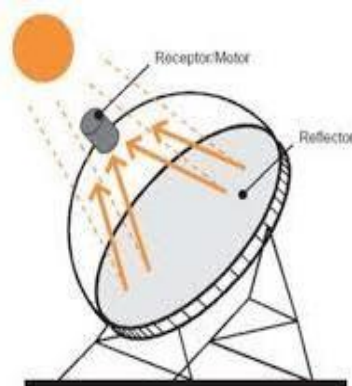


Figura 2.7 Esquema de sistema de concentración solar de Disco Stirling

Fuente: Legajo, F., Legajo, C. "Obtención de energía eléctrica mediante sistema Disco parabólico- Motor Stirling"

### 2.1.4 Sistemas solares híbrido fotovoltaicos y térmicos (PVT)

Los sistemas PVT son tecnologías constituidas por células fotovoltaicas (CFV) y captadores solares en un mismo panel, con el propósito de convertir la radiación solar en electricidad y energía térmica. En estas tecnologías, el calor es aprovechado a la par de que las CFV se enfrían con el fin de evitar pérdida de eficiencia eléctrica relacionada al aumento de temperatura del panel. La mayoría de los sistemas híbridos están diseñados para operar con temperaturas menores a la temperatura de operación máxima de las CFV, de manera que su eficiencia térmica es inferior a la que se podría alcanzar con un sistema termosolar puro; sin embargo, una de las ventajas de los sistemas PVT es su versatilidad y flexibilidad de diseño que permite potenciar la producción de calor o electricidad, en función a las demandas energéticas (Lozano et al., 2019). Sin embargo, a diferencia de los sistemas termosolares, este tipo de tecnología utiliza su placa absorbidora para captar y transferir el calor y no para absorber la radiación solar, por lo tanto, no es necesario la aplicación de un recubrimiento absorbedor en este tipo de sistema.

El panel PVT está compuesto de un módulo fotovoltaico con una placa absorbidora en la parte posterior, como se observa en la Figura 2.8. El calor obtenido en el captador solar puede usarse en aplicaciones de agua caliente sanitaria, calefacción y/o refrigeración.

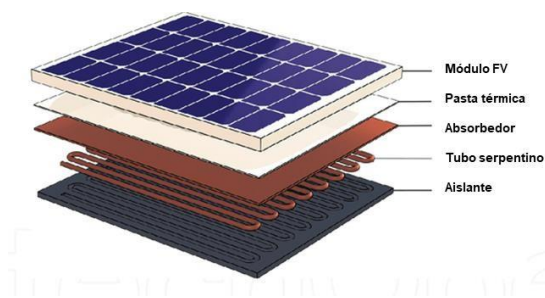


Figura 2.8 Esquema de un sistema PVT

Fuente: Farzanehnia, A., Sardarabadi, M. (2019) Exergy in Photovoltaic/Thermal Nanofluid-Bases Collector Systems

Los sistemas PVT pueden clasificarse según su sistema de concentración o su fluido de trabajo. El esquema de la Figura 2.9 muestra los tipos de colectores PVT.

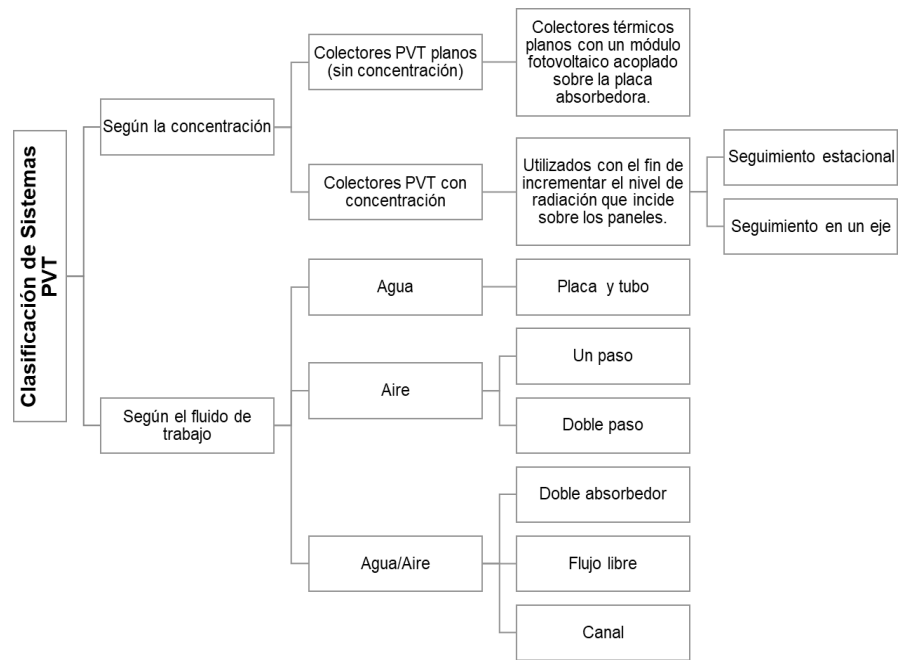


Figura 2.9 Clasificación de Sistemas PVT

Fuentes: González-Peña, et al. (2015) Clasificación de los paneles solares híbridos (PVT)

Navarro, E. (2010) Aplicación de paneles híbridos PV/T con concentración para trigeneración en viviendas unifamiliares.

Sus temperaturas de operación varían según sus componentes y tipo de aislamiento, en el caso de los sistemas PVT sin concentración, sus rangos de temperaturas van de 40 a 60 °C, mientras que en el caso de los módulos PVT con concentración, pueden alcanzar hasta los 90 °C (Lozano et al., 2019).

El aumentar la concentración trae como consecuencia que las CFV se sometan a un flujo de calor elevado, por lo que es necesario evitar este efecto mediante el uso de filtros que sólo permiten el paso de radiación directa en el rango del espectro utilizado por las CFV, mientras que la radiación restante se desvía hacia el absorbedor térmico (Navarro, 2010).

La Tabla 2.1 muestra un resumen de los sistemas termosolares mencionados anteriormente.

*Tabla 2.1 Resumen de sistemas termosolares*

<b>Sistema de seguimiento</b>	<b>Tipo de sistema</b>	<b>Factor de concentración</b>	<b>Rango de temperatura de operación (°C)</b>
Estático	Colector plano	1	30-90
	Colector de tubos evacuados	1	50-200
	Concentrador parabólico compuesto (CPC)	1-5	60-240
Lineal (Un eje)	Concentrador tipo Fresnel	10-40	60-400
	Concentrador cilindro parabólico	15-45	60-400
	Sistemas PVC	20-50	
Puntual (dos ejes)	Torre central	100-1000	100-1000
	Disco stirling	100-1500	150-1000

Fuente: Quinteros, J. (2008) Estudio teórico y experimental de colector solar parabólico para generación de energía eléctrica.

Navarro, E. (2010) Aplicación de paneles híbridos PV/T con concentración para trigeneración en viviendas unifamiliares.

### **2.1.5 Componentes de un sistema termosolar**

Los sistemas mencionados en el apartado anterior poseen en común partes fundamentales que se pueden resumir en:

Reflectores: Son usados para redireccionar y concentrar la radiación solar permitiendo

aumentar la densidad de poder en el absorbedor y, por lo tanto, alcanzar mayores temperaturas (Carlsson et al., 2004).

Los espejos deben ser de bajo costo y poseer una alta reflectancia durante un periodo de vida largo. Los materiales más adecuados para este componente son el aluminio y la plata, y pueden clasificarse en: reflectores de vidrio plateado de segunda superficie, reflectores de aluminio de primera superficie y películas de polímero plateado de primera superficie (Carlsson et al., 2004; Muhammad-sukki & Ramirez-iniguez, 2010).

Absorbedor: Está diseñado para absorber la radiación solar y convertirla en calor, para que éste se transmita a un fluido de transferencia. Se localiza en la línea o punto focal de los reflectores. Los materiales de los que está hecho pueden variar según la temperatura de operación del sistema, y entre los más usados se encuentran el aluminio, acero y cerámica (Atkinson et al., 2015).

Los absorbedores se pueden clasificar según su geometría, la cual puede ser plana, lineal o puntual. Cuando se habla de colectores de placa plana, suelen ser de placa plana de aluminio; en el caso de los concentradores lineales como los del tipo cilindro parabólicos, se utilizan absorbedores lineales; los absorbedores puntuales se utilizan en concentradores como Disco Stirling o en centrales termosolares de torre central. Ya que los absorbedores suelen estar hechos de materiales metálicos, es necesario que pasen por un tratamiento con un recubrimiento selectivo, el cual aumenta absorción de radiación solar y reduce las pérdidas por emitancia, permitiendo aumentar el rendimiento térmico de todo el sistema (Morales & San Vicente, 2017; Paredes, 2012).

## **2.2 RECUBRIMIENTOS ABSORBEDORES**

Los recubrimientos absorbedores son materiales usados comúnmente en sistemas de concentración solar para mejorar el funcionamiento de los absorbedores, tanto en el aspecto de costos, eficiencia, durabilidad y mantenimiento. Sus propiedades características son: que presenten una baja reflectividad de la radiación solar incidente en el rango de longitud de onda espectral de 0.3 a 3  $\mu\text{m}$ , pero teniendo una alta reflectividad en el rango infrarrojo (3  $\mu\text{m}$ - 0.25  $\mu\text{m}$ ), esto se interpreta como una mayor absorción de radiación solar y menores pérdidas por calor en la región del infrarrojo

(Atkinson et al., 2015; Carlsson et al., 2004).

La aplicación de los recubrimientos absorbedores data de la década de los 50s, donde el físico Harry Zvi Tabor aplicó compuestos de negro de níquel (BN), negro de cromo y sulfuros de níquel-zinc (NiS-ZnS) en colectores planos por el método de electrodeposición. Posteriormente, otros tipos de métodos de deposición como la Deposición Física de Vapor, el revestimiento de iones, bombardeo catódico y evaporación, ganarían mayor atención (K. Xu et al., 2020).

Algunas características con las que deben cumplir estos recubrimientos son las siguientes:

- Deben ser químicamente estables en el rango de temperaturas de operación del sistema termosolar
- Poseer un periodo de vida extenso, aproximadamente de 20 años o más.
- Bajo costo y fácil de aplicar al absorbedor.
- Poseer una buena adhesión al absorbedor (Atkinson et al., 2015).

### **2.2.1 Selectividad espectral**

Un recubrimiento absorbedor ideal debe absorber totalmente la radiación solar en el rango UV-VIS-NIR (Ultravioleta-Visible- Infrarrojo Cercano) y reflejar toda la radiación térmica del tubo absorbedor. Este comportamiento es conocido como selectividad espectral (K. Xu et al., 2020).

El mecanismo de selectividad espectral funciona de la siguiente manera: la mayor parte de energía de radiación solar se concentra en el rango visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Recordando la ley de Stefan-Boltzmann, un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia total proporcional a la cuarta potencia de su temperatura (ecuación 1), por lo tanto, conforme se va aumentando la temperatura de un cuerpo, también aumenta la radiación máxima y disminuye la longitud de onda correspondiente.

$$E = \sigma T_e^4 \quad Ec. 1$$

Donde:

$T_e$ =Temperatura efectiva

$\sigma$ = Constante de Stefan-Boltzmann

En el caso de un recubrimiento absorbedor ideal, éste absorberá toda la radiación solar en el rango UV-VIS-NIR, que va de 0.3 a 3  $\mu\text{m}$  (ultravioleta-visible-infrarrojo cercano) y reflejará toda la radiación térmica, que se encuentra en la región de 0.25  $\mu\text{m}$  -3  $\mu\text{m}$  (K. Xu et al., 2020).

En la Figura 2.10 se observa la relación entre el espectro solar y el espectro de radiación de cuerpo negro a diversas temperaturas. Así mismo, se tiene el espectro de absorción selectiva ideal (líneas punteadas), el cual indica que su reflectancia en el rango del espectro solar es cero, es decir, absorbe por completo la radiación solar mientras que, en el rango de infrarrojo, su reflectancia es de 100%, esto se refiere a que incide completamente la radiación en este rango. Resumiendo, la selectividad espectral se puede establecer como la relación entre la absorción y la emitancia.

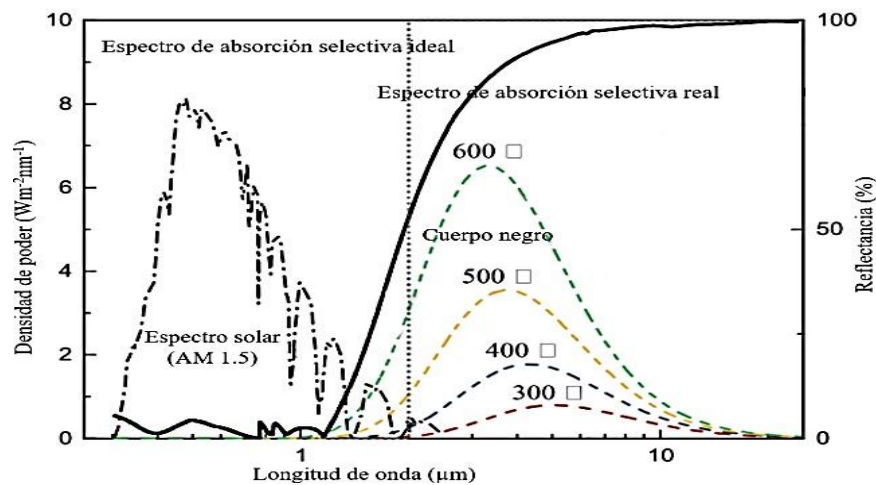


Figura 2.10 Espectro solar y radiación de un cuerpo negro a diferentes temperaturas;  
el espectro de reflectancia de un recubrimiento absorbedor ideal y real

Fuente: K. Xu, M. Du, L. Hao et al. (2020), "A review of high-temperature selective absorbing coatings for solar thermal applications"

Las ecuaciones de la absorbancia y la emitancia están dadas en las ecuaciones 2 y 3:

$$\alpha_{sol}(\theta) = \frac{\int_{0.3 \mu m}^{2.5 \mu m} [1 - R_{\lambda}] G(\lambda) d\lambda}{\int_{0.3 \mu m}^{2.5 \mu m} G(\lambda) d\lambda} \quad Ec. 2$$

Donde:

$\theta$ = Ángulo incidente de la luz solar

$G(\lambda)$ = Densidad de radiación espectral solar a AM 1.5

$R_{\lambda}$ = Espectro de reflexión en 0.3 ~ 2.5  $\mu m$ , el cual se mide con un espectrofotómetro estándar UV-VIS-NIR.

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_{2.5 \mu m}^{25 \mu m} [1 - R_{\lambda}] P_b(\lambda, T) d\lambda}{\int_{2.5 \mu m}^{25 \mu m} P_b(\lambda, T) d\lambda} \quad Ec. 3$$

$$P_b(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad Ec. 4$$

Donde:

$C_1 = 3.743 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$

$C_2 = 1.4387 \times 10 \text{ mK}$

$P_b(\lambda, T)$  = Se calcula mediante la radiación de cuerpo negro de Plank (Ec. 4), es la radiación espectral de un cuerpo negro bajo temperatura (T).

$R_{\lambda}$ = Espectro de reflexión en 2.5-25  $\mu m$ , puede obtenerse usando un espectrofotómetro FTIR.

En la Figura 2.11 se esquematiza el funcionamiento de un recubrimiento selectivo aplicado a un concentrador cilindro parabólico.





Figura 2.11 Funcionamiento de un recubrimiento selectivo aplicado a un concentrado cilindro parabólico

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.2 Tipos de recubrimientos absorbedores solares

Los recubrimientos absorbedores pueden categorizarse basándose en sus mecanismos de absorción, siendo los principales tipos:

#### a) Intrínsecos

Su selectividad es una propiedad intrínseca del material, el cual es estructuralmente más estable pero ópticamente menos efectivo que otros tipos. Ejemplos de estos recubrimientos son: Molibdeno dopado con  $\text{MoO}_3$ , Silicio dopado con boro,  $\text{CaF}_2$  (Fluoruro de calcio),  $\text{ZrB}_2$  (Diboruro de circonio),  $\text{SnO}_2$  (Óxido de estaño IV),  $\text{V}_2\text{O}_5$  (Pentóxido de vanadio) y  $\text{LaB}_6$  (Hexaboruro de lantano). No hay algún material que naturalmente exhiba selectividad espectral ideal, pero algunos se aproximan; esas propiedades se encuentran en metales de transición y semiconductores, pero éstos deben ser modificados para actuar adecuadamente (Kennedy, 2002).

#### b) Absorbedor unión metal-semiconductor

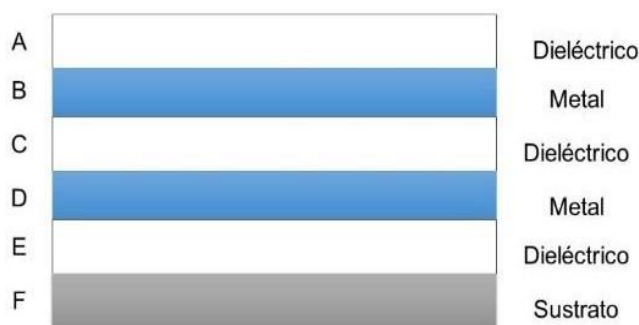
Se realiza un depósito, formando capas de un material semiconductor seguido de una capa de metal. Los semiconductores con bandas prohibidas de aproximadamente 0.5 eV a 1.26 eV absorben radiación de longitud de onda corta mientras que el metal provee baja emitancia para brindar la selectividad deseada al recubrimiento. Los semiconductores de interés para este tipo de recubrimiento son: Silicio, Germanio y PbS (Sulfuro de plomo II) (Kennedy, 2002; Moreno Soto, 2016b).

Es necesario que las capas de semiconductores sean películas delgadas con alta porosidad o con recubrimientos anti-reflexión ya que los semiconductores poseen altos índices de refracción, los cuales pueden producir pérdidas (Kennedy, 2002).

#### c) Absorbedores multicapa

Consisten en un arreglo multicapa donde se alternan capas de un material dieléctrico y un material metálico. El efecto de selectividad se produce debido a que la múltiple reflectancia pasa a través de la capa dieléctrica inferior (E) y es independiente de la

selectividad del material dieléctrico Una capa delgada semitransparente reflectiva de metal (D) separa dos capas dieléctricas de cuarto de onda (C y E). La capa inferior reflectiva D tiene alta reflectancia en la región del infrarrojo y menor reflectancia en la región visible. La capa superior de material dieléctrico (C) reduce la reflectancia visible. La delgadez de esa capa determina la forma y la posición de la curva de reflectancia. De nuevo, otra capa de metal semitransparente (B) reduce aún más la reflectancia en la región visible y una capa dieléctrica adicional (A) aumenta la absorción en la región visible y aumenta el rango en el espectro visible (Kennedy, 2002).



*Figura 2.12 Esquema de un absorbedor multicapa*

Fuente: Elaboración propia

#### d) Absorbedores tipo cermet

Son muy similares a los absorbedores multicapa ya que se utilizan materiales dieléctricos para mejorar la absorción en la región visible. Consiste en el depósito de partículas metálicas en una matriz dieléctrica, generalmente cerámica. Está configurado en un arreglo de una capa antirreflectora, capa de cermet y el sustrato. El cermet tiene el papel de absorbedor primario, mientras que el sustrato ayuda a controlar la absorción de las longitudes de onda corta (Atkinson et al., 2015; Moreno Soto, 2016a, 2016b).

Diferentes tipos de recubrimientos de cermet han sido desarrollados usando Pt, W, Mo, Cu, Ag, Co, SS, Cr, Ti y Au como material metálico y  $Al_2O_3$ , AlN,  $Si_2O$ , MgO, AlON,  $Cr_2O_3$  como material dieléctrico (Usmani & Seshadri, 2015).

#### e) Superficies texturizadas

En este tipo se le da forma a la superficie del sustrato o se le deposita una película delgada con formas específicas, comúnmente con forma de picos elevados de tamaños


similares al rango de longitudes de ondas que se desea absorber. La radiación que incide será atrapada en cualquier ángulo de incidencia, ya que esta superficie retiene la radiación a través de múltiples reflexiones hasta ser absorbida completamente; para este tipo de absorbedores se debe tener especial cuidado en sus superficies, protegiendo de la abrasión y contacto directo para no dañar la textura diseñada, además, su fabricación requiere métodos complejos y de alta precisión (Moreno Soto, 2016b).



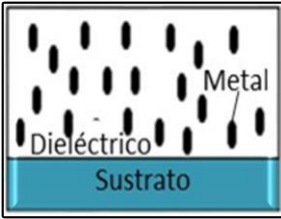
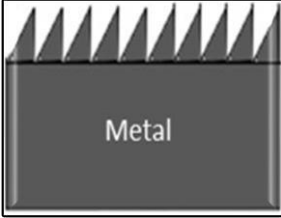
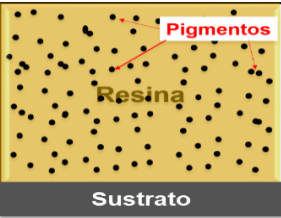
f) Pinturas absorbedoras

Una pintura es considerada una dispersión de partículas sólidas llamadas “pigmentos” suspendidas en un medio orgánico conocido como “resina”. Los pigmentos son pequeñas partículas insolubles que tienen como objetivo aportar color por absorción y reflexión de la luz. Por otra parte, la resina es un agente que forma una película macromolecular que se disuelve o se dispersa en un disolvente. La mayor parte de resinas usadas son siliconas orgánicas que poseen fuertes bandas de absorción en las regiones del infrarrojo medio. Este tipo de recubrimientos posee características atractivas como su facilidad de procesamiento, bajo costo, facilidad de mantenimiento, disponibilidad comercial y métodos de deposición sencillos, ya que, al ser pinturas, pueden ser aplicadas por medio de técnicas sencillas como dip coating o spray (Wijewardane & Goswami, 2012).

Un resumen de los tipos de recubrimientos absorbedores se tiene en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Recubrimientos absorbedores

Tipo de recubrimiento absorbedor	Configuración	Esquema
Intrínseco	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material de absorción intrínseca</li> <li>• Sustrato</li> </ul>	

<p>Unión metal-semiconductor</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capa de recubrimiento antirreflejante</li> <li>• Semiconductor</li> <li>• Metal</li> </ul>	
<p>Multicapa</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dieléctrico</li> <li>• Metal</li> <li>• Dieléctrico</li> <li>• Sustrato</li> </ul>	
<p>Cermet</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compuesto metal-dieléctrico</li> <li>• Metal</li> </ul>	
<p>Superficie texturizada</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metal</li> </ul>	
<p>Pintura absorbedora</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pigmento negro disperso en una matriz polimérica</li> <li>• Sustrato</li> </ul>	

Fuente: Liu, B., et al. (2021) Optical properties and thermal stability evaluation of solar absorbers enhanced by nanostructured selective coating films

### 2.2.3 Técnicas de deposición

Las técnicas de deposición de los recubrimientos pueden ir desde métodos complejos, como es el caso de la técnica de Deposición Física de Vapor, hasta métodos sencillos como el dip coating. Los más usados son los siguientes:

#### 1. Método de Sol gel

Se utiliza principalmente para la preparación de óxidos metálicos, ya sea en forma de película delgada, polvo o como material denso (Moreno Soto, 2016a). Su proceso comienza con la limpieza de la superficie del sustrato, para posteriormente preparar la solución y el tratamiento térmico/calcinación. Para la preparación del sol-gel se usan sólidos inorgánicos u orgánicos metálicos compuestos como precursores en un disolvente formando una dispersión coloidal (Amri et al., 2014).

El uso del sol gel resulta atractivo como recubrimiento protector de tubos absorbedores ya que puede cubrir áreas extensas y formas complejas usando spray o técnicas de inmersión, sin embargo, posee desventajas relacionadas a gran sensibilidad ante cambios mínimos de temperaturas, composición compleja y condiciones especiales de secado y curado (Atkinson et al., 2015).

#### 2. Deposición Física de vapor (PVD por sus siglas en inglés)

Esta técnica una serie de métodos para la producción de películas que se basan en la evaporación, donde el calor o los electrones causan la evaporación de una sustancia conocida como el objetivo, la cual es depositada en el sustrato, en donde los iones de una descarga de plasma incandescente formados en un gas inerte como el argón, son bombardeados al objetivo y expulsan átomos o moléculas y éstas son depositadas en el sustrato (Atkinson et al., 2015). El proceso de esta técnica se puede observar en la Figura 2.13.

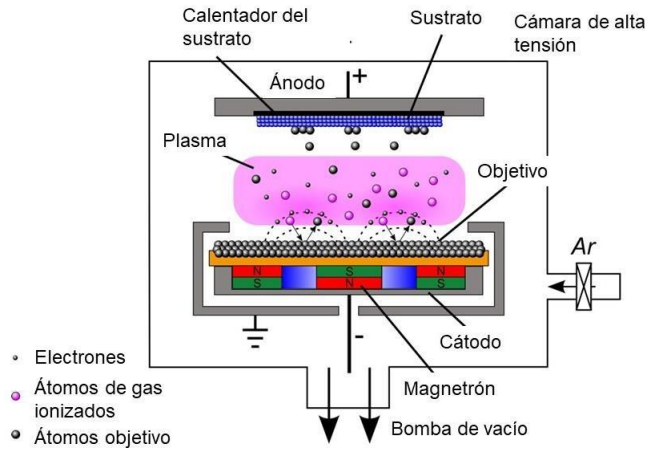


Figura 2.13 Proceso de Deposición Física de Vapor

Fuente: Aname Instrumentación científica, Equipos de recubrimiento

3. Deposición química de vapor (CVD por sus siglas en inglés): Su técnica consiste en el uso de reacciones de químicos gaseosos en un rango de presiones, que van del vacío bajo a la presión atmosférica, y temperaturas para hacer crecer películas delgadas de metales y compuestos sobre sustratos. Este método también implica técnicas donde la luz o un plasma es usado para producir reacciones, las cuales toman lugar en la fase gaseosa o en la interfaz sustrato-gas (Atkinson et al., 2015).
4. Método de dip coating (inmersión): En esta técnica se realiza una inmersión del sustrato en la solución que posee los precursores que se desean depositar en él. Es importante controlar la velocidad de extracción, y que los ángulos de inmersión y extracción sean iguales, generalmente perpendiculares a la solución (Moreno Soto, 2016b).

Esta técnica es considerada una de las más sencillas, de bajo costo, confiable y reproducible, ya que no es necesario la intervención de gases inertes ni de trabajar bajo condiciones de temperatura o presión específicas (Neacșu et al., 2016). En la Figura 2.14 se observa cómo se lleva a cabo esta técnica.

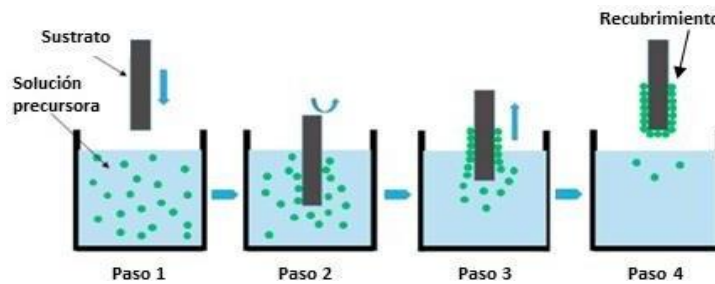


Figura 2.14 Técnica de dip coating o inmersión

Fuente: Neacsu, I.A., Nicoara, A. I., Vasile, O., Vasile, B. (2016). Inorganic micro and nanostructured implants for tissue engineering.

5. Rocío pirolítico (spray): Es una técnica muy sencilla y versátil, para su proceso se utiliza un atomizador, el cual generalmente trabaja a chorro de aire, por medio ultrasónico y por electrostática. La solución del precursor es rociada en forma de aerosol hacia el sustrato de manera intermitente, puesto que cuando una gota cae sobre el sustrato se modifica su temperatura y es necesario un periodo de tiempo para compensar la diferencia. Los componentes del precursor reaccionan formando un nuevo compuesto químico en la superficie del sustrato y también son liberados algunos productos al ambiente (Venegas, 2015).

## 2.3 MATERIALES FOTOTÉRMICOS

Parte del auge de la energía solar como fuente de energía renovable ha sido que ésta puede ser aprovechada y convertida en diferentes tipos de energía, como electricidad y calor. Los procesos fototérmicos tienen una alta eficiencia de conversión, ya que es un proceso directo. El efecto fototérmico es el resultado de la fotoexcitación, la cual produce energía térmica parcial o completa. Este efecto puede observarse en materiales inorgánicos como los metales nobles y semiconductores, así como en los materiales orgánicos como aquellos de base carbono y polímeros conjugados (Gao et al., 2018).

Los mecanismos de interacción de la radiación con la materia se pueden clasificar en tres categorías: calentamiento plasmónico localizado de metales, relajación no radiativa de semiconductores y vibración térmica de moléculas. Este último mecanismo se puede encontrar en materiales orgánicos, donde muchos de éstos absorben energía óptica y la convierten en calor a través de vibración reticular (López-Sosa, 2020).



La mayoría de los enlaces simples del carbón tales como C-C, C-H, O-H y C-O tienen grandes brechas de energía entre los orbitales  $\sigma$  y  $\sigma^*$ , los cuales corresponden a longitudes de onda menores a 350 nm, en el espectro solar, por lo que la transición de sigma ( $\sigma$ ) y  $\sigma^*$  no se puede dar bajo irradiación solar. Por otra parte, los enlaces pi ( $\pi$ ) son más débiles ya que los electrones involucrados son menos fuertes, de manera que éstos pueden excitarse desde el orbital  $\pi$  al  $\pi^*$  con menor energía, además, los enlaces pi conjugados también pueden producir un desplazamiento hacia el rojo en el espectro de absorción. Al aumentar los enlaces  $\pi$ , la brecha de energía entre el orbital molecular ocupado más alto (por sus siglas en inglés, HOMO) y el orbital molecular desocupado más bajo (LUMO) disminuye. La longitud de onda entre estos orbitales está relacionado al espaciamiento de los niveles electrónicos. En los alótropos parecidos al grafeno, la gran cantidad de enlaces pi conjugados favorece la excitación de electrones en la mayoría de las longitudes de onda del espectro de irradiación solar, por lo tanto, se trata de un material color negro. Cuando un material es iluminado y la energía luminosa coincide con una posible transición electrónica dentro de la molécula, el electrón que absorbe la luz pasa del estado fundamental a un orbital de mayor energía. Al relajarse por medio del acoplamiento electrón-fonón, los electrones excitados transfieren su energía a modos vibratorios, lo que ocasiona un aumento de la temperatura del material (Gao et al., 2018).

En el diseño de materiales para colectores solares resultan útiles gracias a sus características de absorción de luz solar y su eficiencia de conversión en energía térmica, lo cual contribuye al rendimiento fototérmico general. (Gao et al., 2018).

## **2.4 ANTECEDENTES DE MATERIALES BASE CARBÓN Y SUS PROPIEDADES COMO MATERIAL ÓPTICO**

El desarrollo de los recubrimientos solares implica el uso de un material que posea propiedades ópticas que favorezcan la absorción de luz, lo cual se relaciona con la estructura electrónica, la longitud de onda de la luz y la textura de la superficie. También es importante considerar los diferentes mecanismos de fotoconversión, tales como el calentamiento plasmónico, la relajación de conductores no radiativos y la vibración térmica molecular; ésta última resulta importante, ya que esta es uno de los principales

mecanismos de fotoconversión presentes en la materia orgánica, el cual consiste en la absorción de energía óptica para convertirla en calor (López-Sosa et al., 2020).

Partiendo de este punto, resulta atractiva la alternativa del uso de materiales orgánicos como precursores de pigmentos para pinturas selectivas, ya que son materiales de bajo costo, accesibles, poseen gran disponibilidad, ya que pueden obtenerse de diversas fuentes, y su aplicación en colectores solares es más sencilla a comparación de otros tipos de recubrimientos.

Las propiedades ópticas de los materiales de base carbón ya han sido reportadas en la literatura, analizando hollín (también llamado negro de humo), el cual se obtiene a partir de un proceso de combustión incompleta de materiales orgánicos. Estudios realizados por Olivia et al. demostraron que el hollín posee excelentes propiedades ópticas, con una reflectancia 56 veces mejor que la encontrada en pinturas negras comerciales y altos valores de absorbancia (0.9988), de manera que el hollín presenta un comportamiento parecido al de un cuerpo negro ideal, y esto lo vuelve un buen candidato para ser usado en recubrimientos de absorbedores (Oliva et al., 2013).

Así mismo, se ha probado el efecto de varios pigmentos negros (negro de humo y nanotubos de carbón) sobre las propiedades ópticas y mecánicas de copolímeros aleatorios de polipropileno, en donde se han encontrado valores de absorbancia que van entre 95 y 96%, como es el caso de copolímero aleatorio de polipropileno pigmentado con nanotubos de carbón, alcanzando un valor de 95.9% de absorbancia solar, además de ligeros aumentos de resistencia a la tracción y disminución en la deformación por rotura (Kurzböck et al., 2012).

A pesar de que ya existen varias investigaciones respecto al uso de carbón proveniente de residuos agroindustriales, existe poca evidencia de su uso en el campo de la absorción solar para aplicaciones termosolares. Sin embargo, se tienen antecedentes recientes de que el biocarbón proveniente de cáscara de *Citrus aurantium* posee características favorables para su uso como pigmento en una pintura absorbadora. En el artículo consultado se tomaron tres muestras de la cáscara de naranja agría previamente deshidratadas y pulverizadas, sometidas a un proceso de pirólisis a 400, 600 y 800 °C (SOP400, SOP600 y SOP800, respectivamente) y se encontró que el rendimiento del carbón alcanzaba el 28% a 600 °C, temperatura en la cual los grupos funcionales

(hemicelulosa, celulosa y lignina) se descomponían, permitiendo obtener como producto carbón. Respecto a su morfología, se observó que el biocarbón obtenido a 600 y 800 °C poseía gran cantidad de cavidades y un mayor número de partículas pequeñas, en contraste con el material sin procesar, en el cual se observan cavidades que se logran mantener a 400 °C. Es importante mencionar que la morfología juega un papel importante en los materiales fototérmicos, ya que los poros y cavidades contribuyen a una mejor absorción de luz, así como la reducción de la reflexión de luz en el espectro solar (González-Canché et al., 2021).

El análisis elemental arrojó que la relación O/C que tenían las muestras SOP600 y SOP800 era característica del negro de carbón, debido a su proporción O/C, la cual debe encontrarse en el rango de 0 a 0.6 (Spokas, 2010); por otra parte, con la difracción de rayos X (XRD) se observaron picos a 24° y 44°, los cuales están relacionados con los planos 002 y 100, que indican la presencia de carbono amorfo para el SOP600 y SOP800, en este último es más evidente el pico a 44°, lo que plantea que el aumento de temperatura de pirólisis produce un mayor grado de carbonización. Respecto a los espectros Raman del SOP400, SOP600 Y SOP800, se mostraron bandas D y G (del grafito), correspondientes a los picos con intensidades en 1363 cm<sup>-1</sup> y 1591 cm<sup>-1</sup> respectivamente. La banda D se relaciona con el desorden en la estructura cristalina y puede ser indicativo de la presencia de carbonos en la hibridación sp<sup>3</sup>, mientras que la banda G se asocia con la energía de los enlaces sp<sup>2</sup> y se asigna a las estructuras gráficas normales. En la Figura 2.15 se observan los espectros Raman de las muestras, en la cual se establece que el SOP800 es un biocarbón más ordenado, mientras que hay mayor desorden en el SOP400, lo cual indica que se puede alcanzar un mayor grado de orden a través del aumento de temperatura de pirólisis. También se exhiben biocarbones con características amorfas formadas por una mezcla de enlaces sp<sup>2</sup> y sp<sup>3</sup>, lo cual posee propiedades importantes relacionadas con la absorción de luz, pues en la literatura se ha encontrado que los alótropos de carbono sp<sup>2</sup>-sp<sup>3</sup> tienen coeficientes de absorción mayores gracias a que su efecto fototérmico está asociado con el dominio sp<sup>2</sup>, que permite la absorción de luz en el espectro solar (González-Canché et al., 2021; Jiménez et al., 2012).

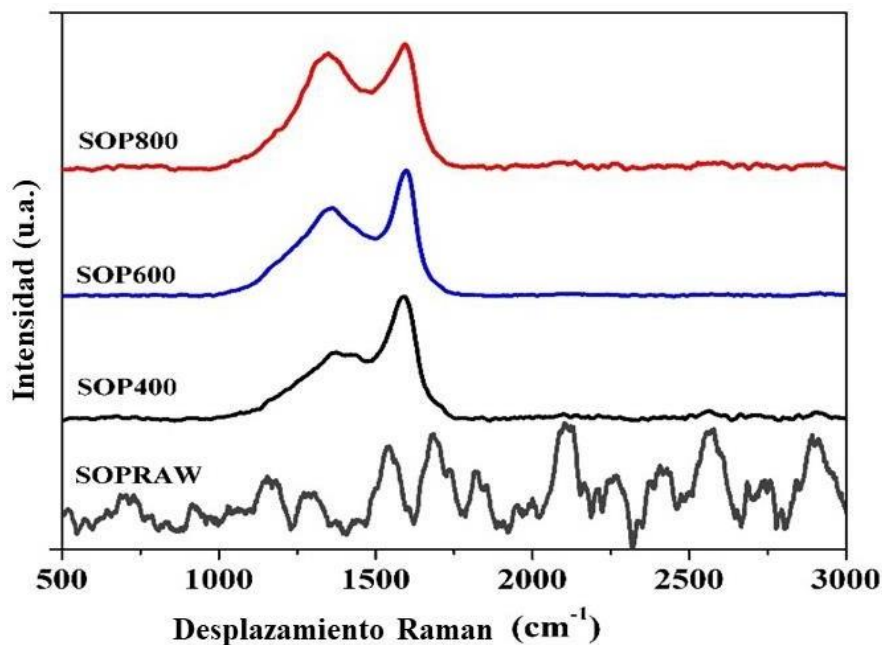


Figura 2.15 Espectro Raman de la cáscara de naranja (SOPRAW) y los biocarbones SOP400, SOP600 Y SOP800

Fuente: González-Canché et al., (2021). Physicochemical and optical characterization of *Citrus aurantium* derived biochar for solar absorber applications

Con el análisis termogravimétrico se encontró que el SOP600 y el SOP800 poseen una buena estabilidad térmica en el rango de 60-400 °C, perdiendo sólo el 5% de masa. Finalmente, el análisis óptico permitió confirmar que el SOP600 y el SOP800 poseían propiedades de absorción, al tener valores de reflectancia difusa de 6.6-13.8% y 6.8-11.8% respectivamente (Figura 2.16); se observa una disminución en función de la temperatura de pirólisis, el cual puede ser asociado a la descomposición de la materia prima, ya que al alcanzar temperaturas más altas de pirólisis, se obtienen biocarbones más estables térmicamente, pues éstos poseen mayor contenido de carbono con mayor grado gráfico y orden estructural, sin embargo, aunque el SOP800 muestra una reflectancia difusa más baja, el efecto del dominio  $sp^2$  comienza a ser limitado, por lo que se concluye que el SOP600 posee propiedades adecuadas para ser utilizado como un pigmento en el desarrollo de una pintura absorbidora solar (González-Canché et al., 2021).

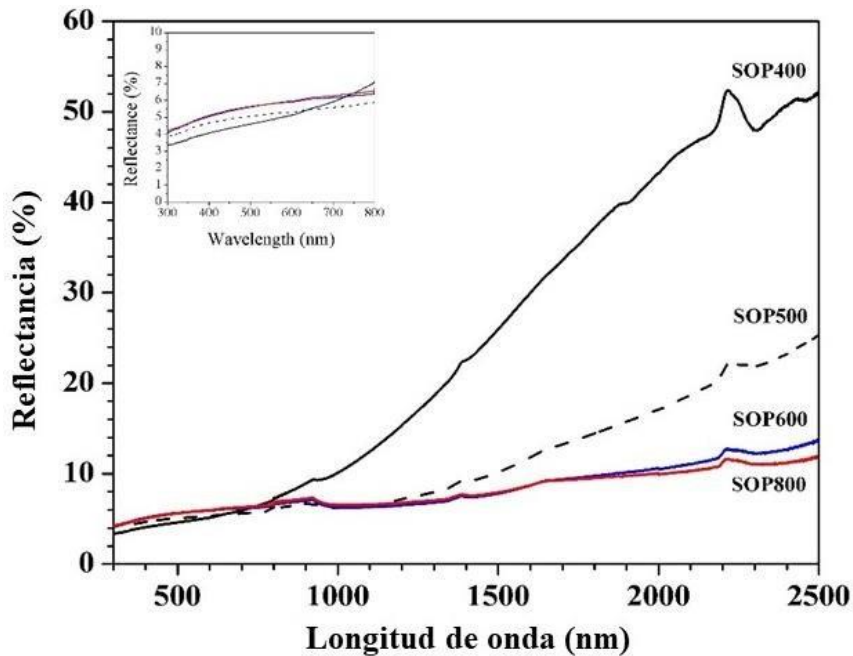


Figura 2.16 Reflectancia difusa en UV-VIS-NIR del SOPRAW y los biocarbones obtenidos

Fuente: González-Canché et al., (2021). Physicochemical and optical characterization of *Citrus aurantium* derived biochar for solar absorber applications

## 2.5 PARTÍCULAS DE CARBÓN OBTENIDAS POR PIRÓLISIS

Antes de someter la materia prima a un proceso de pirólisis para obtener partículas de carbón, es importante realizar los estudios previos para conocer las temperaturas de degradación de los grupos funcionales correspondientes al material precursor.

El análisis termogravimétrico (TGA) permitirá conocer los procesos térmicos implicados en la descomposición térmica del material precursor y de los biocarbones obtenidos. Esta técnica ya fue aplicada en un proyecto antecesor, en el analizador termogravimétrico NETZCH STA 449F5 bajo una atmósfera de helio, introduciendo muestras previamente deshidratadas a 60 °C durante 24 horas.

También se realizó una Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) en un calorímetro acoplado al TGA, llevándose a cabo los dos análisis de manera simultánea con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min en un intervalo de 30 a 800 °C

Los resultados arrojados se observan en las Figuras 2.17a y 2.17b, donde se muestran las principales etapas de degradación, la primera que va de 25 °C a 170 °C, está asociada a la pérdida de humedad y compuestos volátiles de la cáscara de naranja (SOP), la

segunda etapa (170 °C a 270 °C) se atribuye a la degradación térmica de la celulosa y la tercera etapa (270 °C a 380 °C) se relacionada con la degradación térmica de la celulosa. Adicionalmente, la curva DSC (Figura 2.17b) muestra un pico exotérmico a 585 °C, el cual se asocia a la degradación térmica de la lignina (Chen & Chen, 2009; Quesada-González et al., 2011).

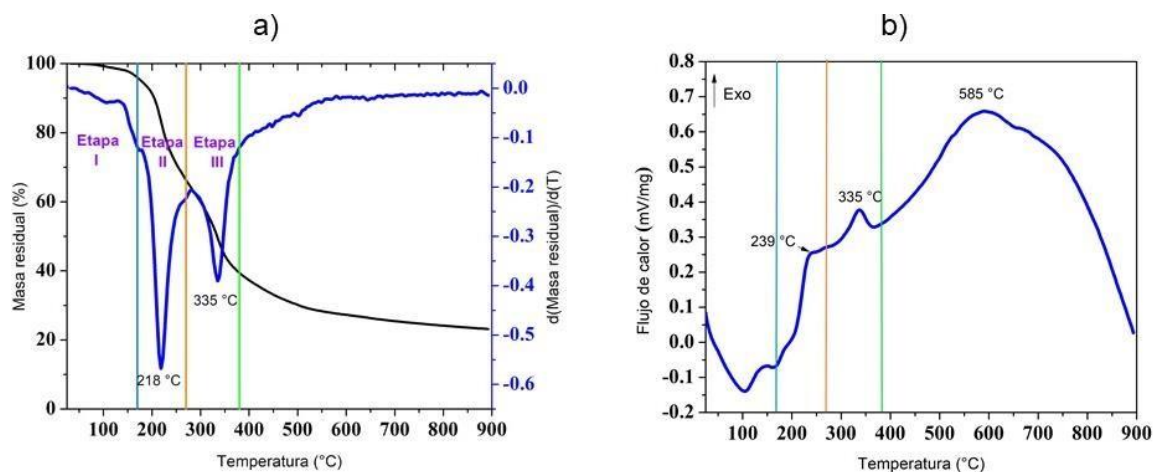


Figura 2.17 Gráficas de análisis térmico de SOP a) Curva TGA-DTGA del SOPRAW; b) Curva DSC del SOPRAW

Fuente: Martínez, P. (2021). Obtención de un material óptico absorbedor sustentable para su aplicación en recubrimientos selectivos en tecnologías termosolares

Estos resultados permiten establecer las temperaturas adecuadas de pirólisis, asegurando la descomposición de los compuestos del SOPRAW, siendo el rango más adecuado de 600 a 800 °C.

### 2.5.1 Generalidades del biocarbón

El biocarbón, también llamado biochar, es el producto de la descomposición de materiales orgánicos en un ambiente con oxígeno limitado (pirólisis), a temperaturas inferiores a los 700 °C (Escalante et al., 2016).

El proceso de pirólisis descompone algunas partes de la biomasa, pero también retiene gran cantidad de carbón; con la alteración de las propiedades originales de la biomasa se obtiene un producto más carbonoso, el cual puede dirigirse a diversas aplicaciones según las propiedades que se tengan. Estas propiedades pueden modificarse por diversos factores, como el cambio de temperatura de carbonización o la activación química. La composición química del biocarbón determina la aplicación a la que puede ser dirigido (Weber & Quicker, 2018).

La carbonización produce una serie de reacciones relacionadas a la descomposición de los principales componentes de la biomasa (celulosa, hemicelulosa, lignina y almidón). Cada uno de estos grupos funcionales reacciona de manera diferente y se degrada a temperaturas específicas. En el caso de la celulosa, su descomposición térmica se presenta entre los 250 y 350 °C y sus productos son compuestos volátiles, alquitrán, hidrocarburos, ácidos, hidrógeno, metano, monóxido y dióxido de carbono, dejando una matriz de carbono amorfa y rígida (Quesada-González et al., 2011).

Es posible recuperar una gran cantidad de biomasa a través de los residuos agropecuarios. En la industria alimenticia se generan enormes cantidades de residuos, los cuales generalmente no reciben un tratamiento adecuado, produciendo acumulación de basura, riesgos sanitarios y falta de aprovechamiento de esos materiales. Un ejemplo de ello son los sobrantes que se encuentran en las cáscaras de cítricos, en donde el procesamiento de éstos genera residuos de hasta un 15% w/w respecto a la entrada de proceso (Vaquero, 2016).

México se encuentra como el quinto productor a nivel mundial de cítricos, obteniendo un promedio de 4,2 millones de toneladas al año, donde un 90% de producción se dirige al consumo fresco, mientras que el restante se usa en la industria de jugos y concentrados (Inforural, 2012). Del producto total, aproximadamente un 45 a 60% se convierte en residuo; dentro de la variedad de frutas cítricas, la naranja agria (*Citrus aurantium*) es un tipo que no suele usarse para consumo fresco debido a su sabor ácido; generalmente su uso está destinado como ingrediente en adobos de carne y aderezos, y debido a los compuestos fenólicos que posee, también tiene aplicaciones en el campo de la salud como favorecedor de actividad antioxidante (Patro, 2018).

Los residuos de cítricos también pueden procesarse para obtener químicos como el limoneno, usado en fragancias y como solvente (Luque & Clark, 2013). Es por ello que resulta interesante el uso de residuos, como es el caso de las cáscaras de naranja, como precursores de partículas de carbón para su posterior uso en pinturas.

### 3. CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

#### 3.1 METODOLOGÍA

Posterior al estudio del arte relacionado con la obtención de carbón y su uso en la formulación de pinturas absorbedoras, se estableció la metodología observada en la Figura 3.1, en la cual se mencionan cada una de las etapas, comenzando por el procesamiento de la fuente de biomasa, seguida de la pirólisis del SOP, su caracterización, la formulación de la pintura, caracterización de ésta, para finalmente realizar la elección de la pintura que presentara mejores propiedades para su análisis al exterior.

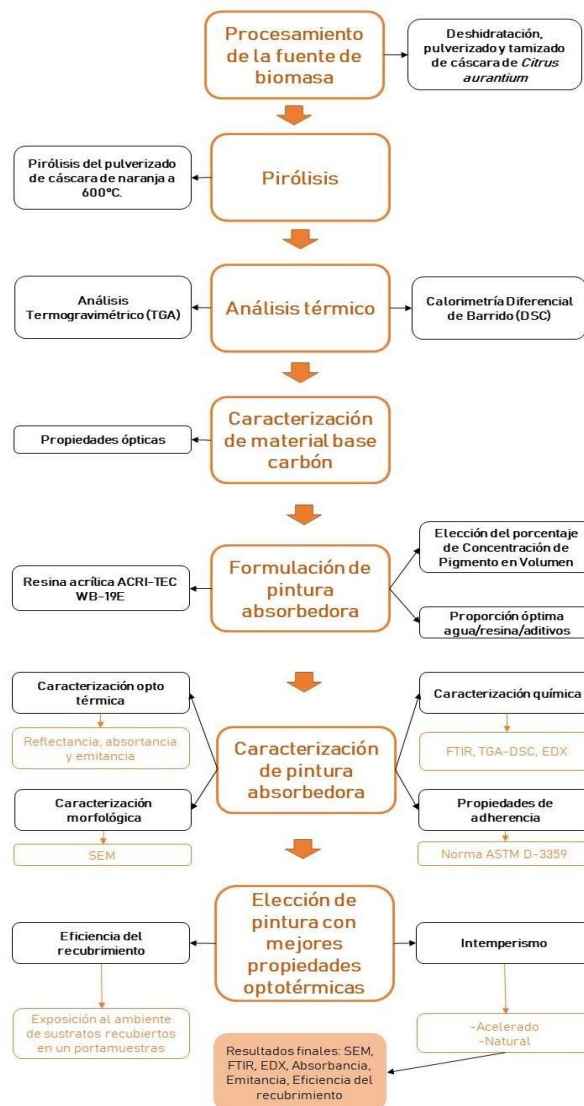


Figura 3.1 Metodología utilizada en el proyecto



## 3.2 MATERIALES

Antes de iniciar el proceso de pirólisis, las muestras pulverizadas pasaron por un proceso de deshidratación para eliminar la humedad intrínseca del material. Para ello, la harina se introdujo a una mufla durante 24 horas a 60 °C. Al finalizar, la harina se pesó, para determinar la masa correspondiente al peso del material seco.

Para la primera etapa de la metodología se contempló el procesamiento de cáscara de naranja *Citrus aurantium*, la cual pasó por un proceso de pirólisis para la obtención de partículas de carbón.

## 3.3 CARACTERIZACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA BIOMASA

### 3.3.1 Pirólisis

La pirólisis se realizó en un horno tubular con flujo constante de nitrógeno. Se propuso como temperatura de pirólisis 600 °C, que corresponde a la degradación de los grupos químicos funcionales (hemicelulosa, celulosa y lignina). Además, se ha reportado que esta temperatura alcanza rendimientos entre el 25 al 30%, mientras que a temperaturas mayores el rendimiento disminuye, debido a que el carbón presenta reacciones de descomposición que favorecen la producción de gases o líquidos producto de la pirólisis, tal como se observa en la Figura 3.2 (Martínez Mireles et al., 2020).

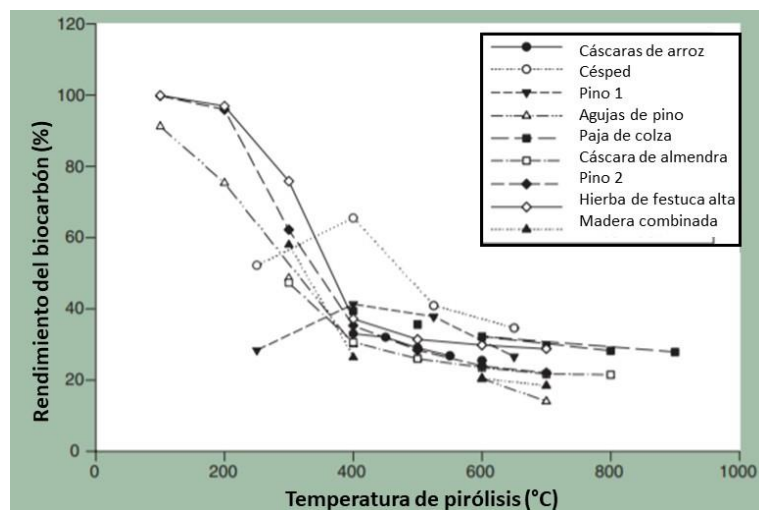


Figura 3.2 Impacto de la temperatura de pirólisis en el rendimiento del biocarbón de varios materiales de biomasa

Fuente: Spokas, K., P. (2010). Review of the stability of biochar in soils: predicatibility of O:C molar ratios

El arreglo experimental para la pirólisis se observa en la Figura 3.3. Una muestra de 15 g de material seco se colocó en un crisol de cuarzo, que se introduce en un horno tubular

con flujo de nitrógeno a 250 ml/min para desplazar el oxígeno y asegurar una atmosfera inerte. El horno está programado, de manera que la tasa de aumento de temperatura es de 10 °C/min, manteniendo una elevación constante; al llegar a 600 °C, esta temperatura se mantiene durante una hora y finalmente baja a temperatura ambiente, con la misma tasa inicial.

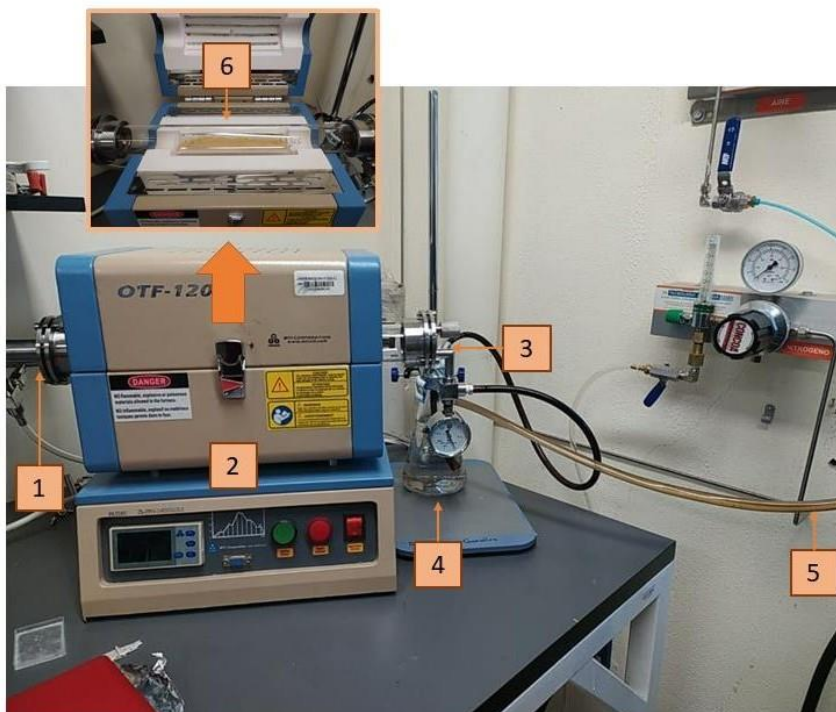


Figura 3.3. Arreglo experimental para pirólisis. 1) Entrada de flujo de nitrógeno, 2) Horno tubular, 3) Salida de gases y aceites, 4) Trampa de gases, 5) Salida de gases al exterior y 6) Muestra de harina de cáscara de naranja dentro del tubo de cuarzo

- Rendimiento del carbón

El rendimiento del proceso de pirólisis de la biomasa (%R) se determina a partir de la ecuación 5:

$$\%R = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

M1= Masa inicial seca

M2= Masa final obtenida

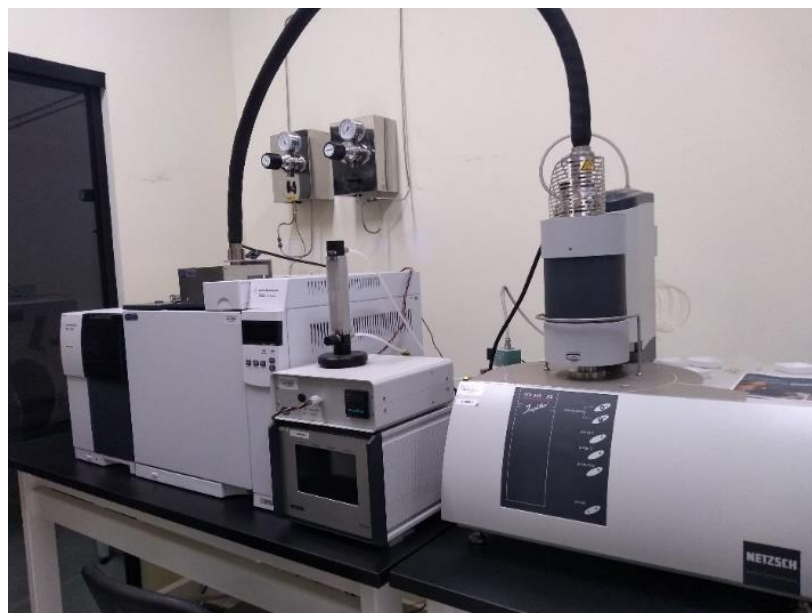
### 3.4 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL BASE CARBÓN

- Análisis térmico

El análisis térmico permitió observar la estabilidad de los biocarbones a temperaturas elevadas, de manera que es posible asignarle el tipo de tecnología termosolar adecuada en función al rango de temperaturas que pueda soportar el material.

Por lo tanto, se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) a las muestras de carbón obtenido a 600 °C (SOP600) y del material de referencia, carbón activado de cáscara de coco (AC-COM). Este último fue utilizado para establecer las condiciones en las formulaciones de las pinturas, evitando arriesgar el material experimental. Antes del análisis, las muestras se secaron en una estufa de convección a 60 °C por 24 horas con el objetivo de eliminar la humedad.

El análisis termogravimétrico se realizó en el analizador termogravimétrico NETZSCH STA 449F5 (Figura 3.4) bajo una atmósfera de helio y una velocidad de calentamiento de 10 °C/ min en un intervalo de 30 a 800 °C. Se analizaron tres muestras de carbón: SOP600 obtenido en un lote de 2 g, SOP600 obtenido en un lote de 15 g y carbón activado gradocomercial de cáscara de coco.



*Figura 3.4 Analizador termogravimétrico NETZSCH STA 449F5*

- Composición química

- a) Espectrometría Espectroscopía de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)

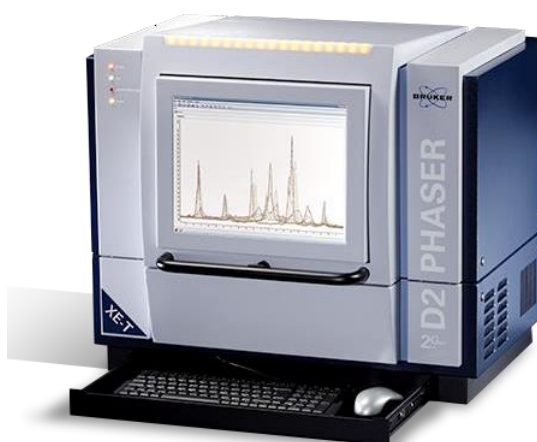
La espectroscopía FTIR se llevó a cabo en un espectrómetro Bruker Tensor II (Figura 3.5). El rango de detección del espectro fue de 4000 a 500  $\text{cm}^{-1}$ , con una resolución espectral de 4  $\text{cm}^{-1}$ . Se utilizó la técnica de reflectancia total atenuada (ATR).



*Figura 3.5 Espectrómetro FTIR Tensor II de Bruker*

- b) Difracción de Rayos X (DRX)

Para conocer el carácter amorfo/cristalino de los biocarbones se llevó a cabo la Difracción de rayos X (DRX) usando un difractómetro de rayos X modelo D2 PHASER marca Bruker (Figura 3.6), el cual cuenta con una geometría Bragg-Brentano, tubo de Cu 1.54184  $[\text{Å}]$  y detector LINXEYE.



*Figura 3.6 Difractómetro de rayos X modelo D2 PHASER marca Bruker*

### c) Análisis elemental

Con el objetivo de realizar el análisis elemental del SOP600, así como del AC-COM, se utilizó el Analizador de elementos orgánicos modelo Flash 2000 CHNS-O Thermo Scientific (Figura 3.7). Para determinar el contenido de oxígeno se utilizó el método de la diferencia.



*Figura 3.7 Analizador de elementos orgánicos Flash 2000 CHNS-O Thermo Scientific*

- Propiedades ópticas (absorbancia)

Para este procedimiento, se midieron los espectros de reflectancia difusa de las partículas de carbón usando un espectrofotómetro Cary 5000 UV-VIS-NIR (Figura 3.8) equipado con una esfera de integración. La absorbancia se podrá calcular a través de la reflectancia difusa obtenida.



*Figura 3.8 Espectrofotómetro Cary 5000 UV-Vis-NIR*

## **3.5 FORMULACIÓN DE PINTURA**

Las pinturas generalmente están constituidas por partículas finas de sólidos dispersados (pigmentos) en un medio líquido denominado vehículo. A su vez, el vehículo se basa en

una sustancia llamada formadora de película o ligante, dispuesta en un solvente (Giudice & Pereyra, 2009).

### 3.5.1 Elección de agente ligante

Para la matriz de la pintura se utilizó la resina ACRI-TEC, WB-19E de base agua, su compuesto base es la resina acrílica, la cual es una de las mejores en cuestiones de duración para uso exterior, gracias a su adhesión inicial y resistencia al lavado y desprendimiento, así como mejor resistencia a la luz ultravioleta, lo cual resulta fundamental en la formulación de una pintura absorbadora que estará en constante deterioro ambiental, expuesta durante horas a la radiación solar (MEQ, 2007). Los datos técnicos de la resina se encuentran en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1 Datos técnicos ACRI-TEC WB-19E

<b>ACRI-TEC (Resina)</b>	
<b>Propiedades físicas</b>	WB-19E
<b>Aspecto</b>	Blanco lechoso
<b>Principio Activo</b>	Acrílico base agua
<b>Peso Específico</b>	1.03
<b>Disolvente</b>	Agua
<b>Acabado</b>	Conserva tono
<b>Brillo</b>	Satinado a brillante
<b>Ecológico</b>	Bajo VOC

Fuente: Hoja de datos técnicos de resina ACRI-TEC WB-19E

Como solvente se utilizó agua en una proporción 1:1 respecto al volumen de la resina. El desarrollo de pinturas base agua favorece a la reducción de la emisión de Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC), los cuales son contaminantes (Chaverra, 2021).

Para mejorar la dispersión del pigmento, se propuso añadir agente dispersante (sal de sodio de un polielectrolito de carboxilato) de la marca Orotan 731-A que además de evitar la sedimentación de partículas de carbón, proporciona una mayor resistencia a la corrosión y posee una excelente estabilidad térmica. De acuerdo con su hoja técnica, la cantidad adecuada para agregar a la pintura va del 0.5 al 1% respecto a la masa total, dependiendo del porcentaje de PVC, de manera que se optó por agregar el 1%.

Por otra parte, debido a la textura líquida de la pintura el uso de un aplicador que mantuviera un estándar de grosor de película era complicado, por lo que se planteó el uso de un agente espesante, el cual es un aditivo que estructura la formulación aumentando su viscosidad, pero a su vez permitiendo que ésta sea fluida, evitando la

sedimentación. Se eligió el producto ACRY SOL RM-825, el cual es un modificador de uretano no iónico, en una proporción del 10 y 5% de la masa total.

### 3.5.2 Concentración de Pigmento en Volumen (PVC)

Para lograr una adecuada dispersión de las partículas de carbón en el ligante, se estará utilizando un homogeneizador de alta velocidad. Para determinar el porcentaje de los compuestos se usará la Ecuación 6, la cual indica el valor de la Concentración de Pigmento en Volumen Porcentual (PVC %).

$$PVC \% = \frac{v_P}{v_P + v_R} * 100 \quad Ec. 6$$

Donde:

$v_P$ : Volumen del pigmento

$v_R$ : Volumen de resina

Se establece una concentración de pigmento alta, ya que las pinturas mates requieren un alto PVC (de 40 a 85%) para asegurar que no sean brillantes, por lo tanto, tengan baja reflectancia (Muller & Poth, 2011). En la Tabla 3.2 se indican los porcentajes de PVC, así como la cantidad de material correspondiente a cada concentración.

Para mejorar la compatibilidad entre la matriz y el pigmento, se considerará el uso de agentes dispersantes compatibles con la partícula y resina en caso de ser necesario.

Tabla 3.2 Concentraciones sugeridas para pinturas

PVC (Concentración de Volumen de Pigmento)	Masa de pigmento	Resina	
		Masa	Volumen
40%	5.0553 g	21 g	20 ml
60%	10.1105 g	15.75 g	15 ml

\*Considerando una densidad de 0.4 g/ml del biocarbón (Escalante et al., 2016) y de 1.05 gr/ml de resina Acric-tec WP-19E

### 3.5.3 Metodología para elaboración de pintura

Para la elaboración de la pintura intervinieron diversas variables, entre ellas, la proporción entre pigmento, resina y agua, además de que se involucraron componentes que mejoraron la fórmula como es el caso de agentes dispersantes y espesantes.

Los pasos a seguir para elaborar la pintura fueron los siguientes:

1. Pesaje de muestras: Se utilizó como base 20 ml de resina. Misma que fue pesada para conocer su masa, y respecto a esa cantidad se determinó la masa de carbón según la concentración elegida. Se utilizó carbón activado grado comercial de cáscara de coco para establecer las condiciones adecuadas con las que se realizará posteriormente las pinturas utilizando el SOP600 producido en el laboratorio.
2. Elaboración de tinta: Después de determinar la relación agua: resina, el carbón fue dispersado en agua desionizada utilizando el sonicador de laboratorio modelo Ultrasonic Lab Disrupter UCD-150 de la marca BIOBASE (Figura 3.9) durante 5 minutos con períodos de dos segundos y una potencia del 50%, formando una tinta.

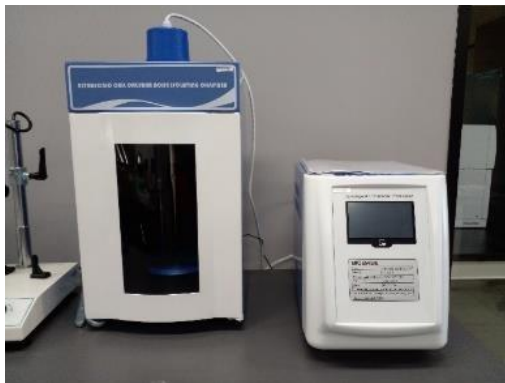


Figura 3.9 Disruptor Ultrasónico de Laboratorio UCD-150

3. Mezcla de tinta con resina y agentes dispersantes y espesantes: La tinta elaborada en el paso anterior se mezcló con la resina y agentes dispersantes y espesantes, usando el homogeneizador de alta velocidad modelo FSH-2A, Figura 3.10, a aproximadamente 8600 rpm, en tres períodos de un minuto con treinta segundos entre periodo.





Figura 3.10 Homogeneizador de Alta Velocidad FSH-2<sup>a</sup>



Figura 3.11 Pesaje de pintura en molde antiadherente para formación de películas

### 3.5.4 Preparación de sustratos

Con el objetivo de conocer las propiedades ópticas y de adherencia, se eligió como sustrato aluminio aleación 6063, ya que es un metal adecuado para receptores de baja a media temperatura debido a su buena conductividad térmica. Se cortó en placas con una dimensión de 5 cm por lado y 3 mm de grosor.

Para garantizar una mejor adherencia, se llevó a cabo un tratamiento superficial en el que las placas de aluminio fueron pulidas con lija de agua de grano 600, posteriormente se lavaron y enjuagaron con agua desionizada y se secaron en la estufa de convección durante dos horas a 65 °C. Antes y después del tratamiento, el grosor del sustrato fue medido con un micrómetro.

Finalmente, antes de depositar la pintura las placas se limpiaron con acetona. Para depositar la pintura se utilizó el aplicador de películas de la marca Elcometer 3520 (Figura 3.12a), y se eligió como grosor de película 120 micras que corresponde al valor máximo permitido por el instrumento (Figura 3.12b). Con ayuda de una pipeta, la mezcla se colocó

en un extremo de la placa y posteriormente se extendió por toda la superficie desplazando el aplicador al extremo opuesto del sustrato a una velocidad constante, como se observa en la Figura 3.12c.

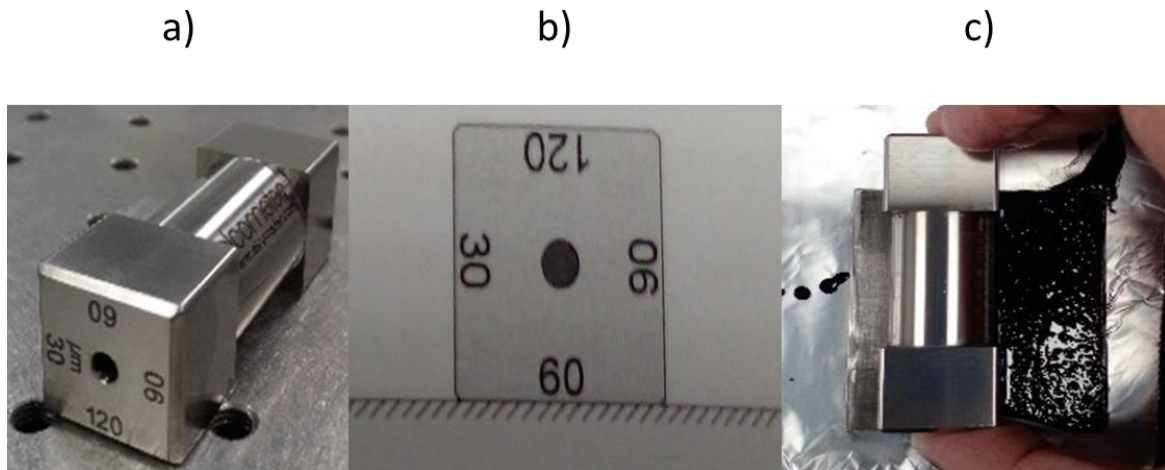


Figura 3.12 a) Elcometer 3520 Baker Film Applicator, b) Indicador de grosor de película, c) Aplicación de pintura sobre sustrato

Las condiciones de secado fueron las mismas que se utilizaron en la formación de películas.

### 3.6 CARACTERIZACIÓN DE LA PINTURA ABSORBEDORA

- Propiedades de adherencia

Para determinar la adherencia de la pintura sobre el sustrato metálico se llevó a cabo el método indicado por la norma ASTM D3359 “Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test” Ensayo B, el cual es usado generalmente en laboratorios, utilizando el kit de prueba de adhesión Elcometer (Figura 3.13).



Figura 3.13 Kit de prueba de adhesión Elcometer

Los pasos para seguir fueron los siguientes:

1.- Usando el cortador de trama cruzada (Figura 3.14) se colocó el filo de corte sobre la muestra y se presionó suavemente para después tirar hacia atrás con un movimiento continuo, realizando una serie de cortes paralelos de aproximadamente 2 cm de longitud. La presión debe ser suficiente para atravesar el revestimiento y llegar a la superficie del sustrato, tal como se muestra en la Figura 3.15.



Figura 3.14 Cortador de trama cruzada, acercamiento a navaja

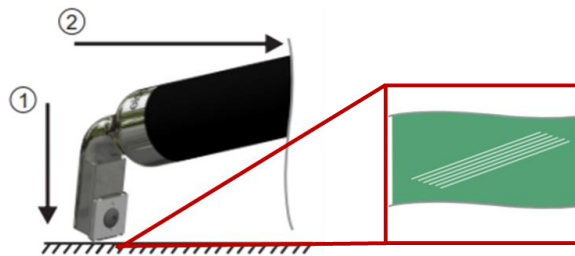


Figura 3.15 Paso 1 Procedimiento para prueba de adherencia (Cortes paralelos sobre recubrimiento)

2.- Tras realizar la primera serie de cortes, el filo de corte se posicionó a 90° respecto al primer corte y se repitió el paso 1, formando un patrón de entramado (Figura 3.16).

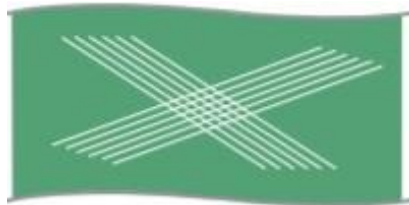


Figura 3.16 Paso 2 Prueba de adherencia (Creación de entramado en revestimiento)

3.- Se limpiaron los residuos con ayuda de la brocha y se inspeccionó que los cortes atravesaran completamente el revestimiento.



Figura 3.17 Paso 3 Procedimiento para prueba de adherencia (limpieza de residuos)

4.- Se cortó un trozo de cinta adhesiva de aproximadamente 75 mm, se centró sobre el entramado y se colocó suavemente con un dedo. Con ayuda de la goma de un lápiz se presionó para asegurar la buena adherencia entre la cinta y el revestimiento, tal y como se observa en la Figura 3.18.

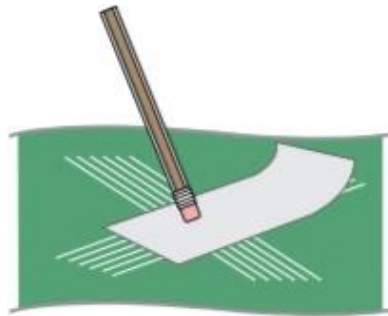


Figura 3.18 Paso 4 Procedimiento para prueba de adherencia (aplicación de cinta adhesiva)

5.- Pasados  $90 \pm 30$  s de la aplicación de la cinta, ésta se retiró en un único movimiento, colocando la cinta lo más cercana a  $180^\circ$ .

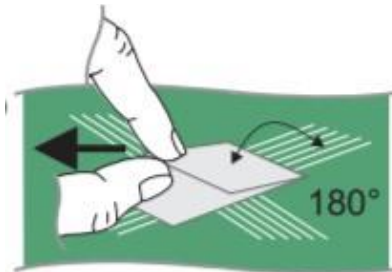


Figura 3.19 Paso 5 Procedimiento para prueba de adherencia (Retiro de cinta)

6.- Finalmente, se inspeccionó el área usando una lupa iluminada y evaluando según la escala de la norma (Figura 3.20). (American Society for Testing and Materials, 1997).

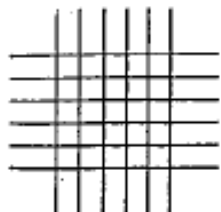


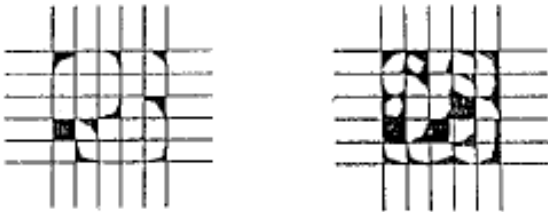
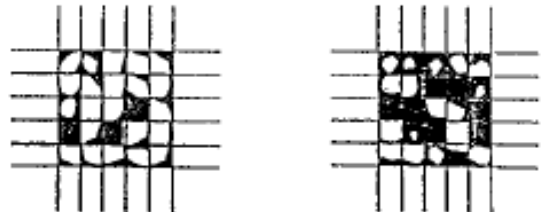
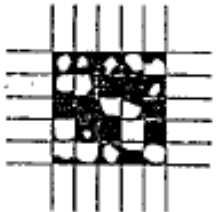
CLASSIFICATION OF ADHESION TEST RESULTS		
CLASSIFICATION	PERCENT AREA REMOVED	SURFACE OF CROSS-CUT AREA FROM WHICH FLAKING HAS OCCURRED FOR SIX PARALLEL CUTS AND ADHESION RANGE BY PERCENT
5B	0% None	
4B	Less than 5%	
3B	5 - 15%	
2B	15 - 35%	
1B	35 - 65%	
0B	Greater than 65%	

Figura 3.20 Clasificación de los resultados de prueba de adhesión

Fuente: ASTM D 3359 Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape, 1998)

- Caracterización térmica

La caracterización térmica se realizó sobre una película de la pintura, usando las técnicas de TGA y DSC para determinar la resistencia térmica de las formulaciones, en el analizador termogravimétrico NETZSCH STA 449F5 bajo una atmósfera de helio y una velocidad de calentamiento de 10 °C/ minuto en un intervalo de 30 a 800 °C. Este análisis permitió conocer la temperatura de degradación de la pintura lo cual brindó información sobre el umbral de aplicación del recubrimiento.

- Caracterización óptica

Se realizó un depósito de la película sobre un sustrato (placa de aluminio) y se midieron los espectros de reflectancia difusa de las partículas de carbón usando un espectrofotómetro Cary 5000 UV-VIS-NIR y a partir de la ecuación 2 se obtendrán los valores de absorbancia.

- Velocidad de sedimentación

Tras realizar la formulación de la pintura, se tomaron muestras de 10 ml con ayuda de una jeringa, para depositarse dentro de un vial. Las muestras fueron fotografiadas cada 24 horas durante 3 días para determinar su velocidad y grado de sedimentación.

- Intemperismo natural

Con el objetivo de evaluar y comparar el desempeño de las pinturas sobre el sustrato de aluminio, éstas fueron colocadas en un portamuestras y expuestas al exterior. Se colocaron 8 placas inicialmente, seis de ellas recubiertas con pintura AeroComex negra y dos con pintura de AC-COM con 40% de carbón y 10% de espesante (AC-COM 40C 10E). Tras realizar los análisis pertinentes para verificar un correcto funcionamiento del portamuestras, se procedió con el análisis de tres placas de pinturas recubiertas con AC-COM 40C 10E, tres placas con SOP600 40C 10E, y 2 placas de aluminio sin recubrir como material de referencia. Estas muestras fueron elegidas debido a que obtuvieron las mejores propiedades optotérmicas. El esquema del portamuestras se presenta en las Figuras 3.21 y 3.22.

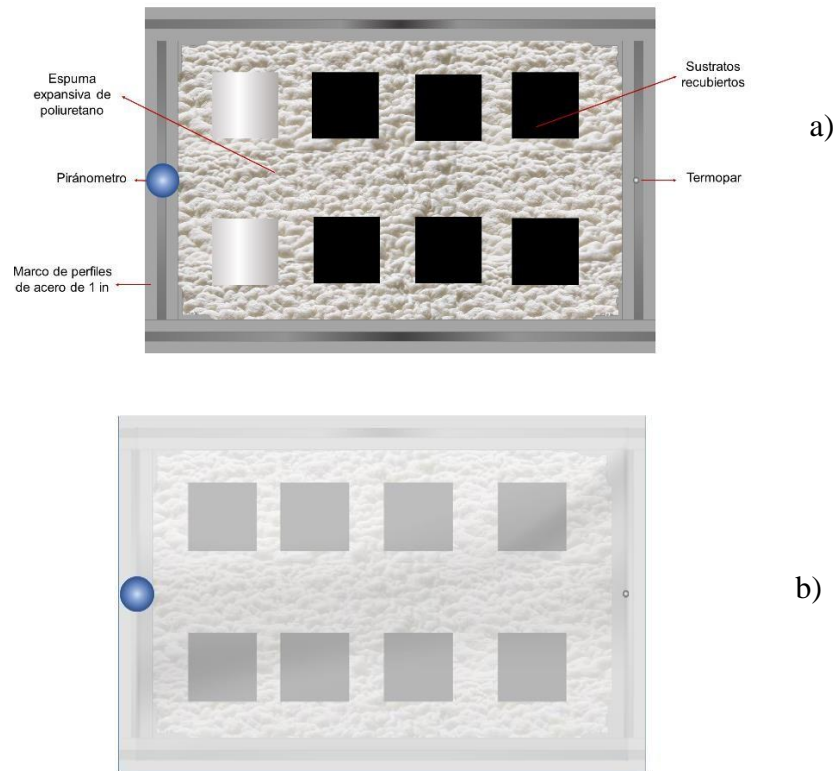


Figura 3.21 Vista superior de portamuestras a) Sin cubierta de vidrio, b) Con cubierta de vidrio

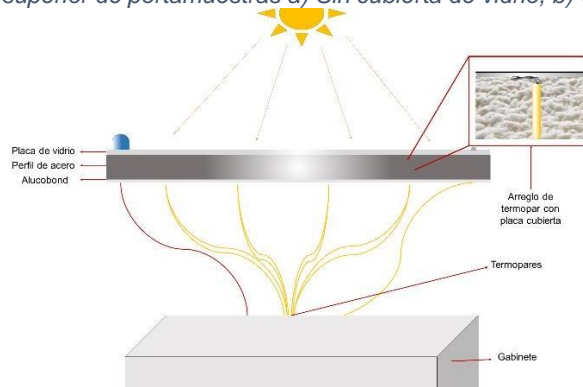


Figura 3.22 Vista frontal del portamuestras

El portamuestras está constituido por un marco hecho de perfiles de acero de una pulgada, los cuales se ensamblaron con ayuda de escuadras de unión y tornillos (Figura 3.23).

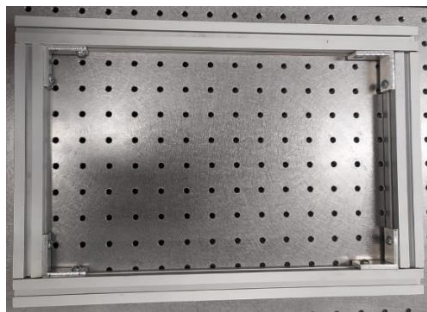


Figura 3.23 Marco de portamuestras

En la parte superior se cuenta con una placa de vidrio para evitar pérdida de calor por convección. Sobre ésta se colocó un piranómetro, el cual mide la radiación solar, así como un termopar tipo K que evaluó la temperatura ambiental. Para asegurar el aislamiento, las placas se colocaron sobre una capa de espuma expansiva de poliuretano, la cual tiene como base una placa de alucobond. Bajo cada una de las placas se colocó un termopar tipo K (Figura 3.24a), de manera que la punta tuviera contacto directo con la parte inferior del sustrato, como se observa en la Figura 3.22. El alucobond fue perforado para permitir el paso de los cables hacia un gabinete, el cual contiene dos data loggers de la marca Campbell Scientific, uno modelo CR310 (Figura 3.24b) y otro modelo CR1000X (Figura 3.24c), los cuales permitieron almacenar los datos de temperatura de las placas y del ambiente, así como la radiación.

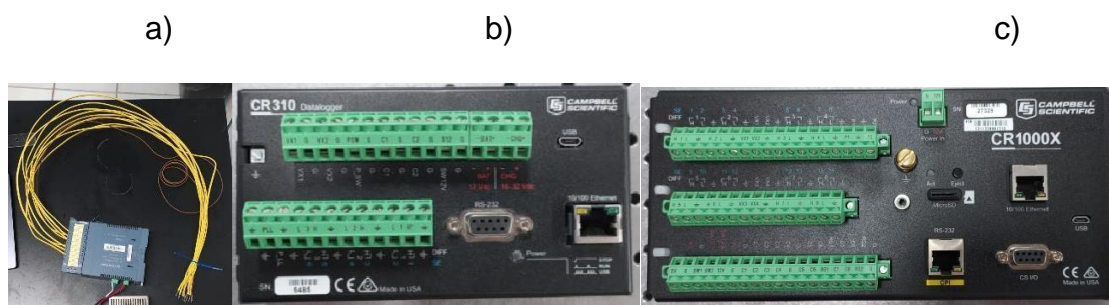


Figura 3.24 Componentes de portamuestras a) Termopares tipo K, b) Data logger CR310, c) Data logger CR1000x

Como suministro de energía se usaron baterías recargables (Figura 3.25a), así como una fuente de alimentación de la marca Traco Power, modelo TXL 035-0512D (Figura 3.25b), las cuales permitieron que incluso a falta de energía eléctrica los data loggers continúen en funcionamiento, evitando pérdida de datos. También se incorporó en el gabinete un ventilador que disipa el calor para mantener una temperatura óptima para proteger los equipos.



Figura 3.25 Sistema de carga, a) Batería recargable, b) Fuente de alimentación TXL 035-0512D



El portamuestras fue expuesto inicialmente a la intemperie durante 2 meses, recolectando los datos de temperaturas alcanzados por las placas, así como la radiación solar durante este período con el objetivo de determinar la eficiencia de conversión de las pinturas. Finalmente, las placas se recuperarán para caracterizarse ópticamente.

## 4. RESULTADOS

### 4.5 ANÁLISIS ENERGÉTICO

Los residuos de biomasa se han vuelto un problema que aumenta de manera vertiginosa, en el año 2018 se estimaron 278 millones de toneladas de residuos sólidos en México, los cuales poseían un potencial energético para generar 2,980 PJ. Mientras que en adición con los países de norteamericana se generaron 170 millones de toneladas de residuos provenientes únicamente de frutas y verduras (Esparza et al., 2020; Secretaría de Energía, 2018). Sin embargo, gran parte de estos desechos no poseen un adecuado tratamiento ni aprovechamiento, lo que conlleva a riesgos sanitarios y problemas de eliminación; por lo tanto, resulta de gran importancia el reciclaje y la reutilización de éstos, brindándoles un valor agregado, además de reducir la contaminación generada (Zhou & Wang, 2020).

La mayor parte de los desechos se dejan en el campo o en vertederos para que se descompongan de manera natural, también se incineran al aire libre para cocinar, secar y producir carbón, lo cual es un proceso de baja eficiencia que además conduce a una gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que deterioran la calidad del aire. Establecer nuevos métodos de conversión aseguran mayores eficiencias, así como menor impacto ambiental. Uno de los productos que pueden obtenerse a partir de los desechos es el biocarbón, el cual se produce por pirólisis, y es un proceso ecológico, sencillo y eficiente en comparación con otros procesos de obtención de carbones, ya que los reactores no son tóxicos y pueden usarse ilimitadamente, reduciendo la cantidad de materiales requeridos (Zhou & Wang, 2020).

Es importante mencionar que a pesar de que la sobreexplotación de la biomasa podría amenazar la seguridad alimentaria y generar problemas ambientales, el caso de los residuos agrícolas comprenden una alternativa para evitar estos inconvenientes. De manera que es posible usar una gran cantidad de derechos de manera sostenible sin dejar de satisfacer las demandas de alimentos, piensos y fibra (Bioenergy Technologies Office, n.d.; Triantafyllidis et al., 2018).

La valorización de los desechos de frutas y verduras (DFV) es un desafío, ya que se tienen que contemplar cuestiones logísticas, así como la naturaleza perecedera, entre otros factores. Aun así, los DFV constituyen una fuente potencial de valiosos productos

químicos y naturales. Se han estudiado una gran variedad de rutas, encontrando como las principales la extracción de compuestos bioactivos, la producción de enzimas y exopolisacáridos, la síntesis de bioplásticos y biopolímeros y la producción de biocombustibles. Generalmente los residuos suelen recibir tratamientos convencionales basados en las transformaciones químicas o biológicas de los compuestos orgánicos de los residuos, que dan lugar a moléculas simples como CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, etc., sólidos como compost o cenizas, hasta corrientes de aguas residuales; por lo tanto, a pesar de que es posible que estos métodos puedan proporcionar algunos productos útiles, las tecnologías aplicadas no permiten recuperar componentes complejos de los residuos, además, los riesgos ambientales siguen latentes ya que sigue habiendo un impacto en la contaminación atmosférica, emisiones de gases de efecto invernadero y producción de aguas residuales (Esparza et al., 2020).

En contraste, se proponen métodos de valorización emergentes para no destruir los nutrientes y demás compuestos valiosos, de manera que es posible que se aislen para utilizarse como tal, o para transformarse en otros químicos de alto valor agregado. Un claro ejemplo son los biocombustibles, los cuales son combustibles derivados de fuentes de biomasa, que no suponen una competencia con el sector alimentario, con bajas emisiones de carbono. Esta alternativa resulta un elemento clave para el desarrollo de un sistema energético sostenible, en donde cada combustible tiene una gran variedad de aplicaciones, como es el caso del biogás, que puede ser utilizado directamente para la generación de calor, aprovechándolo en el sector doméstico (cocción de alimentos) y en el industrial (turbinas y motores) (Esparza et al., 2020).

A pesar de que el proceso de pirólisis para aprovechar la biomasa no es un método nuevo, convencionalmente consiste en el calentamiento del material original dentro de un reactor en ausencia de oxígeno, entre 300 y 500 °C, hasta liberar la materia volátil de la biomasa. Es aquí donde se produce bioaceite líquido, así como productos gaseosos y residuos sólidos conocidos como carbón vegetal, un combustible que tiene aproximadamente el doble de densidad de energía que la materia prima original, y que alcanza mayores temperaturas. Al usar técnicas más sofisticadas de pirólisis, es posible generar carbones con características específicas; recientemente ha habido gran interés en la producción de carbones activados para su uso en el área de la electrónica, ya que

es posible obtener materiales de base carbón para el almacenamiento de energía (IRENA, 2012; Wang & Kaskel, 2012).

Gracias a diversos estudios, se han encontrado que los materiales base carbón tienen propiedades de absorción debido a la formación de poros y cavidades en su morfología. Estas características han permitido aprovechar estos materiales desde nuevos enfoques, como la absorción de contaminantes del agua (Fernández et al., 2014), hasta la absorción de luz en el espectro solar (Martínez Mireles et al., 2020).

En el caso de la cáscara de *Citrus aurantium*, al ser una fruta que no se consume fresca debido a su sabor amargo, no suele tener algún aprovechamiento, por lo que se propone su uso como precursora de partículas de carbón con propiedades optotérmicas para aplicaciones en tecnologías termosolares. Aplicar un tratamiento innovador a este residuo implica proporcionar un valor agregado, además de estar aprovechando un producto que forma el último eslabón de una cadena, en la cual la cáscara ya fue deshidratada y pulverizada, de manera que la harina resultante se introduce a un nuevo ciclo que forma parte de una nueva forma de aprovechamiento de DFV, utilizándose como pigmento en un recubrimiento, estableciendo una oportunidad de comenzar a investigar nuevos compuestos que conformen los recubrimientos absorbedores, donde gran parte de ellos están formados por reactivos sumamente tóxicos y contaminantes.

#### **4.6 BIOMASA**

- Rendimiento del carbón

Uno de los aspectos clave del proceso de pirólisis es el rendimiento del carbón obtenido. El rendimiento hace referencia a la cantidad de carbón producido en relación con la cantidad de biomasa utilizada como materia prima. La optimización de este valor es de gran importancia, ya que influye directamente en la viabilidad económica y ambiental del proceso de pirólisis como método para producir biocarbón.

Tras haber establecido las condiciones de pirólisis, se realizaron varias pruebas utilizando diferentes masas de harina de SOP, iniciando con lotes pequeños de 2.5 gr. Se obtuvo un rendimiento promedio de 29.18%, el cual coincide con resultados consultados en la literatura, donde se han reportaron rendimientos de pirólisis de

diferentes fuentes de biomasa, entre el 25% y el 30%.

La desviación estándar es de 0.2931 en un total de 6 pirólisis, en las que se obtuvieron 24.79 g de carbón.

Actualmente se están produciendo lotes de 30 g con los mismos rendimientos, por lo que se asume que la obtención de carbón es un proceso replicable que mantiene sus propiedades al sintetizar carbón en mayores cantidades.

## 4.7 CARBÓN

- Caracterización térmica

Una de las características principales que se desean en el biocarbón sintetizado para la formulación de la pintura absorbadora, es que mantenga su estabilidad térmica en el intervalo de temperaturas entre 60 y 250 °C. Esto se debe a que la pintura se fabricó para que pueda ser utilizada en tecnologías termosolares de baja a media temperatura, por ejemplo, el caso de un concentrador cilindro parabólico (CCP), el cual tiene una temperatura media de operación de 200 °C, por lo que se requiere un material estable al alcanzar temperaturas mayores a ésta.

Al realizar los análisis TGA se encontró que tanto el SOP600 como el AC-COM su mantienen una estabilidad térmica hasta temperaturas de 900 °C, encontrando que a una temperatura máxima de 400 °C se perdió aproximadamente un 4% de la masa. Además, mostraron características favorables para su uso en un recubrimiento absorbador. Es importante recalcar que sus propiedades térmicas no se ven afectadas por el cambio de masa de lote, se hicieron pruebas desde carbones obtenidos en lotes de 2 g hasta 30 g, confirmando que la pirólisis puede llevarse a cabo con masas mayores manteniendo su comportamiento térmico.

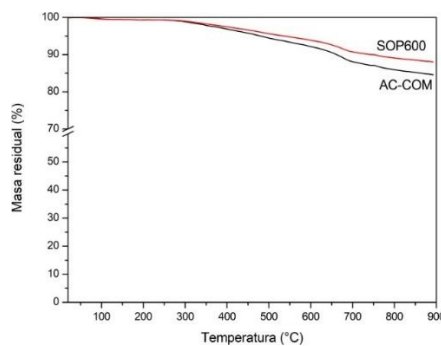


Figura 4.1 Curvas termogravimétricas de AC-COM y SOP600

- Caracterización química

En la Figura 4.2 se observan los espectros FTIR del SOP600 comparado con el carbón activado de cáscara de coco (AC-COM). Se puede apreciar que el AC-COM posee varios grupos funcionales, en contraste con el SOP600, el cual se asemeja a los resultados obtenidos en el artículo consultado (González-Canché et al., 2021). Se observan varios picos de absorción presentes en la cáscara de naranja sin procesar (SOPRAW), como es el caso del pico de 3500-3000  $\text{cm}^{-1}$ , correspondiente a la vibración de estiramiento O-H de la celulosa, pectina, hemicelulosa y lignina, ya no se observan en el material tras la pirólisis, debido a la propiedad desnaturalizante de la carbonización, la cual promueve la desintegración de los componentes. Otro efecto similar se observa en un pico a 2927  $\text{cm}^{-1}$  en el SOPRAW, el cual ya no se observa para el SOP600; este pico está relacionado con la vibración de estiramiento C-H saturado alifático de hemicelulosa, celulosa y lignina, presentes en el material precursor. En 1743  $\text{cm}^{-1}$  se presenta otro pico que indica la vibración de estiramiento del carbonilo (C=O) de los grupos carboxilo de pectina, hemicelulosa, celulosa y lignina, presentes en el SOPRAW, debido a la disociación de grupos carboxílicos en la pirólisis. El siguiente pico que muestra el SOPRAW, así como en SOP400, se encuentra en 1600  $\text{cm}^{-1}$  y se asocia al estiramiento C=C de los anillos aromáticos en la lignina, mientras que disminuye notablemente para el SOP600. Los picos que van de 1400  $\text{cm}^{-1}$  a 1300  $\text{cm}^{-1}$  pueden atribuirse a grupos alifáticos y aromáticos en el plano de los grupos metilo, metileno y metoxi, mientras que el pico a 1230  $\text{cm}^{-1}$  se relaciona con cadenas alifáticas (-CH<sub>2</sub> y -CH<sub>3</sub>) y grupos metoxi (O-CH<sub>3</sub>) de material lignocelulósico. Finalmente, en el SOPRAW se encuentra otro pico a 1000  $\text{cm}^{-1}$  que puede asignarse a la vibración de estiramiento C-O de alcoholes y grupos éster. Con esta comparación se demuestra nuevamente que el SOP600 es reproducible, manteniendo sus características constantes.

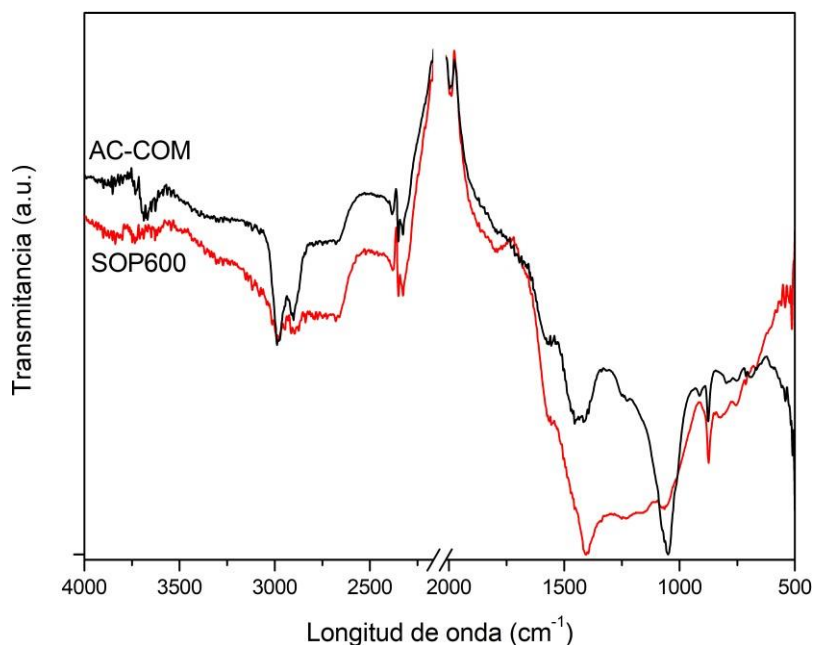


Figura 4.2 Espectros FTIR de SOP600 y AC-COM

Respecto al análisis elemental, cinco muestras de SOP600 y una de AC-COM fueron analizadas, cada una con su respectiva réplica. Los resultados se presentan en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1 Análisis de composición elemental de SOP600 y AC-COM

Muestra	%C	%H	%N	%O*
SOP600 (Muestra 1)	69.35±0.19	1.91±0.02	0.00	28.74±0.22
SOP600 (Muestra 2)	67.45±3.12	1.88±0.00	0.00	30.67±3.12
SOP600 (Muestra 3)	69.85±0.14	2.00±0.07	0.00	28.15±0.21
SOP600 (Muestra 4)	72.25±3.39	1.97±0.03	0.00	25.78±3.43
SOP600 (Muestra 5)	69.72±0.02	1.97±0.08	0.00	28.31±0.06
AC-COM	65.86±2.68	1.59±0.09	0.00	32.55±2.59

\*Obtenida por diferencia (100-C-H-N-S)

De acuerdo con el análisis, consistente con lo consultado en la literatura, el nitrógeno es un elemento menor del biocarbón, mientras que la insaturación o aromaticidad del biocarbón puede ser evaluada a mediante las composiciones de C, H y O. A partir de la

relación H/C se determina la estabilidad del biocarbón (a menor radio mayor estabilidad), además de que las relaciones H/C y O/C se correlacionan negativamente con la aromaticidad en el biocarbón. El contenido de oxígeno también juega un rol importante en el comportamiento químico de la superficie del biochar, ya que está relacionado con el número y composición de los grupos funcionales sustituidos (Leng & Huang, 2019).

La relación O/C característica del negro de carbón se encuentra en el rango de 0 a 0.6. Este parámetro resulta interesante ya que entre más pequeño es, hay una mayor influencia en la estabilidad térmica y química. K. Spokas afirmó que los biocarbones con una relación molar O/C menor a 0.2 son generalmente los más estables y poseen una vida media estimada de más de 1000 años, los que están entre 0.2 a 0.6 tienen vidas intermedias de 100 a 1000 años y finalmente, los biocarbones con una relación superior a 0.6 poseen una vida media menor a 100 años (Spokas, 2010).

Las relaciones O/C del SOP600, así como del AC-COM se observan en la Tabla 4.2.

*Tabla 4.2 Relación O/C de SOP600 y AC-COM*

<b>Muestra</b>	<b>O/C</b>
SOP600	0.41±0.03
AC-COM	0.50±0.06

Se puede confirmar que el radio O/C de los carbones obtenidos se mantienen en el espectro de los materiales del negro de carbón, lo cual se asocia con una buena estabilidad térmica y química, además de un tiempo de vida medio de 100 a 1000 años.

Por otra parte, la relación H/C permite evaluar el grado de alteración termoquímica que produce estructuras de anillos aromáticos fusionados en el material. Un H/C más bajo hace referencia a una estructura de anillos aromáticos fusionados más altos y mayor aromaticidad (Leng & Huang, 2019). En la Tabla 4.3 se puede observar el índice de aromaticidad de los SOP600 y el AC-COM.

*Tabla 4.3 Relación H/C de SOP600 y AC-COM*

<b>Muestra</b>	<b>H/C</b>
SOP600	0.03±0.00
AC-COM	0.02±0.00



Finalmente, se puede concluir que los biocarbonos obtenidos poseen una alta resistencia a la degradación microbiana y química, gracias a su bajo índice de aromaticidad que permite alcanzar una mayor estabilidad.

Respecto a la caracterización por DRX se obtuvieron los difractogramas mostrados en las Figuras 4.3 y 4.4.

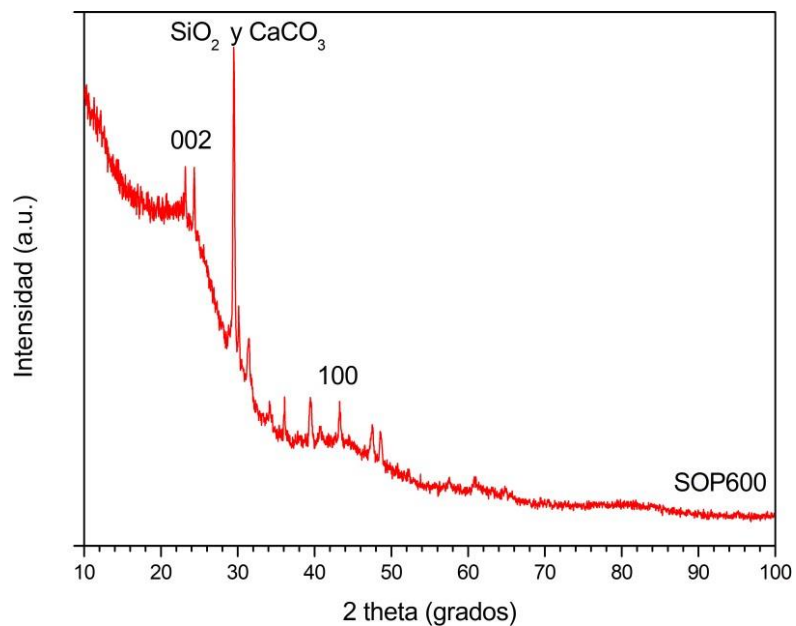


Figura 4.3 Difractograma de SOP600

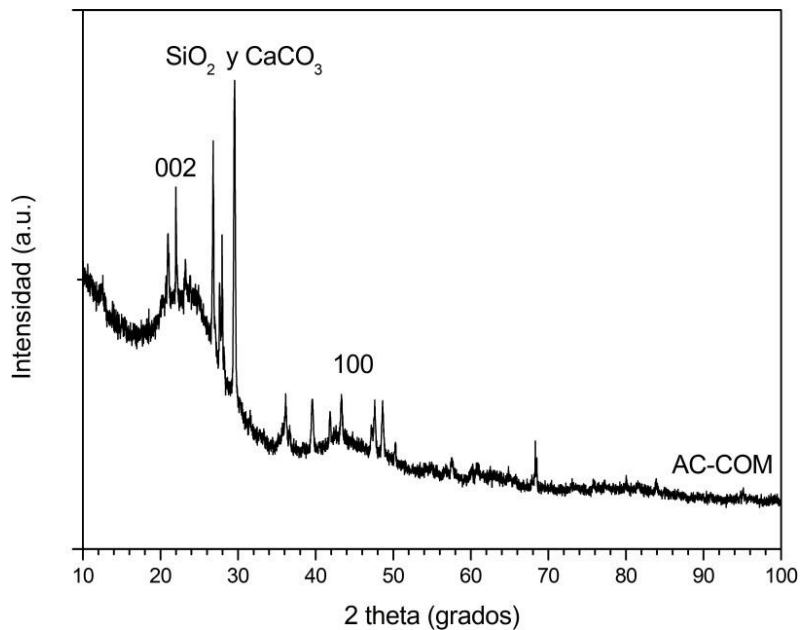


Figura 4.4 Difractograma de AC-COM

Los biocarbones muestran picos en aproximadamente  $23^\circ$  y  $44^\circ$ , relacionados a los planos 002 y 101 de las estructuras gráficas, siendo esto un indicador de carbono amorfo (lo esperado por tratarse de un material orgánico), así como cierto grado de grafitización (Xu et al., 2019; Zhang et al., 2016).

También se observa un pico en  $29.5^\circ$ , el cual puede relacionarse con la presencia de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{CaCO}_3$ , de acuerdo con la literatura consultada, se sugiere que el aumento de la temperatura de pirólisis se deriva en una mayor producción de cenizas, las cuales contienen sales alcalinas como el carbonato de calcio (González-Canché et al., 2021).

Respecto al AC-COM, éste también presenta un pico agudo de difracción en  $2\theta = 29.5^\circ$  y otro en  $39.4^\circ$ , los cuales se asocian a minerales silicatos y cuarzo, mientras que el pico observado en  $44.5^\circ$  puede deberse a la presencia de Zn y Na usados durante el proceso de activación (Bakti & Gareso, 2018). Los picos en  $24^\circ$  y  $44^\circ$  revelan una estructura carbonosa amorfa, mientras que el pico cristalino se puede ver a  $68^\circ$  (ABDULLAH et al., 2018; Das et al., 2015).

La intensidad de los picos agudos que contiene el AC-COM puede sugerir un mayor contenido de cenizas en comparación con el carbón sintetizado, lo cual representaría una ventaja del SOP600.

- Propiedades ópticas

Respecto a las propiedades ópticas, se analizó una muestra de carbón obtenida en un lote de 15 g, así como otra obtenida en un lote de 30 g, encontrando que todas poseían valores de reflectancia difusa muy parecidas entre ellas. La Figura 4.5 muestra los espectros de reflectancia difusa de los carbones para el rango de longitud de onda de 250-2500 nm. De acuerdo a los antecedentes, el intervalo de reflectancia difusa del SOP600 tendría valores entre el 6.2 a 13.8%, mientras que los resultados obtenidos obtuvieron un promedio de 6.32 a 12.87% con una desviación estándar de 0.29 y 1.18 respectivamente.

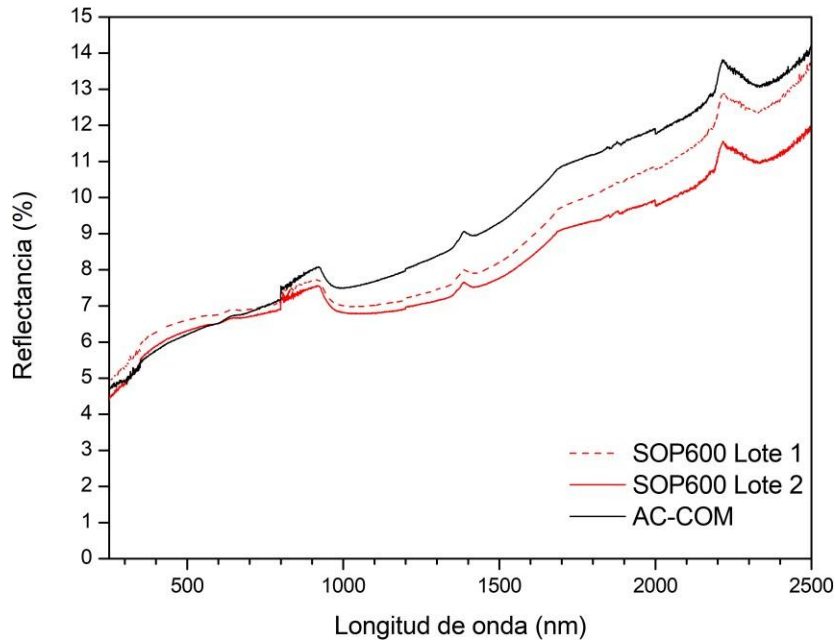


Figura 4.5 Reflectancia difusa UV-Vis-NIR de muestras de SOP600 y AC-COM



En la gráfica se observa como la reflectancia del AC-COM es mayor que la del SOP600, de manera que se esperan valores de reflectancia menores en la pintura al utilizar el carbón experimental. Es importante mencionar que para lograr una conversión fototérmica óptima el material absorbente solar debe mostrar una reflectancia baja en el intervalo UV-Vis-NIR, por lo que el biocarbón proveniente de la cáscara de naranja *Citrus aurantium* muestra características favorables para su uso como pigmento en la formulación de un recubrimiento absorbedor para su aplicación en tecnologías termosolares.

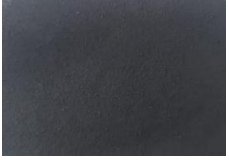

## 4.8 PINTURA ABSORBEDORA

### 4.8.1 Determinación de variables y condiciones para la elaboración de pinturas

Para las primeras formulaciones de pintura, se establecieron valores del 30, 40 y 50% de carbón, y dentro de estas condiciones, la proporción de agua:resina también fue cambiando. Estas pruebas están sintetizadas en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Formulaciones de prueba

Concentración carbón	Concentración resina	Proporción Agua: Resina	Descripción	Imagen
30%	70%	1:1	Recubrimiento con poca cobertura, textura acuosa antes de secarse y textura granulosa después de secarse, además de color mate. Su adhesión fue excelente, sin embargo, se encuentran problemas para depositar de manera uniforme debido a su estructura líquida.	
40%	60%	1:1	La pintura posee una textura uniforme, mate y presenta buena cobertura, y estableciendo como máximo de agua la proporción 1:1 debido a que es una mezcla muy líquida. Posee mejores propiedades respecto a las demás pruebas.	

50%	50%	2:1	Muestra una buena textura, estableciendo como mínima proporción de agua 2:1, debido a que se comienza a volver más espesa y difícil de depositar. Al secarse muestra una textura granulada y mate, con buena cobertura provocando una mala adherencia.	
50%	50%	3:1	Pintura espesa y fácil de depositar con el aplicador de películas, al secarse se volvió mate con puntos brillantes. Buen recubrimiento y adhesión.	

Después de los primeros intentos se encontró que la pintura que mostraba mejores propiedades, tanto de viscosidad, color, textura y adherencia fue la formulación del 40% C, relación agua: resina 1:1. Así mismo, se determinó que el porcentaje mínimo que debía utilizarse en una pintura era del 20%, ya que, al reducir esta cantidad la pintura se volvía muy líquida dificultando la tarea de depositarla sobre la placa, además de mostrar baja cobertura debido a que podía observarse la superficie de la placa de aluminio. Posteriormente, se sugirió el uso de un agente dispersante, el cual mejoraría la homogeneización del pigmento en la fase líquida, y se estableció un porcentaje del 1% respecto al peso total de la mezcla. Como resultado se obtuvieron pinturas más homogéneas, con poca sedimentación y mejores valores de adherencia, sin embargo, era necesario que éstas aumentarían su viscosidad, por lo que finalmente se agregó a la formula un agente espesante en una proporción del 5 al 10% de la masa total, obteniendo formulaciones espesas pero fluidas, uniformes y con una sedimentación mínima. También se fijó la condición de depositar dos manos de pintura sobre la placa para asegurar una buena cobertura.

Finalmente, se establecieron los siguientes parámetros para formar la matriz

experimental, los cuales se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Concentraciones para formulaciones de pintura.

<b>Carbón</b>	<b>Espesante</b>	<b>Dispersante</b>
20%	5%	1%
20%	10%	1%
40%	5%	1%
40%	10%	1%

Para realizar pruebas de TGA, así como observar la textura y flexibilidad de la película de la pintura, se utilizaron moldes de silicón y después de secarse se obtuvieron películas como la mostrada en la Figura 4.6.



Figura 4.6 Película de pintura

#### 4.8.2 Resultados de pruebas de adherencia

##### 1. Formulación 20% C, 5% E, 1% D

Se formó una pintura con poca viscosidad, al aplicar dos manos mostró buena cobertura, pero su color era ligeramente grisáceo. La pintura seca tiene textura granulosa, es mate y tiene una adherencia excelente, clasificándola como 5B. Su grosor fue de aproximadamente 115 micras.

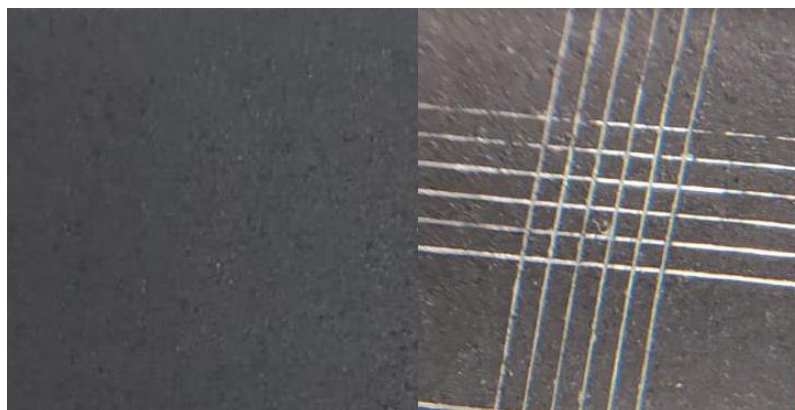
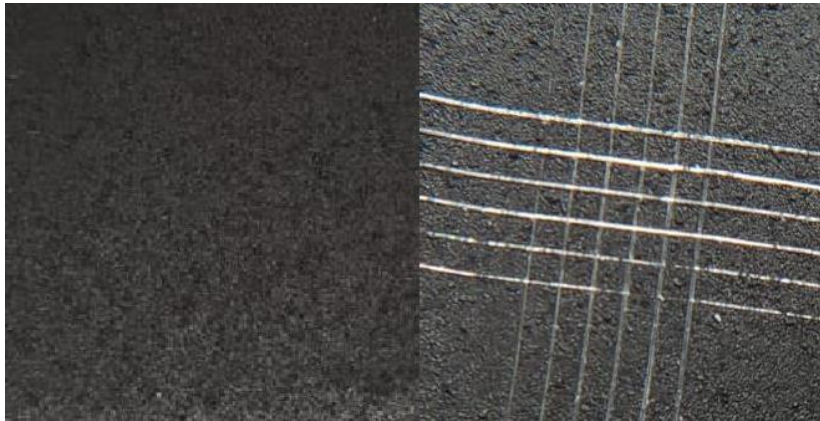


Figura 4.7 Formulación 20% C, 5% E, 1% D, Placa cubierta y prueba de adherencia

## 2. Formulación 20% C, 10% E, 1% D

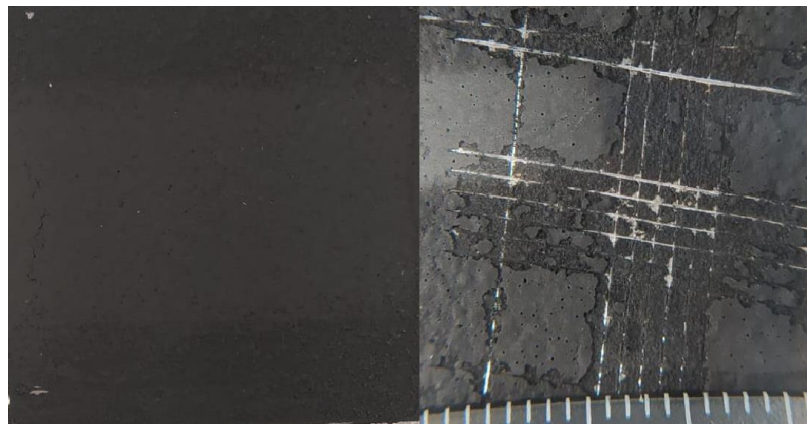
La pintura mostró una textura mejor a la anterior gracias al aumento del agente espesante, mejorando su aplicación y su cobertura. Al secarse, se formó una película flexible, con buena cobertura y textura granulosa, pero manteniendo el color mate, con un grosor aproximado de 125 micras y una adherencia 5B.



*Figura 4.8 Formulación 20% C, 10% E, 1% D, Placa cubierta y prueba de adherencia*

## 3. Formulación 40% C, 5% E, 1% D

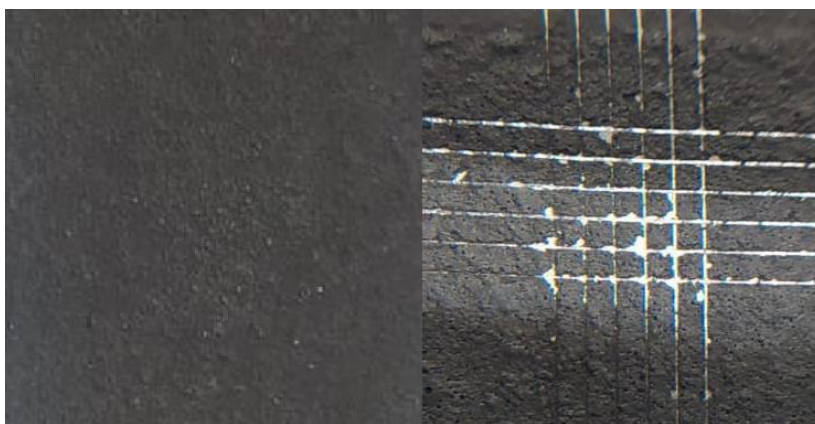
Se formó una pintura muy espesa, difícil de aplicar, como consecuencia, las películas se fracturaban con facilidad. La textura es lisa, color mate, un grosor de 280 micras, y su adherencia es mala, tras realizar la prueba se perdió una capa de pintura, clasificando el resultado con un 3B.



*Figura 4.9 Formulación 40% C, 5% E, 1% D, Placa cubierta y prueba de adherencia*

## 4. Formulación 40% C, 10% E, 1% D

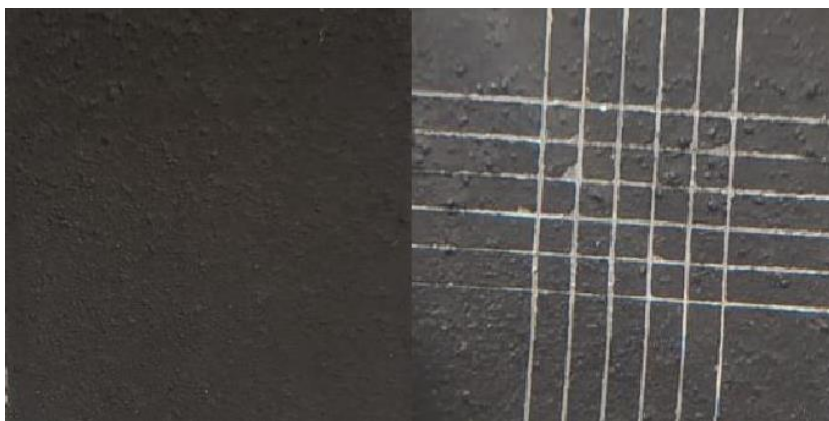
La pintura mostró características favorables respecto a su homogeneidad y viscosidad, por lo que la aplicación fue muy sencilla. Al secarse, la textura era granulosa, con un color negro mate intenso y un grosor de 175 micras. El resultado de la adherencia fue de 3B.



*Figura 4.10 Formulación 40% C, 10% E, 1% D, Placa cubierta y prueba de adherencia*

#### 5. Formulación 40% C, 10% E, 10% D

Se formó una pintura con características excelentes, uniforme, viscosidad adecuada para aplicar sobre sustratos, no tuvo sedimentación y mostró buena cobertura. Al secarse, la pintura se volvió mate, con una textura ligeramente granulosa y adhesión buena, clasificándola en 4B.



*Figura 4.11 Formulación 40% C, 10% E, 10% D, Placa cubierta y prueba de adherencia*

#### **4.8.3 Resultados de pruebas ópticas**

Tras obtener las primeras placas con las formulaciones establecidas en la Tabla 4.5, se procedió a realizar su caracterización óptica mediante la medición de la reflectancia difusa, la cual se muestra en la Figura 4.12. Los rangos de reflectancia están dados en la Tabla 4.6.



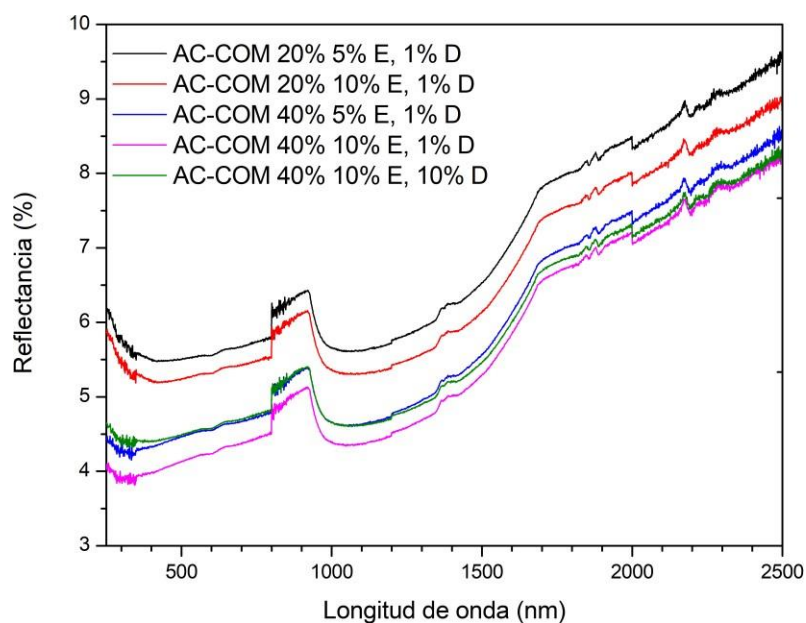


Figura 4.12 Reflectancias difusa de pinturas con AC-COM

Tabla 4.6 Rangos de reflectancia de pinturas con AC-COM con diferentes concentraciones

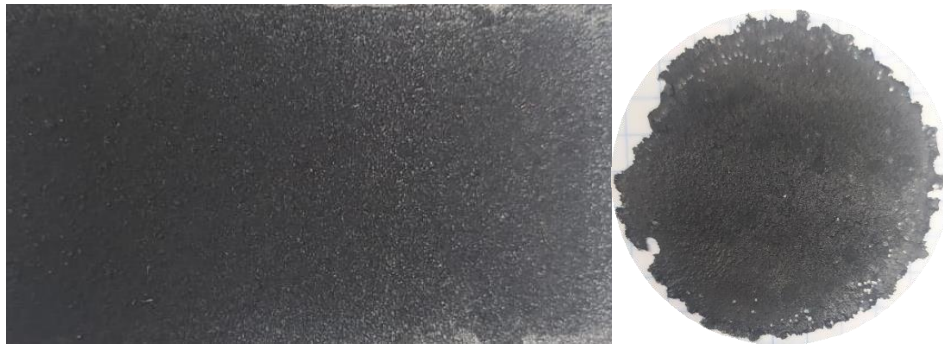
Formulación	Rangos de reflectancia
20% C, 5% E, 1% D	5.24- 8.96%
20% C, 10% E, 1% D	5.50- 9.50%
40% C, 5% E, 1% D	4.46- 8.47%
40% C, 10% E, 1% D	4.12- 8.14%
40% C, 10% E, 10% D	4.48- 8.16%

Si bien, es un punto importante el trabajar con formulaciones que requieran bajas cantidades de carbón debido a la poca disponibilidad del material, es esencial obtener una pintura que mantenga rangos de reflectancia bajos. Esta característica se asocia a una mayor absorción solar, por lo que las condiciones de 40% carbón, 10% de espesante y 1% de dispersante se posiciona como una de las mejores opciones para la siguiente etapa de obtención de la pintura utilizando el SOP600.

Otro aspecto que pudiera influir en el aumento de la reflectancia es el uso de los agentes dispersantes y espesantes, pues se observa en los resultados que aquellas formulaciones que poseen mayor cantidad de aditivos presentan reflectancias menores. Esto pudiera estar relacionado a que la mezcla es más homogénea.

Después de establecer las condiciones para elaborar las pinturas y determinar aquellas que permitían obtener pinturas con mejores propiedades ópticas y mecánicas, se procedió a realizar las pinturas con SOP600. Las primeras formulaciones que se

realizaron fueron con el 20% de carbón, 1% de dispersante y 5% y 10% de espesante. Los resultados se observan en las Figuras 4.13 y 4.14:

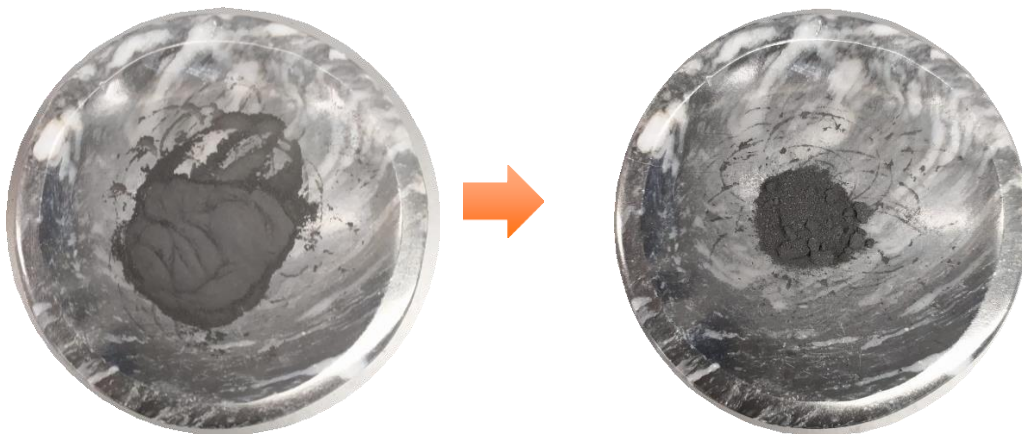


*Figura 4.13 Pintura con SOP600, 20%C, 1%D, 5%E (SOP600 sin proceso de molienda)*



*Figura 4.14 Pintura con SOP600, 20%C, 1%D, 10%E (SOP600 sin proceso de molienda)*

Las pinturas resultaron poco homogéneas, mostrando baja cobertura sobre el sustrato metálico y un acabado poco uniforme, además de presentar una película frágil y quebradiza con alta presencia de poros. Por lo tanto, se optó por realizar un proceso de molienda previo de SOP600, utilizando un mortero de cuarzo, con el objetivo de reducir el tamaño de partícula, logrando obtener un polvo de textura muy fina, como se observa en la Figura 4.15.

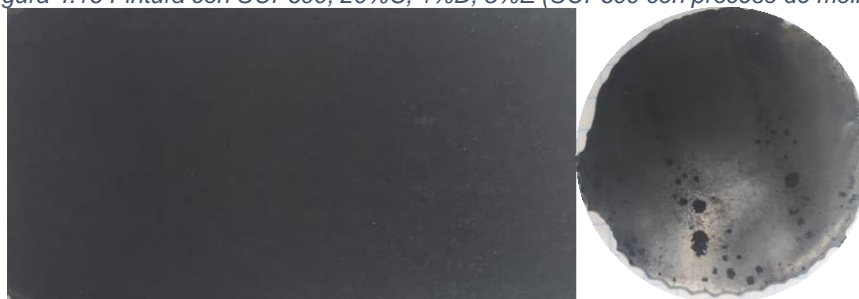


*Figura 4.15 Molienda de SOP600, antes y después*

Teniendo el SOP600 preparado, se procedió a repetir las formulaciones anteriores, obteniendo los siguientes resultados:

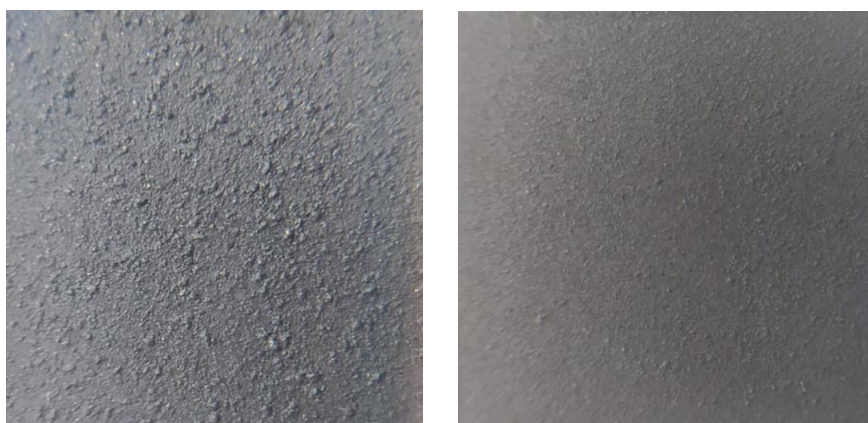


*Figura 4.16 Pintura con SOP600, 20%C, 1%D, 5%E (SOP600 con proceso de molienda)*



*Figura 4.17 Pintura con SOP600, 20%C, 1%D, 10%E (SOP600 con proceso de molienda)*

Es notable el cambio de la pintura, tanto depositada sobre el sustrato como en la película, al utilizar SOP600 molido, obteniendo una mezcla homogénea y de gran cobertura, debido a que el carbón en forma de polvo más fino permitía una mejor disolución en agua, logrando una tinta uniforme. La película resultó más resistente, con mayor humectación y flexibilidad gracias a la mezcla homogénea de la resina, espesante y dispersante en la tinta.

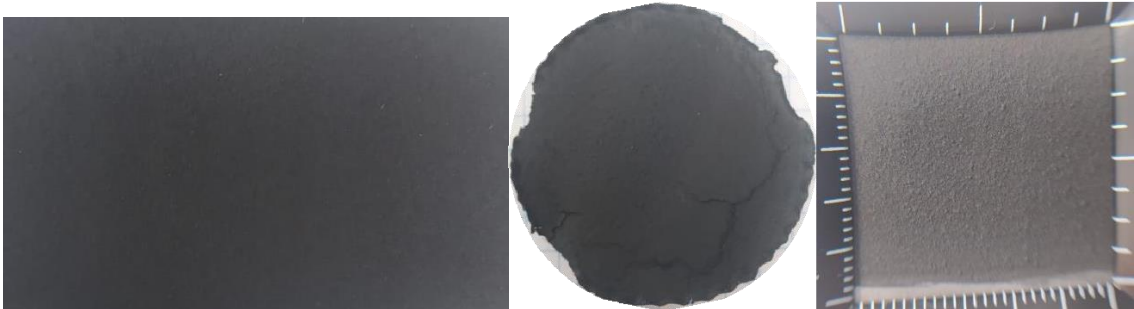


*Figura 4.18 Pinturas de SOP600 antes y después de proceso de molienda*

Finalmente, se procedió a realizar las formulaciones con el 40% de carbón, 1% de dispersante y 5% y 10% de espesante.



*Figura 4.19 Formulación de SOP600 40%C, 1%D, 5%E*



*Figura 4.20 Formulación de SOP600 40%C, 1%D, 10%E*

Las formulaciones con el 40% de carbón resultaron altamente uniformes, mates y homogéneas, además de mostrar poca porosidad gracias al uso del SOP600 molido. Estandarizadas las formulaciones con SOP600, se continuó con la etapa de caracterización de la pintura para determinar aquellas con mejores resultados y evaluarlas en el portamuestras.

#### **4.8.4 Propiedades térmicas de la pintura**

Una de las características esperadas en una pintura absorbadora, es su capacidad de soportar altas temperaturas, gran flujo solar concentrado y fuertes variaciones de flujo a lo largo de la vida útil de la tecnología en la que sea aplicada, lo que se traducirá con altas eficiencias y bajos costos de mantenimiento. Por este motivo es necesario elegir como materia prima de las pinturas absorbadores materiales con alta durabilidad y resistencia. Las propiedades térmicas de los componentes y la pintura permitirán determinar la temperatura de degradación del material lo que permitirá adecuarla a algún colector que trabaje bajo esas condiciones. En la Figura 4.21 se muestran las curvas termogravimétricas obtenidas por la resina acrílica y las diferentes formulaciones realizadas con AC-COM molido (AC-COM\_M) y SOP600.

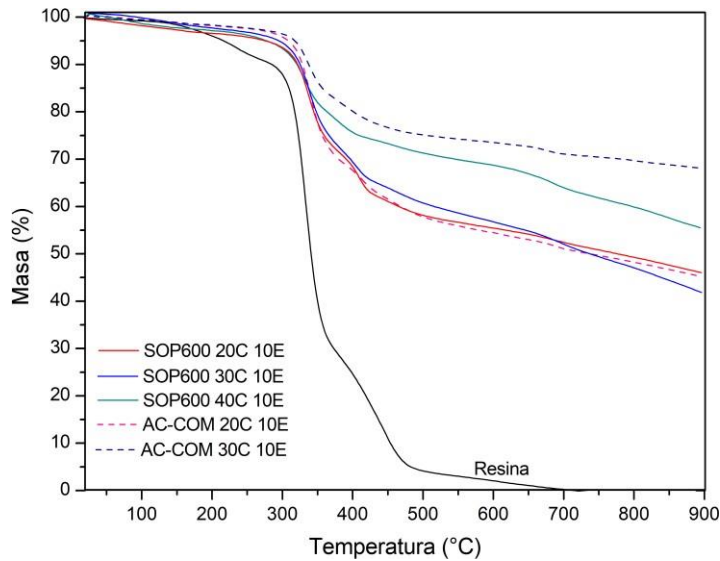


Figura 4.21 Curvas termogravimétricas de pinturas con SOP600, AC-COM\_M y Resina acrílica

Los resultados indican que todas las formulaciones mantienen estabilidad térmica hasta aproximadamente 340 °C, y conforme se reduce la cantidad de carbón, la estabilidad térmica igualmente va en descenso. Para observar de mejor manera las temperaturas en las que se comienza con el proceso de descomposición, se obtuvo la derivada de la masa, la cual se muestra en la Figura 4.22.

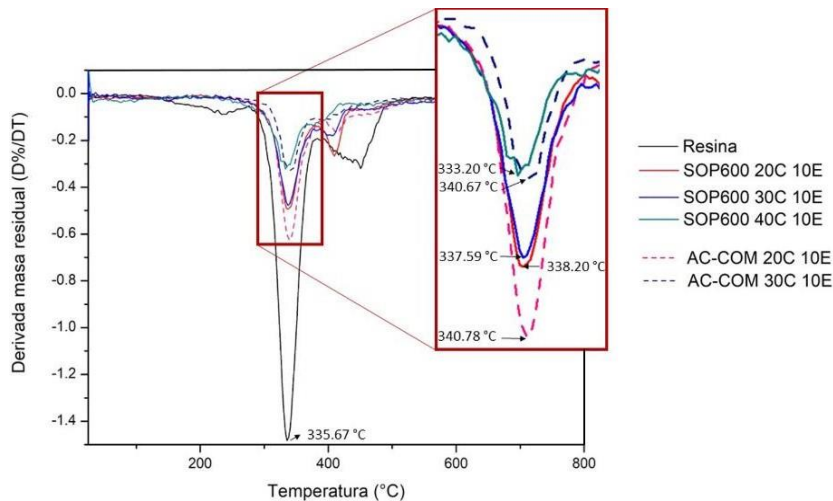


Figura 4.22 Derivada de la masa de pinturas con SOP600, AC-COM\_M y Resina acrílica

Se observa en la Figura 4.22 la temperatura de descomposición de la resina a 335.67 °C, misma que al agregar carbón para llevar a cabo las pinturas, logra un aumento hasta 340 °C, lo cual sugiere que la adición de carbón brinda un aumento en la resistencia térmica

de la matriz, en la cual también se observan tres eventos de pérdida de masa a 233, 335 y 450 °C, a diferencia de las formulaciones, las cuales muestran una mejor estabilidad térmica con masas residuales de hasta 45%.

Los valores de temperaturas de descomposición de las formulaciones son similares a los obtenidos en un recubrimiento a base de hollín (López-Sosa et al., 2020), en los cuales se observa que la formulación comienza a degradarse a partir de los 300 °C, por lo que se puede confirmar que la pintura posee propiedades térmicas consistentes con los antecedentes de pinturas realizadas a base de material carbonoso.

Los resultados indican que es una formulación adecuada para su aplicación en tecnologías termosolares de baja a media temperatura, ejemplo de estas tecnologías son los colectores de placa plana, colectores de tubos al vacío y concentrador cilindro parabólicos.

#### 4.8.5 Caracterización química de la pintura absorbidora

La Figura 4.23a muestra el espectro ATR-FTIR del AC-COM, AC-COM 20C 5E y la resina acrílica. El AC-COM exhibe un pico en  $2988\text{ cm}^{-1}$ , el cual está relacionado con la vibración de estiramiento C-H alifático, siendo una característica de los compuestos orgánicos, mientras que la banda en  $1049\text{ cm}^{-1}$  muestra la presencia de estiramiento C-O. La ausencia de picos en los materiales carbonosos provenientes de fuentes lignocelulósicas está relacionada con la descomposición de la materia prima como consecuencia del proceso de activación química y pirólisis al que fueron sometidos el AC-COM y el SOP600, en donde los grupos funcionales de la materia prima se evapora como material volátil (Coates, 2006; Köseolu & Akmil-Başar, 2015).

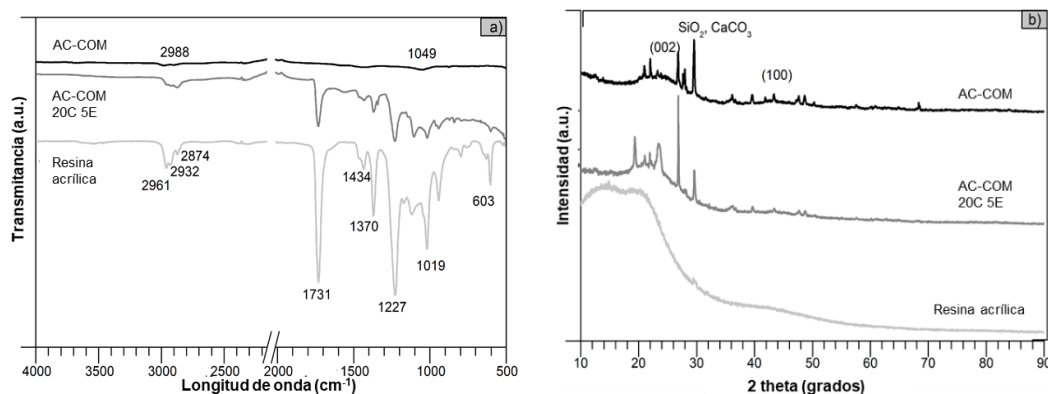


Figura 4.23 a) Espectros ATR-FTIR de AC-COM, AC-COM 20C 5E y Resina acrílica, b) Patrones DRX de AC-COM, AC-COM 20C 5E y Resina acrílica

Por otra parte, el espectro ATR-FTIR de la resina muestra una banda en  $2874 - 2961 \text{ cm}^{-1}$ , la cual se atribuye a las vibraciones de estiramiento  $-\text{CH}_2-$  y  $-\text{CH}_3-$  del polímero de acrilato. El pico agudo en  $1434 \text{ cm}^{-1}$  se asigna a las vibraciones de estiramiento  $\text{C}=\text{O}$  del polímero acrilato. El pico de  $1434 \text{ cm}^{-1}$  corresponde a la vibración de flexión del  $\text{CH}_2$  simétrico y del  $\text{CH}_3$  asimétrico, mientras que los picos de  $1370 \text{ cm}^{-1}$  y  $1227 \text{ cm}^{-1}$  están asociados con la vibración de estiramiento de los grupos carbonato y éster, respectivamente. Finalmente, los picos en  $1019$  y  $603 \text{ cm}^{-1}$  se atribuyen a la vibración de estiramiento del enlace  $\text{C}-\text{O}$  (Cogulet et al., 2019; Yong & Liang, 2019).

Estos espectros FTIR permiten observar un comportamiento representativo que se tendría en todas las formulaciones al añadir biocarbón a la resina acrílica, observándose una disminución de la región de la huella digital entre  $900$  y  $1500 \text{ cm}^{-1}$  en el espectro de la pintura, lo que se puede atribuir al contenido de carbono, además la pintura muestra grupos funcionales como resultado de la contribución de la resina acrílica.

En la Figura 4.23b se observan los patrones DRX del AC-COM, AC-COM 20C 5E y la resina acrílica. De manera similar, es posible tomar como comportamiento representativo este patrón al comparar con otras formulaciones. En este se revela el carácter amorfo de la resina acrílica, así como los picos del AC-COM en  $23^\circ$  y  $44^\circ$  relacionados con los planos 002 y 100 que indican la presencia de carbono amorfo y cierto grado de grafitización. El patrón DRX de la pintura permite apreciar que hay una contribución por parte del AC-COM.

#### **4.8.6 Resultados de evaluación de sedimentación**

Un aspecto importante en las pinturas es que el pigmento pueda mantenerse en suspensión, por lo que es necesario evaluar el tiempo de sedimentación para establecer el uso de agentes dispersantes y espesantes, y lograr una formulación adecuada, la cual tenga una sedimentación mínima y buena viscosidad que favorezca su aplicación en los sustratos.

Para determinar de manera cualitativa la sedimentación de las pinturas, éstas fueron observadas durante dos días, y los resultados se tienen en las Figuras 4.24, 4.25 y 4.26.

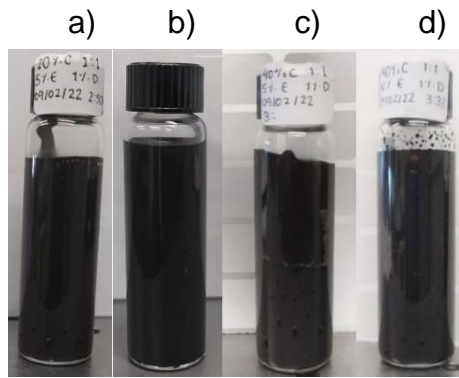


Figura 4.24 Evaluación de sedimentación día inicial a) Formulación 20%C, 5%E, b) Formulación 20%C, 10%E, c) Formulación 40%C, 5%E, d) Formulación 40%C, 10%E

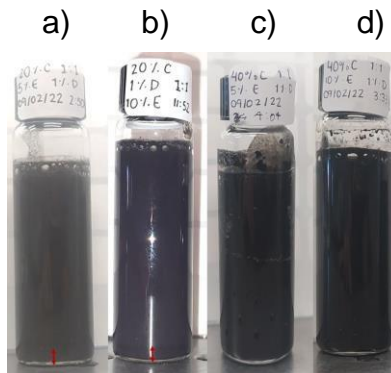


Figura 4.25 Evaluación de sedimentación 24 horas después a) Formulación 20%C, 5%E, b) Formulación 20%C, 10%E, c) Formulación 40%C, 5%E, d) Formulación 40%C, 10%E

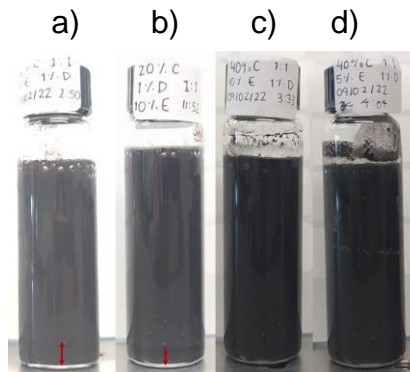


Figura 4.26 Evaluación de sedimentación 48 horas después a) Formulación 20%C, 5%E, b) Formulación 20%C, 10%E, c) Formulación 40%C, 5%E, d) Formulación 40%C, 10%E

Se puede observar en la Figura 4.24, cuando las pinturas recién se depositaron en los viales, que todas presentaban homogeneidad y un color negro intenso. A las 24 horas, las pinturas continuaron uniformes y sin muestra de sedimentación, sin embargo, al tercer día se observó que las formulaciones que contenían el 20% de carbón con el 5% de espesante comenzó a mostrar las partículas de carbón al fondo del vial en mayor medida que la formulación del 20% carbón, 10% espesante. Por otra parte, los viales que



contenían las formulaciones del 40% de carbón no mostraron una sedimentación significativa.

#### 4.8.7 Resultados pruebas de absorbanza solar

Las formulaciones del 20 y 40% de carbón con el 5 y 10% de espesante fueron caracterizadas ópticamente obteniendo las reflectancias difusas, para posteriormente convertir en absorbanza solar; los resultados se muestran en la Figura 4.27.

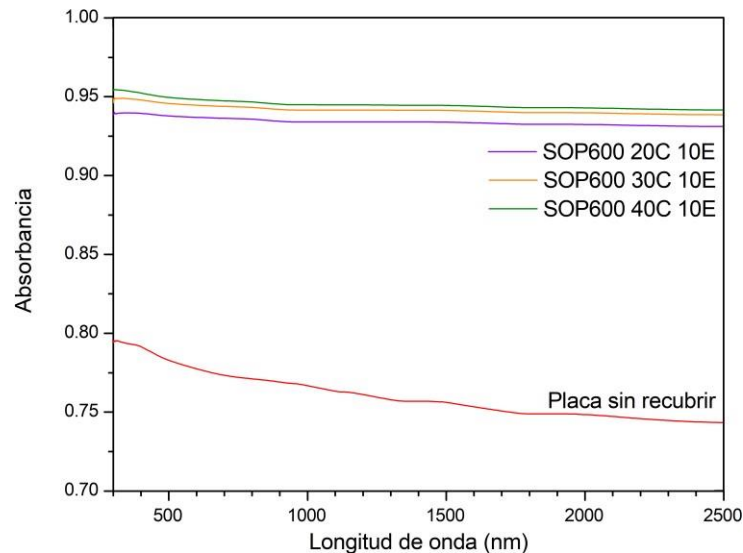


Figura 4.27 Absorbanza de recubrimientos de SOP600

En esta gráfica se observa una clara tendencia al aumento de la absorbanza conforme la cantidad de carbón es mayor, mientras que la placa sin recubrir es muy baja debido a su alta reflectividad. La placa recubierta por la formulación SOP600 40C 10E muestra una absorbanza promedio del 95.5%, posicionándola como una opción atractiva para su uso en tecnologías termosolares, además de mostrar resultados competitivos con recubrimientos absorbedores comerciales, de acuerdo con la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Comparación de absorbanzas para diversos recubrimientos absorbedores solares

Pintura	Absorbanza (%)
SOP600 40% C 10%E	94.66±0.003
Pyromark ® 2500	95
Solkote ®	93
Comex	84
Thurmalox ® 250	93

Fuente: Martínez, L. (2021) OPTICAL THERMAL CHARACTERIZATION OF A HIGH FLUX SOLAR SIMULATOR FOR THE DEVELOPMENT OF SPECTRAL ABSORPTION APPLICATIONS

#### 4.8.8 Resultados preliminares de Portamuestras

Con el objetivo de determinar la eficiencia de las pinturas absorbedoras solares sobre sustrato de aluminio, las placas recubiertas fueron colocadas en un banco de pruebas (Figura 4.28), donde se colocaron termopares tipo k debajo de cada muestra para monitorear las temperaturas alcanzadas, y los datos fueron recolectados por un datalogger de la marca Campbell Scientific modelo CR1000X en el período del 27 de julio del 2022 al 14 de septiembre del 2022.



Figura 4.28 Banco de pruebas

El acomodo de las placas con sus respectivos termopares se observa en la Figura 4.29, en donde las placas 7 y 8 corresponden a los sustratos recubiertos con pintura absorbidora solar de cáscara de coco con una formulación del 40% de carbón y 60% de resina, así como 1% de agente dispersante y 10% de agente espesante (porcentaje respecto a la masa total). El resto de las placas están cubiertas por pintura comercial AeroComex negra; la configuración de los termopares se puede observar en la Tabla 4.8.

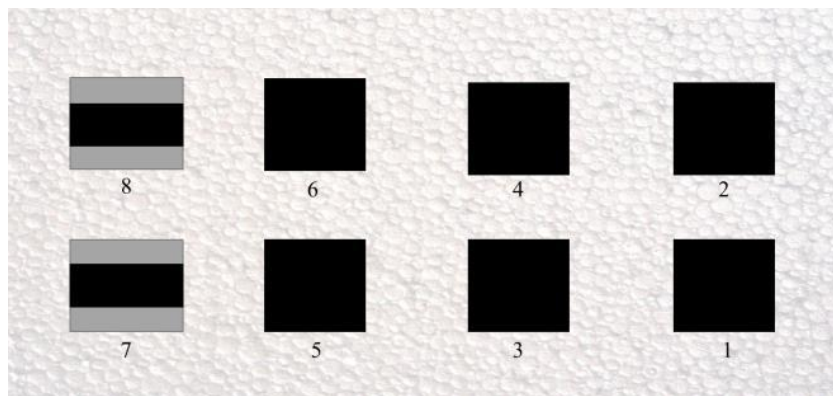


Figura 4.29 Configuración de placas sobre banco de pruebas

Tabla 4.8 Configuración de termopares respecto a su posición.

Posición de termopares	Cubierta de placa
1	Pintura comercial AeroComex negra
2	Pintura comercial AeroComex negra
3	Pintura comercial AeroComex negra
4	Pintura comercial AeroComex negra
5	Pintura comercial AeroComex negra
6	Pintura comercial AeroComex negra
7	AC-COM 40C 10E
8	AC-COM 40C 10E

Tras exponer el banco de pruebas durante 49 días, los datos fueron recolectados y analizados, permitiendo conocer el comportamiento a lo largo de las horas, las temperaturas máximas alcanzadas, así como los promedios por cada una de las placas.

Estos datos se tienen en el Anexo 1. Las gráficas generadas se muestran en la Figura 4.30.

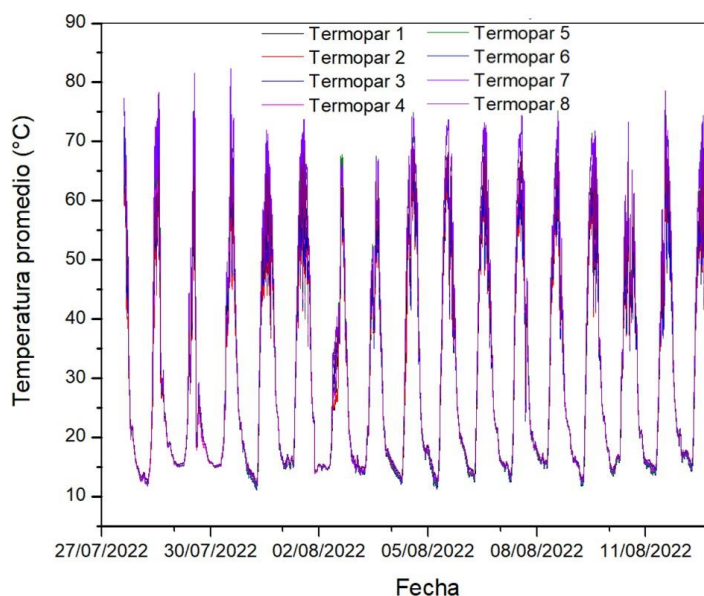


Figura 4.30 Resultados de temperaturas de placas del 27/07/22 al 11/08/22

Es notable que el comportamiento en la temperatura de los termopares es similar en todos los casos, logrando alcanzar las temperaturas más elevadas en el horario de 13:00

a 14:00 horas y las temperaturas más bajas a las 06:00 horas; este comportamiento es más visible en la gráfica a lo largo de un día, como se observa en la Figura 4.31, en donde también se observan con más detalle las temperaturas alcanzadas por los termopares en el intervalo de 10 a 15 horas.

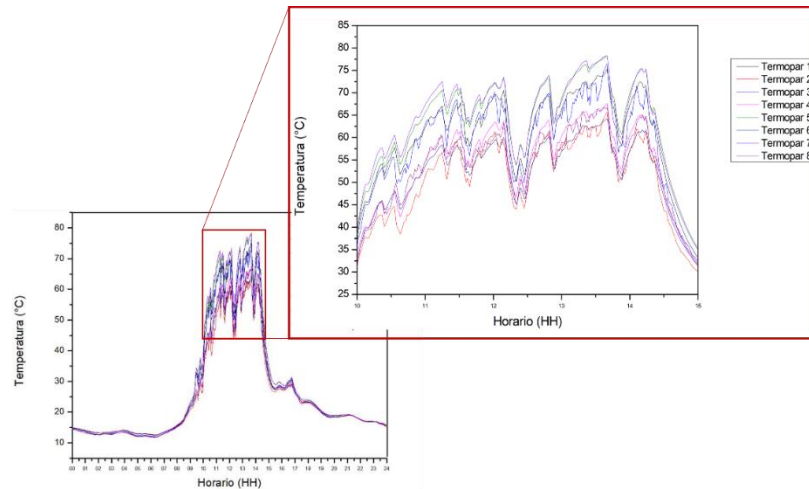


Figura 4.31 Temperatura de sustratos recubiertos del 28 de julio del 2022

Se observa que el termopar que registró mayor temperatura a lo largo del período de prueba fue el correspondiente al sustrato recubierto con el AC-COM 40C 10E de la fila inferior, el cual logró alcanzar hasta 82.3 °C, seguido por un sustrato recubierto por AeroComex. A pesar de que el comportamiento térmico de los sustratos fue similar, se encontró una inconsistencia entre filas, encontrando que la fila inferior (sustratos 1,5 y 7) alcanzaban mayores temperaturas en comparación con la fila superior (sustratos 2,6 y 8) encontrando una excepción en los sustratos 3 y 4, en donde el sustrato correspondiente a la placa inferior (3) obtuvo valores menores a los de la placa superior (4) por 1.09 °C en el promedio general. Esta diferencia entre filas podría asociarse a la geometría del banco de pruebas, por lo que se estableció analizar los resultados de manera separada. En la Figura 4.32 se tiene la gráfica de la primera fila para el día 28 de julio, confirmando que el sustrato recubierto con AC-COM 40C 10E es aquel que mantiene la mayor temperatura en gran parte del día, seguido por el resto de los sustratos recubiertos por AeroComex, en donde la placa que alcanzó menor temperatura es la correspondiente al termopar 3.

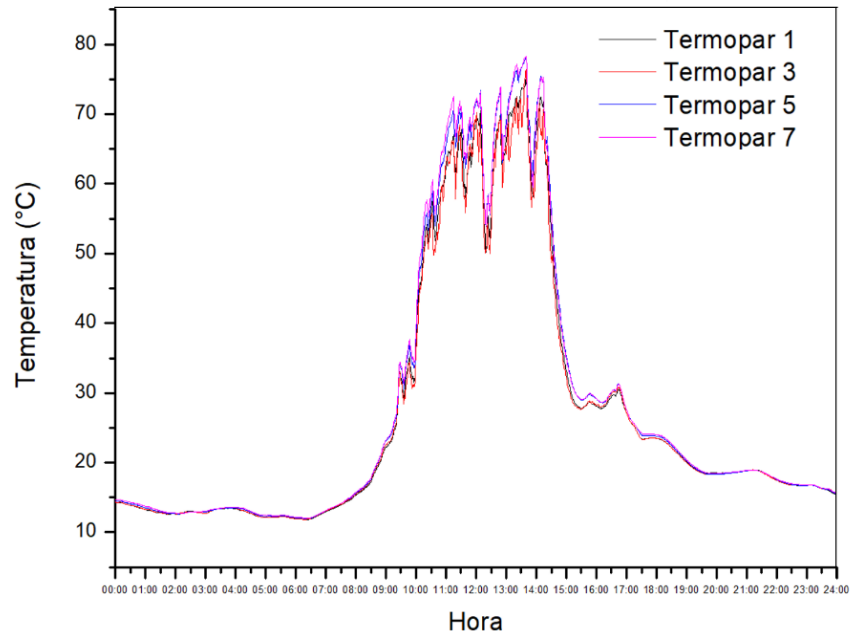


Figura 4.32 Temperatura de termopares de fila inferior del día 28 de julio del 2022

Respecto a la fila superior, los resultados para el mismo día se muestran en la Figura 4.33.

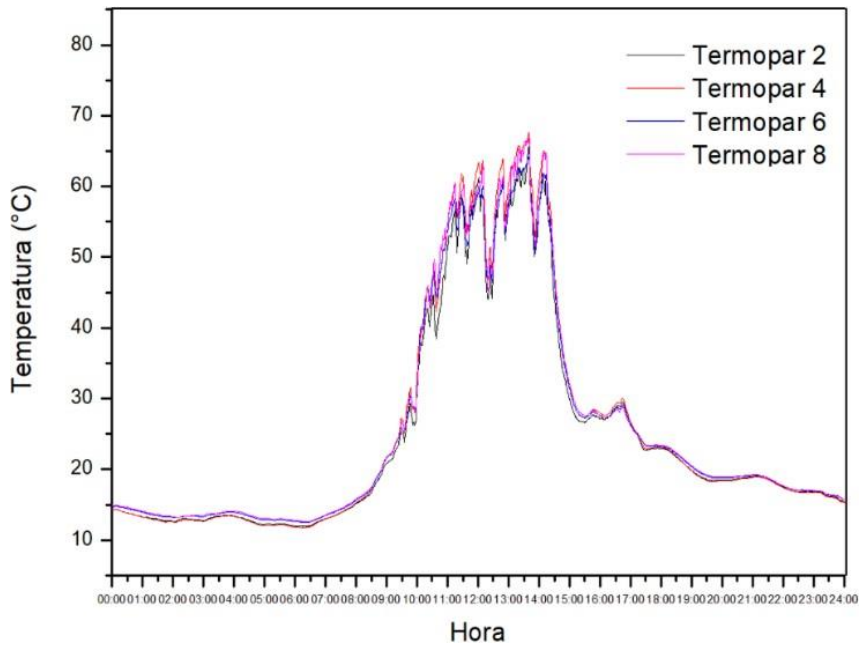


Figura 4.33 Temperatura de termopares de fila superior del día 28 de julio del 2022

En el caso de la fila superior, se observa que las temperaturas mayores oscilan entre el termopar 4 y el 8, correspondientes a los sustratos recubiertos con AeroComex y SAC-AC, respectivamente. Sin embargo, un dato interesante es que la placa recubierta con SAC-AC pierde menos temperatura en comparación con el resto de los sustratos.

- Prueba T para dos muestras suponiendo varianzas iguales

Debido a la diferencia de temperaturas entre las filas norte y sur, en donde la fila sur alcanzó mayores valores, se llevó a cabo una prueba T. Esto permite establecer si es viable el uso y comparación de los datos obtenidos de ambas filas. Los datos utilizados fueron los promedios de las temperaturas alcanzadas por los 8 termopares en el período del 27 de julio al 14 de septiembre del 2022 (Tabla 4.9).

*Tabla 4.9 Promedios de temperaturas alcanzadas por los termopares*

<b>VI</b>	<b>VD</b>
Fila	Temperatura (°C)
N	28.1749677
N	30.0295946
N	29.475797
N	29.7118443
S	28.2632064
S	28.9411794
S	31.0740575
S	30.9912342

Se establecieron las hipótesis nula y alternativa, con un nivel de significancia del 5%, siendo estas:

Ho= No hay diferencias significativas entre las medias de los dos grupos, con un nivel de confianza del 95%

H1= Si hay diferencias significativas entre las medias de los dos grupos, con un nivel de confianza del 95%

Se llevó a cabo la prueba, generando la Tabla 4.10:

Tabla 4.10 Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales

	<b>Variable 1</b>	<b>Variable 2</b>
Media	29.3480509	29.81741938
Varianza	0.663096904	2.046785029
Observaciones	4	4
Varianza agrupada	1.354940967	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	6	
Estadístico t	-0.570254509	
P(T<=t) una cola	0.294602798	
Valor crítico de t (una cola)	1.943180281	
P(T<=t) dos colas	0.589205596	
Valor crítico de t (dos colas)	2.446911851	

Por lo tanto:

$$P = 0.589205596 \quad \alpha = 0.05$$

Se observa que el valor del P es mayor al valor de  $\alpha$ , por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, determinado que no existen diferencias significativas entre las medias de las temperaturas de las dos filas.

Tras establecer que no hay diferencia significativa, se procedió a realizar el intemperismo de las placas recubiertas con formulaciones de SOP600 40C 10E, y se realizó la comparación con la pintura AC-COM 40C 10E, además de usar como referencia dos placas de aluminio sin recubrir.

#### 4.8.9 Resultados finales de Portamuestras

Después de llevar a cabo las pruebas preliminares, se procedió a colocar en el portamuestras las placas de aluminio recubiertas con la pintura de SOP600 40C 10E, así como de AC-COM 40C 10E; el arreglo de las placas se observa en la Figura 4.34.

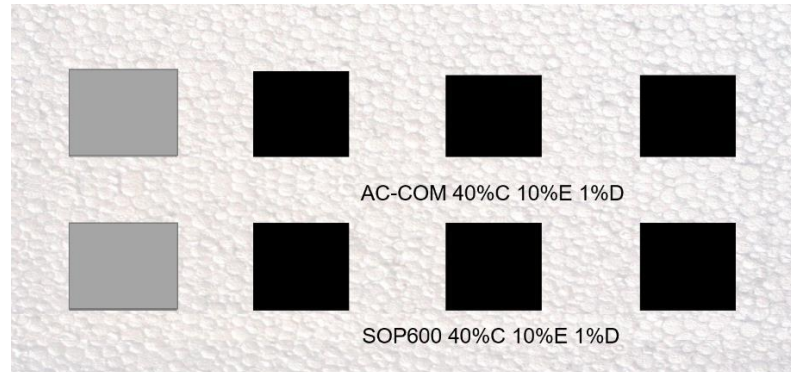


Figura 4.34 Configuración final de portamuestras

Las temperaturas fueron recolectadas desde el 12 de noviembre al 19 de diciembre del 2022, en conjunto con la radiación solar global, y cada formulación fue analizada de manera independiente debido a las diferencias observadas en la prueba preliminar. En la Figura 4.35 se observan las temperaturas y radiación obtenidas por las placas cubiertas con AC-COM.

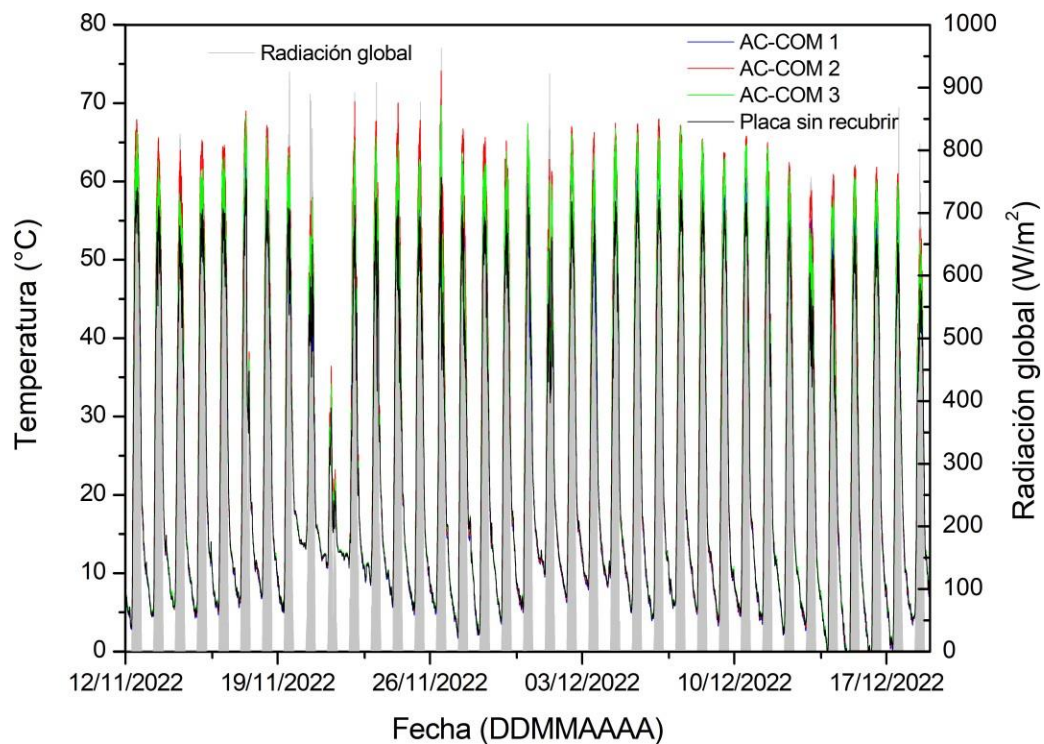


Figura 4.35 Resultados de temperaturas de placas cubiertas con AC-COM del 12/11/22 al 19/12/22



En la figura es notable que todas las placas tienen un patrón similar, con valores cercanos entre ellas, además de seguir el comportamiento de radiación observado, lo cual podría asociar con la eficiencia de conversión de radiación a calor del recubrimiento. Por otra parte, también es notable el aumento de temperatura relacionado con el uso de la pintura, puesto que la placa que no posee recubrimiento es aquella que alcanzó menores temperaturas. En la Figura 4.36 se observa la gráfica del día 22 de noviembre, en la cual se observan con mayor detalle las temperaturas y radiación obtenidas.

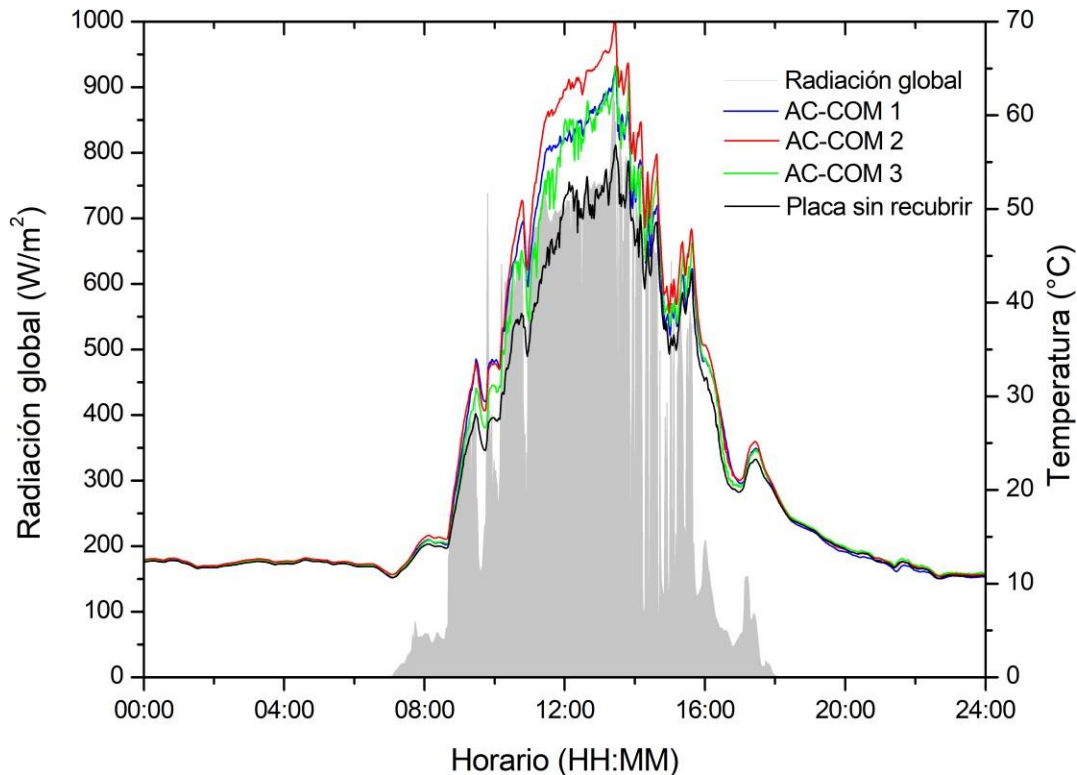


Figura 4.36 Resultados de temperaturas de placas cubiertas con AC-COM el 22 de noviembre del 2022

La formulación con AC-COM permitió alcanzar un valor de temperatura máximo de 74.13 °C, mientras que la placa sin recubrimiento colocada en la misma fila alcanzó un valor máximo de 60.5 °C, demostrando que la adición de pintura sobre la placa de aluminio representó un aumento de aproximadamente 13.6 °C.

En el caso de las placas recubiertas con la pintura de SOP600, éstas fueron colocadas en la fila sur del portamuestras, y la gráfica de los resultados se observan en la Figura 4.37.

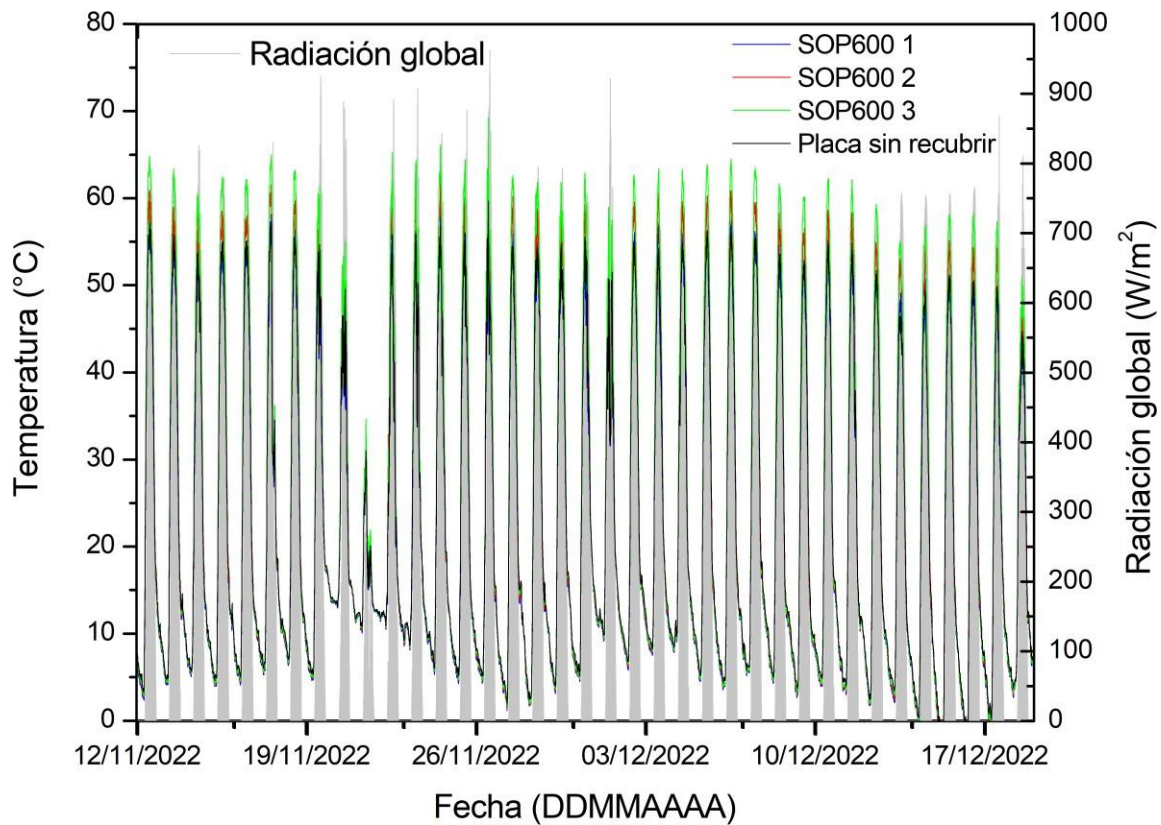


Figura 4.37 Resultados de temperaturas de placas cubiertas con SOP600 del 12/11/22 al 19/12/22

De manera similar a los resultados del AC-COM, se observa como las placas recubiertas con SOP600 poseen un comportamiento parecido, alcanzando sus temperaturas más elevadas entre las 12:20 a las 13:30 horas. También es notable la congruencia de las temperaturas respecto al valor de la radiación. En la Figura 4.38 se observan los valores de temperaturas de las placas de SOP600 comparados con la radiación global para el día 22 de noviembre, permitiendo observar con mayor detalle la similitud en la tendencia entre las temperaturas alcanzadas, así como la diferencia entre las placas recubiertas y la placa de aluminio sin recubrir.

En el caso de la pintura con SOP600, se logró alcanzar un valor de temperatura máximo de 67.64 °C, mientras que la placa sin recubrir colocada en la misma fila obtuvo un valor máximo de 59.69 °C, lo cual representó un aumento de 7.95 °C gracias a la adición de la pintura. Los datos promedios diarios se tienen en la Tabla 7.2 en la sección de Anexos.

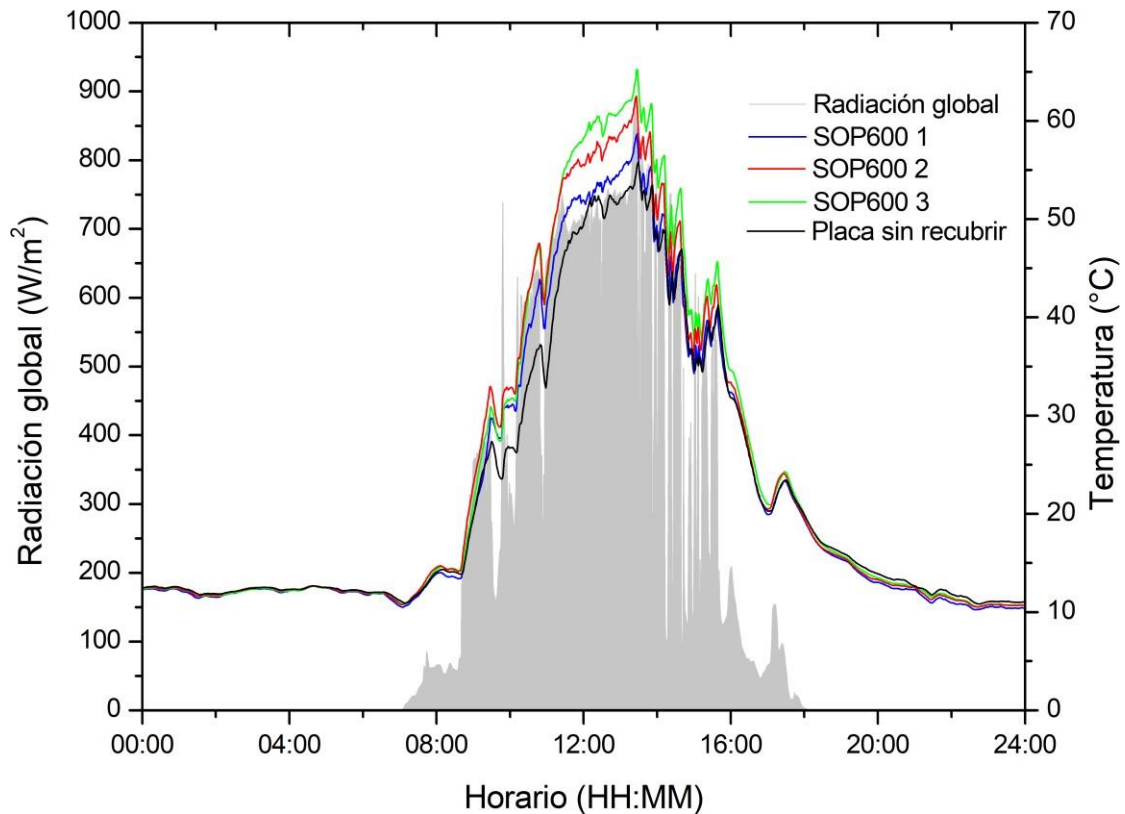


Figura 4.38 Resultados de temperaturas de placas cubiertas con SOP600 el 22 de noviembre del 2022

#### 4.9 RESULTADOS ACADÉMICOS

Durante el presente cuatrimestre se llevó a cabo la redacción y corrección de la tesis para la obtención de grado, cumpliendo con el formato sugerido por el PICYT.

De acuerdo con los requerimientos de egreso, también se estuvo trabajando en el manuscrito titulado “PHYSICOCHEMICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF A SUSTAINABLE AND LOW COST SOLAR ABSORBER COATING BASED ON ACTIVATED CARBON FROM COCONUT SHELL”, el cual comenzó su proceso de entrega el 9 de septiembre del 2022 y finalizó el 27 de noviembre, con la aceptación del artículo en la revista MRS Advances, cumpliendo con uno de los objetivos del programa de maestría PICYT.

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo con el cronograma establecido, se llevó a cabo de manera satisfactoria la formulación y caracterización de las pinturas, logrando establecer las condiciones adecuadas para producir mezclas con una adherencia óptima, además de mostrar valores de reflectancia consistentes con los antecedentes previamente examinados.

El análisis termogravimétrico de los carbones demostró que éstos pueden soportar temperaturas altas, y al mezclarse con la resina y los agentes aglutinantes para formar la pintura, ésta puede alcanzar una resistencia a temperaturas de hasta 340 °C, de manera que es posible asignarle una aplicación en alguna tecnología solar que trabaje en esos intervalos de temperatura, como es el caso de un concentrador cilindro parabólico.

Después de llevar a cabo diversas formulaciones, variando los porcentajes de pigmento, resina, agua, agente espesante y dispersante, se lograron encontrar mezclas con adherencias óptimas que fueron de 3B a 5B, es decir, del 0 al 15% de pintura removida tras la prueba de adherencia.

Respecto a las reflectancias observadas en los carbones, éstas resultaron coherentes con lo esperado, ya que coincidían con lo consultado en artículos, manteniendo rangos entre el 6.32 al 12.87% de reflectancia, el cual es un valor bajo que puede asociarse a un material con absorción en el rango del espectro solar. Al caracterizar las formulaciones, fue considerable la reducción de reflectancia en relación con el aumento del porcentaje del carbón, así como una leve disminución al aumentar la cantidad de aditivos, llegando a la conclusión de que la formulación debería tener como límite mínimo de carbón el 40%, así como mantenerse en los valores máximos de espesante. Tras obtener los datos de reflectancias difusas, fue posible conocer los valores de absorbancia, encontrando que la formulación SOP600 40C 10E logró una absorbancia promedio del 95.5%, lo cual resulta un valor competitivo con las absorbancias alcanzadas por recubrimientos absorbedores comerciales.

Tras la caracterización del carbón obtenido en lotes de 15 y 30 gr, fue posible confirmar que la producción de biocarbones era reproducible y escalable, pues las características

térmicas, ópticas, así como los resultados de los espectros FTIR se mantuvieron consistentes con los observados en los antecedentes, en los cuales se trabajaron con masas de 2 g. En el caso de la caracterización química de la pintura, se observó una clara contribución de la resina acrílica en sus grupos funcionales. Con los difractogramas obtenidos por DRX fue posible confirmar la presencia de carbono amorfo, así como cierto grado de grafitización en el SOP600 y AC-COM. También se determinó que el biocarbón poseía cenizas relacionadas al aumento de la temperatura de pirólisis. Estos resultados también fueron visibles en el patrón DRX de la pintura, en la cual se observaron los picos asociados al carbón, relacionados con los planos 002 y 100.

El análisis elemental permitió conocer las relaciones O/C y H/C, las cuales son muy importantes en la determinación de la estabilidad del biocarbón, encontrando que el SOP600, así como el AC-COM mostraba valores óptimos asociados a un tiempo de vida mayor a 100 años, así como alta resistencia a la degradación microbiana y química, gracias a su bajo índice de aromaticidad.

La evaluación de la sedimentación de las formulaciones permitió establecer como concentraciones de dispersante y espesante con el 1 y 10%, respectivamente, ya que fueron estos valores los correspondientes a las pinturas que se mantuvieron durante más tiempo homogéneas y con poca sedimentación.

Finalmente, se construyó e instaló un banco de pruebas, el cual estuvo en funcionamiento durante dos meses con placas de prueba para determinar la correcta recopilación de datos, mismos que fueron analizados y pasaron por un tratamiento estadístico para determinar si era viable la comparación entre ellos. Los resultados obtenidos permitieron observar un aumento en la temperatura gracias a la adición de pintura, en el caso de la pintura de AC-COM hubo un aumento máximo de 13.6 °C y con la pintura de SOP600 se observó un incremento de 7.95 °C, ambas comparaciones se realizaron respecto a las placas de aluminio sin recubrimiento. Estos resultados permitieron confirmar las propiedades optotérmicas de las pinturas, que las hacen viables para su uso en tecnologías termosolares de baja a media temperatura.

Aparte de cumplir con los objetivos estipulados para el sexto cuatrimestre, hubo un entrenamiento para el uso de nuevos equipos, de manera que la formación en el área de laboratorio fue enriquecida.

## 6. REFERENCIAS

- ABDULLAH, N. H., INU, I., RAZAB, M. K. A. A., NOOR, A. M., ZAUDIN, N. A. C., RASAT, M. S. M., AMIN, M. F. M., ABDULLAH, W. N. W., SHUKRI, N. M., & HALIM, A. Z. A. (2018). Effect of Acidic and Alkaline Treatments to Methylene Blue Adsorption from Aqueous Solution by Coconut Shell Activated Carbon. *International Journal of Current Research in Science, Engineering & Technology*, 1(Spl-1), 319. <https://doi.org/10.30967/ijcrset.1.S1.2018.319-324>
- American Society for Testing and Materials. (1997). *ASTM D3359: Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test*. [http://metalroofpaint.ca/documents/ASTM\\_TAPE\\_ADHESION\\_TEST.pdf](http://metalroofpaint.ca/documents/ASTM_TAPE_ADHESION_TEST.pdf)
- ASTM D 3359 Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape, (1998).
- Amri, A., Tao, Z., Pryor, T., & Yin, C. (2014). Developments in the synthesis of fl at plate solar selective absorber materials via sol – gel methods: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 316–328. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.062>
- Atkinson, C., Sansom, C., Almond, H., & Shaw, C. (2015). Coatings for concentrating solar systems- A review. *ELSEVIER*, 45, 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.015>
- ATSDR. (2021). *Resúmenes de Salud Pública - Cromo (Chromium)*. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs7.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.html)
- Bakti, A. I., & Gareso, P. L. (2018). Characterization of Active Carbon Prepared from Coconuts Shells using FTIR, XRD and SEM Techniques. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*, 7(1), 33–39. <https://doi.org/10.24042/jipfalbiruni.v7i1.2459>
- Bioenergy Technologies Office. (n.d.). *Bioenergy Frequently Asked Questions*. Retrieved August 2, 2021, from <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/bioenergy-frequently-asked-questions>
- Canales, R. (2018). *“Obtención y Caracterización de Carbones Activados a Partir de Residuos Agroindustriales”* [Universidad Autónoma del estado de Hidalgo]. [http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/2070/Obtención y Caracterización de Carbones.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/2070/Obtención_y_Caracterización_de_Carbones.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Carlsson, B., Jorgensen, G., & Köhl, M. (2004). Introduction to the Performance and Durability Assessment of Optical Materials for Solar Thermal Systems. In *Performance and Durability Assessment: Optical Materials for Solar Thermal Systems* (pp. 3–16). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-008044401-7/50002-X>
- Chaverra, D. (2021). *¿Base agua o base solvente?* INPRA Latina. <https://www.zonadepinturas.com/201810027914/articulos/pinturas-y->

recubrimientos/base-agua-o-base-solvente.html

- Chen, B., & Chen, Z. (2009). Sorption of naphthalene and 1-naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures. In *Chemosphere* (Vol. 76, Issue 1, pp. 127–133). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.02.004>
- Coates, J. (2006). Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, 10815–10837. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a5606>
- Cogulet, A., Blanchet, P., & Landry, V. (2019). Evaluation of the impacts of four weathering methods on two acrylic paints: Showcasing distinctions and particularities. *Coatings*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/COATINGS9020121>
- Coll, V. (2017). *CONCENTRADOR SOLAR FRESNEL*.
- Correa, M. (2015). *AP Expert Team. CÓMO EVITAR SEDIMENTACIÓN Y DESCUELGUE EN PINTURAS, MEDIANDO LA VISCOSIDAD Y REOLOGÍA*. <http://apexperteam.blogspot.com/2015/02/ViscosidadYReologia.html>
- Das, D., Samal, D. P., & BC, M. (2015). Preparation of Activated Carbon from Green Coconut Shell and its Characterization. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 06(05). <https://doi.org/10.4172/2157-7048.1000248>
- Echevarria Lopez, C. A. (2011). *Diseño de un colector cilindro parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua*. [Universidad de Piura]. [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1389/IME\\_159.pdf](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1389/IME_159.pdf)
- Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López, J., Campo, J., Valtierra, E., & Etchevers, J. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367–382. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792016000300367](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000300367)
- Esparza, I., Jiménez-Moreno, N., Bimbela, F., Ancín-Azpilicueta, C., & Gandía, L. M. (2020). Fruit and vegetable waste management: Conventional and emerging approaches. *Journal of Environmental Management*, 265(February). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110510>
- Fauroux, L., Días, D., Blanco, G. E., & Degaetani, O. J. (2016). Modelado, y análisis económico de colectores solares planos. *Revista Digital Del Departamento de Ingeniería e Investigaciones*, 1(1). <http://repositoriocyt.unlam.edu.ar/handle/123456789/145>
- Fernandez, M. E., Nunell, G. V., Bonelli, P. R., & Cukierman, A. L. (2014). Activated carbon developed from orange peels: Batch and dynamic competitive adsorption of basic dyes. *Industrial Crops and Products*, 62, 437–445.



<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.09.015>

- Giudice, C., & Pereyra, A. (2009). *Tecnologías de pinturas y recubrimientos* (H. Videla, L. Quinteros, F. Fragata, & N. Scenna (eds.); Editorial). [http://www.edutecne.utn.edu.ar/tecn\\_pinturas/A-TecPin\\_I\\_a\\_V.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/tecn_pinturas/A-TecPin_I_a_V.pdf)
- González-Canché, N. G., Carrillo, J., Escobar-Morales, B., Salgado-Tránsito, I., Pacheco, N., Pech-Cohuo, S. C., & Peña-Cruz, M. I. (2021). Physicochemical and optical characterization of Citrus aurantium derived biochar for solar absorber applications. *MDPI*, *14*.
- Guez, J. (2008). *Energías renovables* (Instituto).
- IEA-ETSAP, & IRENA. (2015). *Solar Heat for Industrial Processes: Technology Brief*. <http://www.irena.org/Publications>
- IRENA. (2012). *Biomass for Power Generation* (Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series). [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/RE\\_Technologies\\_Cost\\_Analysis-BIOMASS.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/RE_Technologies_Cost_Analysis-BIOMASS.pdf)
- Jiménez, F., Mondragón, F., & López, D. (2012). Caracterización RAMAN de carbonizados de carbón obtenidos en un reactor de lecho fijo presurizado Raman characterization of coal chars obtained in a pressurized bed reactor. *Ingeniería y Competitividad*, *14*(2), 111–118. <http://www.scielo.org.co/pdf/inco/v14n2/v14n2a10.pdf>
- Joly, M., Antonetti, Y., Python, M., Gonzalez, M., Gascou, T., Scartezzini, J., & Schu, A. (2013). *Novel black selective coating for tubular solar absorbers based on a sol – gel method*. *94*, 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.05.009>
- Kaipannan, S., Nagarajan, S., Manickavasakam, K., & Sathish, M. (2017). Orange Peel Derived Activated Carbon for Fabrication of High-Energy and High-Rate Supercapacitors. *Chemistry Select*, *2*(October 2018), 11384–11392. <https://doi.org/10.1002/slct.201701857>
- Kamsonlian, S., Suresh, S., Majumder, C. B., & Chand, S. (2011). Characterization of Banana and Orange Peels: Biosorption Mechanism. *International Journal of Science Technology & Management*, *2*(4), 1–7.
- Kennedy, C. E. (2002). *Review of Mid- to High- Temperature Solar Selective Absorber Materials* *Review of Mid- to High- Temperature Solar Selective Absorber Materials*. <https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31267.pdf>
- Köseolu, E., & Akmil-Başar, C. (2015). Preparation, structural evaluation and adsorptive properties of activated carbon from agricultural waste biomass. *Advanced Powder Technology*, *26*(3), 811–818. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2015.02.006>
- Kuravi, S., Trahan, J., Goswami, D. Y., Rahman, M. M., & Stefanakos, E. K. (2013).

- Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(4), 285–319. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.02.001>
- Kurzböck, M., Wallner, G. M., & Lang, R. W. (2012). *Black pigmented polypropylene materials for solar absorbers*. 30(2011), 438–445. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.052>
- Leng, L., & Huang, H. (2019). An overview of the effect of pyrolysis process parameters on biochar stability. *ELSEVIER*, 270, 627–642. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.030>
- López-Sosa, L. B., González-Avilés, M., Hernández-Ramírez, L. M., Medina-Flores, A., López-Luke, T., Bravo-Sánchez, M., & Zárate-Medina, J. (2020). Ecological solar absorber coating: A proposal for the use of residual biomass and recycled materials for energy conversion. In *Solar Energy* (Vol. 202, pp. 238–248). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.102>
- Lozano, A., Hernández, A., Lara, Y., Consejo, J., & Morgades, E. (2019). *Sistemas solares híbridos térmicos-FV para generación de frío y calor*. <https://static.pte-ee.org/media/files/documentacion/itp-sistemas-solares-hibridos-termicos-fv-para-generacion-de-frio-y-calor-bA4.pdf>
- Luque, R., & Clark, J. H. (2013). *Valorisation of food residues: waste to wealth using green chemical technologies*. <https://doi.org/10.1002/ese3.9>
- Martínez Mireles, P. E., González, N. G., Peña, M., Pech, S., & Pacheco, N. (2020). *CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y PIRÓLISIS DE RESIDUOS AGRÍCOLAS PARA LA SÍNTESIS DE MATERIALES ABSORBEDORES ÓPTICOS EN TECNOLOGÍAS TERMOSOLARES*.
- MEQ. (2007). Formulación de pinturas. *Meq*, 10, 6–8. <https://www.mollabs.com/pdf/pinturas.pdf>
- Morales, A., & San Vicente, G. (2017). A new generation of absorber tubes for concentrating solar thermal (CST) systems. In *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100516-3.00004-6>
- Moreno Soto, J. O. (2016a). *Síntesis y caracterización de recubrimientos absorbentes selectivos para calentadores solares* [Universidad Tecnológica de Pereira]. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/6941/62147M843.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Moreno Soto, J. O. (2016b). *Síntesis y caracterización de recubrimientos absorbentes selectivos para calentadores solares* [Universidad Tecnológica de Pereira]. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/6941/62147M843.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Muhammad-sukki, F., & Ramirez-iniguez, R. (2010). *Solar Concentrators Solar Concentrators*. January.
- Muller, B., & Poth, U. (2011). *Coatings Formulation* (Segunda Ed). VINCENTZ. [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54887127/Coatings-Formulation1.pdf?1509562976=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEuropean\\_Coatings\\_Tech\\_Files\\_Coatings\\_Fo.pdf&Expires=1622666104&Signature=FVYMhchjDLQ1p8ueuqYS~P~hMi0bd663Wbg8M27SHe~nx6](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54887127/Coatings-Formulation1.pdf?1509562976=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEuropean_Coatings_Tech_Files_Coatings_Fo.pdf&Expires=1622666104&Signature=FVYMhchjDLQ1p8ueuqYS~P~hMi0bd663Wbg8M27SHe~nx6)
- Nandwani, S. S. (2005). *Energía solar- Conceptos básicos y su utilización*. [https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-06-27\\_10-14-37105995.pdf](https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-06-27_10-14-37105995.pdf)
- Navarro, E. (2010). *Aplicación de paneles híbridos PV/T con concentración para trigeneración en viviendas unifamiliares*.
- Neacșu, I. A., Nicoară, A. I., Vasile, O. R., & Vasile, B. S. (2016). Chapter 9 - Inorganic micro- and nanostructured implants for tissue engineering. *Applications of Nanobiomaterials*, 4, 271–295. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-42862-0.00009-2>
- Network, E. T. (2018). *SolarPACES*. How CSP Works: Tower, Trough, Fresnel or Dish. <https://www.solarpaces.org/how-csp-works/>
- Oliva, A. I., Maldonado, R. D., Díaz, E. A., & Montalvo, A. I. (2013). A high absorbance material for solar collectors ' applications. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 45. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/45/1/012019>
- Paredes, C. (2012). *DISEÑO DE CAPTADOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO PARA APLICACIONES RURALES EN PARAGUAY [ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS]*. [http://oa.upm.es/14011/1/PFC\\_CARMEN\\_PAREDES\\_VELASCO.pdf](http://oa.upm.es/14011/1/PFC_CARMEN_PAREDES_VELASCO.pdf)
- Patro, A. (2018). *Antioxidant capacity and UPLC – PDA ESI – MS polyphenolic profile of Citrus aurantium extracts obtained by ultrasound assisted extraction*. 55(December), 5106–5114. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3451-0>
- PROMÉXICO, IER, G. (2017). *La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/428621/La\\_industria\\_solar\\_fv\\_y\\_ft\\_en\\_M\\_xico-compressed.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/428621/La_industria_solar_fv_y_ft_en_M_xico-compressed.pdf)
- Quesada-González, O., Torres García, E., & Martínez, A. (2011). Estudio De La Degradación Térmica Del Residuo De La Naranja. *Revista Cubana de Química*, XXIII(1), 25–33.
- REN21. (2022). *Renewables 2022 Global Status Report*. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr\\_2020\\_key\\_findings\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_key_findings_en.pdf)

- REN21. (2020). *Key Findings of the Renewable 2020 Global Estatus Report*. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr\\_2020\\_key\\_findings\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_key_findings_en.pdf)
- Romero Gómez, J. C., & Alfaro Ayala, J. A. (2015). Estudio De Un Colector Solar De Tubos Evacuados Mediante La Dinámica De Fluidos Computacional Cfd. *Investigación e Innovación En La División de Ciencias Naturales y Exactas (DCNE)*, 1(2), 44–55. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/393>
- Saito, G. (2020). *Microscopía electrónica de barrido y microanálisis de elementos del Clúster Científico y Tecnológico BioMimic®*. CONACYT. <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/723-microscopia-electronica-de-barrido-y-microanalisis-de-elementos-del-cluster-cientifico-y-tecnologico-biomimic>
- SAMES KREMLIN. (2021). *¿CUÁL ES LA DIFERENCIA ENTRE UNA PISTOLA LVLP Y HVLP?* <https://www.sames-kremlin.com/spain/sp/faq-what-is-the-difference-between-lvlp-or-hvlp-spray-gun-.html>
- Secretaría de Energía. (2018). *Atlas Nacional de Biomasa*. <https://www.gob.mx/sener/articulos/atlas-nacional-de-biomasa>
- SENER. (2018). *Reporte de inteligencia tecnológica: Energía Termosolar*.
- Spokas, K. A. (2010). Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management*, 1(2), 289–303.
- Tian, Y., & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538–553. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>
- Triantafyllidis, K., Balu, A. M., Den, W., Sharma, V. K., Lee, M., Nadadur, G., & Varma, R. S. (2018). Lignocellulosic Biomass Transformations via Greener Oxidative Pretreatment Processes: Access to Energy and Value-Added Chemicals. *Frontiers in Chemistry* | *Www.Frontiersin.Org*, 1, 141. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00141>
- Usmani, B., & Seshadri, H. (2015). High-Temperature Solar Selective Coating High-Temperature Solar Selective Coating. In *Systems Thinking Approach for Social Problems* (Springer I, Issue February 2016, pp. 181–189). [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2141-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2141-8_15)
- Vaquero, J. (2016). *Aprovechamiento de los residuos de la industria del zumo de naranja para la obtención de 2-3 butanodiol*. *May*, 45.
- Venegas, L. G. (2015, September). DEPOSICIÓN POR ROCÍO PIROLÍTICO (SPRAY PIROLISIS DEPOSITION). *Boletín UPIITA*, 50. <http://www.boletin.upiita.ipn.mx/index.php/ciencia/629-cyt-numero-50/1170-deposicion-por-rocio-pirolitico-spray-pirolisis-deposition>

- Villegas, D. (2009). *Diseño y caracterización de un concentrador térmico-fotovoltaico cuasiestacionario para integración arquitectónica* [Universitat de Lleida]. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8237/Tdcv1de1.pdf?sequence=11&isAllowed=y>
- Wang, J., & Kaskel, S. (2012). KOH activation of carbon-based materials for energy storage. *Journal of Materials Chemistry*, 22(45), 23710–23725. <https://doi.org/10.1039/c2jm34066f>
- Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *ELSEVIER*, 217(1), 240–261. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>
- Wijewardane, S., & Goswami, D. Y. (2012). A review on surface control of thermal radiation by paints and coatings for new energy applications. *ELSEVIER*, 16, 1863–1873. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.046>
- Xu, K., Du, M., Hao, L., Mi, J., Yu, Q., & Li, S. (2020). A review of high-temperature selective absorbing coatings for solar thermal applications. *Journal of Materiomics*, 6(1), 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2019.12.012>
- Xu, Y., Zhang, X., Wu, B., Xu, Y., Wen, R., Liu, Y., Fang, M., Wu, X., Min, X., & Huang, Z. (2019). Preparation and performance of shape-stable phase change materials based on carbonized-abandoned orange peel and paraffin. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 27(4), 289–298. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2018.1543279>
- Yang, H. M., Zhang, D. H., Chen, Y., Ran, M. J., & Gu, J. C. (2017). Study on the application of KOH to produce activated carbon to realize the utilization of distiller's grains. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 69(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/69/1/012051>
- Yong, Q., & Liang, C. (2019). Synthesis of an Aqueous Self-Matting Acrylic Resin with Low Gloss and High Transparency via Controlling Surface Morphology. *Polymers*, 11(2), 322. <https://doi.org/10.3390/polym11020322>
- Yu, D., Wang, L., & Wu, M. (2018). *Simultaneous removal of dye and heavy metal by banana peels derived hierarchically porous carbons[01-09].pdf* (pp. 543–553).
- Zhang, W., Zhang, L. Y., Zhao, X. J., & Zhou, Z. (2016). Citrus pectin derived porous carbons as a superior adsorbent toward removal of methylene blue. *Journal of Solid State Chemistry*, 243, 101–105. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2016.08.014>
- Zhou, C., & Wang, Y. (2020). Science and Technology of Advanced Materials ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/tsta20> Recent progress in the conversion of biomass wastes into functional materials for value-added applications Recent progress in the conversion of biomass wastes into

functional materials for value-added applications. *Advanced Materials*, 21(1), 787–804. <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1848213>

## 7. ANEXOS

*Anexo A Temperaturas promedios de termopares del 27 de julio al 14 de septiembre del 2022*

Fecha	Promedio de Termopar 1 (°C) SUR	Promedio de Termopar 2 (°C)	Promedio de Termopar 3 (°C) SUR	Promedio de Termopar 4 (°C)	Promedio de Termopar 5 (°C) SUR	Promedio de Termopar 6 (°C)	Promedio de Termopar 7 COCO (°C) SUR	Promedio de Termopar 8 COCO (°C)
<b>Julio</b>								
27-jul	33.58	30.52	32.69	31.72	34.87	31.43	34.88	32.24
28-jul	26.92	24.65	26.65	25.43	27.79	25.26	27.98	25.63
29-jul	24.62	23.09	24.49	23.68	25.23	23.51	25.4	23.8
30-jul	27.33	25.64	27.4	26.48	28.56	26.2	28.76	26.54
31-jul	29.7	29.34	30.04	30.45	32.66	30.49	33.03	31.56
<b>Agosto</b>								
01-ago	30.37	30.13	30.59	31.48	33.8	31.62	34.38	32.87
02-ago	25.75	25.31	26.41	26.58	28.44	26.92	28.25	27.3
03-ago	25.84	25.94	26.2	27.12	28.52	27.19	28.67	27.63
04-ago	30.2	29.85	30.79	31.62	33.57	31.69	33.87	32.32
05-ago	30.3	30.34	30.66	31.75	33.41	31.59	33.69	32.1
06-ago	30.35	30.33	30.72	31.96	33.83	31.8	34.17	32.49
07-ago	29.17	29.2	29.55	30.73	32.31	30.48	32.54	30.93
08-ago	29.75	29.7	30.11	30.98	32.61	30.73	32.77	31.2
09-ago	30.3	30.27	30.71	31.58	33.38	31.29	33.52	31.77
10-ago	28.4	28.41	28.63	29.75	31.23	29.61	31.47	30.14
11-ago	29.45	29.54	29.7	31.02	32.76	30.95	33	31.55
12-ago	30.94	31	31.31	32.5	34.24	32.26	34.43	32.82
13-ago	29.16	28.67	29.82	30.53	31.79	30.05	31.17	30.26
14-ago	27.3	27.39	27.69	29.13	29.92	28.63	29.95	28.95
15-ago	25.45	25.5	25.81	27.09	27.73	26.46	27.51	26.55
16-ago	21.5	21.1	21.74	22.72	22.84	22.34	22.65	22.11
17-ago	26.15	25.86	26.64	27.91	28.65	27.26	27.98	27.31
18-ago	29.12	28.28	29.89	31.2	32.24	30.69	31.96	30.98
19-ago	29.58	29.91	30.46	32.59	33.22	31.83	33.41	32.19
20-ago	28.08	28.4	28.74	30.56	31.24	29.95	31.35	30.15
21-ago	28.46	28.64	29.25	30.96	31.44	30.29	31.56	30.36
22-ago	31.44	31.83	32.29	34.25	34.95	33.53	34.82	33.84
23-ago	31.11	31.38	32.05	33.7	34.53	32.94	34.52	33.1
24-ago	29.42	29.7	30.38	31.84	32.31	30.9	32.01	30.75
25-ago	31.32	31.53	32.38	33.96	34.64	33.08	34.5	33.01
26-ago	30.72	31.05	31.8	33.29	33.9	32.47	33.87	32.52
27-ago	28.57	28.81	29.62	30.97	31.63	30.06	31.51	30.06
28-ago	28.78	28.86	29.74	31.22	32.02	30.1	31.19	29.7

29-ago	29.91	29.94	31.04	32.32	33.2	31.35	32.65	31.44
30-ago	26.59	26.59	27.8	28.66	29.43	28.15	29.14	28
31-ago	27.8	28	28.75	30.03	30.64	29.13	30.21	29.01
<b>Septiembre</b>								
01-sep	31.34	31.51	32.41	34.2	35.23	33.22	35	33.52
02-sep	28.9	29.24	30.03	31.39	32.11	30.55	31.81	30.66
03-sep	27.31	27.8	28.17	29.79	30.29	29.03	30.03	29.19
04-sep	27.27	27.73	28.19	29.69	30.09	28.79	29.87	28.85
05-sep	24.2	24.17	24.8	25.81	26.38	25.34	26.28	25.54
06-sep	27.81	27.77	28.77	29.95	30.52	28.84	29.95	28.48
07-sep	26.94	26.93	27.89	28.71	29.21	27.79	28.93	27.69
08-sep	27.08	26.81	28.14	28.68	29.24	27.66	28.75	27.39
09-sep	24.38	24.46	25.18	25.97	26.36	25.37	26.07	25.38
10-sep	29.7	29.85	30.95	32.35	33.01	31.33	32.83	31.52
11-sep	26.65	27.12	27.74	29.28	29.65	28.41	29.45	28.56
12-sep	25.55	25.82	26.48	27.71	28.15	27.08	27.99	27.26
13-sep	28.84	29.14	30.08	31.82	32.37	30.8	32.28	31.12
14-sep	25.54	25.81	26.81	28.32	28.35	27.16	28.59	27.47
<b>Promedio general</b>	<b>28.26</b>	<b>28.17</b>	<b>28.94</b>	<b>30.03</b>	<b>31.07</b>	<b>29.48</b>	<b>30.99</b>	<b>29.71</b>
<b>Valor máximo</b>	<b>77.07</b>	<b>69.67</b>	<b>76.41</b>	<b>76.45</b>	<b>80.8</b>	<b>73.12</b>	<b>82.3</b>	<b>74.4</b>
<b>Valor mínimo</b>	<b>9.74</b>	<b>10.1</b>	<b>9.98</b>	<b>10.56</b>	<b>10.19</b>	<b>11.17</b>	<b>10.5</b>	<b>11.13</b>



Anexo B Temperaturas promedios de termopares del 12 de noviembre al 19 de diciembre del 2022

Fecha	Promedio de Radiación (W/m <sup>2</sup> )	Promedio de SOP600 1	Promedio de SOP600 2	Promedio de SOP600 3	Promedio de AC-COM 1	Promedio de AC-COM 2	Promedio de AC-COM 3	Promedio de Placa sin recubrir	Promedio de Placa sin recubrir2
<b>Noviembre</b>									
12-nov	214.76	22.79	24.14	25.27	24.76	26.51	25.52	23.47	24.08
13-nov	210.70	22.35	23.63	24.86	23.93	25.73	24.58	23.09	23.41
14-nov	201.82	21.78	22.96	23.96	23.45	24.94	23.35	22.19	22.00
15-nov	213.67	22.65	23.88	24.99	24.28	26.07	24.77	23.16	23.42
16-nov	209.08	22.60	23.83	24.93	24.26	26.00	24.89	23.16	23.44
17-nov	168.08	21.74	22.89	23.69	23.39	24.85	24.03	22.24	22.52
18-nov	202.94	22.91	24.15	25.26	24.68	26.46	25.48	23.53	23.92
19-nov	168.73	21.47	22.59	23.56	22.88	24.52	23.81	22.19	22.57
20-nov	138.14	22.27	23.16	23.87	23.45	24.67	23.99	22.50	22.78
21-nov	55.13	15.28	15.76	16.00	15.95	16.47	16.08	15.42	15.50
22-nov	166.39	22.30	23.35	23.84	23.78	24.81	23.62	21.88	21.94
23-nov	168.89	22.17	23.25	24.05	23.76	25.13	24.21	22.43	22.58
24-nov	202.08	23.04	24.28	25.13	24.90	26.31	24.70	23.16	22.81
25-nov	199.64	21.37	22.59	23.68	23.05	24.78	23.55	21.88	21.91
26-nov	197.61	20.78	22.07	22.95	22.72	24.09	22.49	21.12	20.60
27-nov	206.89	21.18	22.48	23.35	23.11	24.53	22.84	21.46	21.00
28-nov	202.33	21.56	22.82	23.81	23.28	25.02	23.85	21.95	22.04
29-nov	191.62	22.02	23.22	24.12	23.76	25.31	24.20	22.37	22.38
30-nov	187.50	22.08	23.37	24.49	23.63	25.57	25.09	22.86	23.21
<b>Diciembre</b>									
01-dic	148.38	22.38	23.35	23.98	23.83	24.98	24.14	22.52	22.64
02-dic	192.45	23.30	24.49	25.43	25.21	26.71	25.81	23.56	23.88
03-dic	194.75	22.85	24.04	25.19	24.26	26.13	25.26	23.40	23.46
04-dic	192.85	23.40	24.63	25.57	25.25	26.77	25.88	23.63	24.01
05-dic	199.93	22.41	23.64	24.84	24.28	26.06	25.57	23.13	23.81
06-dic	197.67	22.46	23.62	24.68	24.19	25.81	24.98	22.79	23.19
07-dic	196.13	23.26	24.44	25.43	25.08	26.55	25.67	23.53	23.88
08-dic	198.74	21.59	22.84	23.95	23.49	25.08	24.31	22.08	22.57
09-dic	192.88	20.47	21.67	22.85	22.39	24.06	23.59	21.15	21.84
10-dic	187.36	21.18	22.33	23.43	22.97	24.56	24.01	21.79	22.32
11-dic	185.46	20.66	21.82	22.86	22.43	23.99	23.41	21.18	21.64
12-dic	191.05	19.90	21.11	22.13	21.75	23.30	22.42	20.33	20.70
13-dic	195.92	18.48	19.76	20.59	20.50	21.77	20.33	18.79	18.44
14-dic	201.03	17.54	18.80	19.72	19.46	20.83	19.56	18.01	17.72
15-dic	199.60	17.23	18.49	19.53	19.17	20.82	19.93	17.91	18.13
16-dic	198.84	17.61	18.88	20.07	19.51	21.38	20.84	18.53	19.11
17-dic	165.36	17.14	18.24	19.19	18.77	20.35	19.94	17.90	18.38
18-dic	157.58	17.33	18.36	19.23	18.84	20.26	19.71	17.88	18.29
19-dic	179.51	13.10	14.13	14.90	14.78	16.22	15.61	13.65	14.01
<b>Promedio general</b>	<b>186.44</b>	<b>21.01</b>	<b>22.18</b>	<b>23.14</b>	<b>22.71</b>	<b>24.24</b>	<b>23.31</b>	<b>21.46</b>	<b>21.68</b>

<b>Valor Máximo</b>	963	61.52	67.64	65.95	74.13	69.23	69.7	59.69	60.5
<b>Valor Mínimo</b>	0	-3.381	-2.895	-3.226	-2.591	-3.021	-2.259	-2.424	-2.497