

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y TECNOLOGIA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO



ESTRATEGIAS ADAPTATIVAS ANTE LA ISLA DE CALOR URBANO: DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO TERMOCRÓMICO MULTICAPA DE REFLECTANCIA SOLAR DINÁMICA

T E S I S

que para obtener el grado de

MAESTRA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

Presenta

SOFIA MORALES INZUNZA

Director de Tesis

DR. MARCOS EDUARDO GONZÁLEZ TREVIZO

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, JUNIO 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y LA TECNOLOGÍA



MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

ESTRATEGIAS ADAPTATIVAS ANTE LA ISLA DE CALOR URBANO: DISEÑO Y
CARACTERIZACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO TERMOCRÓMICO MULTICAPA
DE REFLECTANCIA SOLAR DINÁMICA

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO PRESENTA

SOFIA MORALES INZUNZA

Correo electrónico: sofia.morales.inzunza@uabc.edu.mx
Identificador ORCID: 0000-0002-4418-7108

Director de tesis: Dr. Marcos Eduardo González Trevizo
Identificador ORCID: 0000-0002-7382-2641

Codirector de tesis: Dr. Ulises Jesús Tamayo Pérez

Revisor de tesis: Dra. Karen Estrella Martínez Torres

Revisor de tesis: Dr. Francisco Fernández Melchor

Revisor de tesis: Dr. Aníbal Luna León

Ensenada, B.C. 02 de junio de 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

ESTRATEGIAS ADAPTATIVAS ANTE LA ISLA DE CALOR

URBANO: DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN

RECUBRIMIENTO TERMOCRÓMICO MULTICAPA DE

REFLECTANCIA SOLAR DINÁMICA

TESIS

Que para obtener el grado de Maestría en Arquitectura, Urbanismo y Diseño presenta:

Sofia Morales Inzunza

Aprobada por:



Dr. Marcos Eduardo González

Trevizo

Director de tesis



Dr. Ulises Jesús Tamayo Pérez

Codirector de tesis



Dr. Francisco Fernández Melchor

Miembro del comité tutorial



Dra. Karen Estrella Martínez

Torres

Miembro del comité tutorial



Dr. Aníbal Luna León

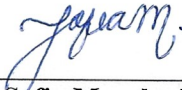
Miembro del comité tutorial

Ensenada, Baja California, México. Junio 2023

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Declaro que la tesis que se presenta contiene material original que no ha sido presentado para la obtención de un grado académico o diploma en esta u otra institución de educación superior. Asimismo, declaro que hasta donde yo sé no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona excepto donde se reconoce como tal a través de las citas.

Ensenada, B.C., junio 2023



Sofia Morales Inzunza

AVAL DE TERMINACIÓN DE TESIS

Fecha: 02 de junio de 2023

DR. MIGUEL ENRÍQUE MARTÍNEZ ROSAS
Director de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
Presente.-

Para dar cumplimiento al artículo 106 del ESTATUTO ESCOLAR DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, en su TÍTULO CUARTO DE LOS TÍTULOS PROFESIONALES, GRADOS ACADÉMICOS Y DIPLOMAS, CAPÍTULO ÚNICO, sobre los requisitos para la obtención del grado de **Maestría en Arquitectura, Urbanismo y Diseño**, como director de tesis en la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento de Arquitectura y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño Se emite la presente acta que avala que la estudiante:

SOFIA MORALES INZUNZA

ha concluido su tesis de grado titulada:

**ESTRATEGIAS ADAPTATIVAS ANTE LA ISLA DE CALOR URBANO: DISEÑO Y
CARACTERIZACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO TERMOCRÓMICO MULTICAPA DE
REFLECTANCIA SOLAR DINÁMICA**

Lo anterior en virtud de que se realizaron las correcciones y recomendaciones del comité tutorial, por lo que ha sido aprobada para el proceso de presentación de examen de grado.

DIRECTOR DE TESIS

DR. MARCOS EDUARDO GONZÁLEZ TREVIZO


FIRMA

DEDICATORIA

*Para todos los amigos de cuatro patas que he tenido a lo largo de mi vida,
gracias por desde niña despertar en mí el amor por el mundo e
inspirarme en mejorarlo, por ser mis compañeros en las noches de desvelo,
hoy sé que el reflejo que veo en sus ojos no es un acto de magia,
pero verlo me cautivará por siempre.*

AGRADECIMIENTOS

A mi padre, por ser mi ejemplo a seguir y siempre motivarme en seguir aprendiendo cosas nuevas, y a mi madre por creer en mí y apoyarme en el cumplimiento de esta meta.

A mi director de tesis, Dr. Marcos Eduardo González Trevizo, muchas gracias por contagiarme en mí su entusiasmo por este tema, por el empeño que ha brindado a este proyecto y por la confianza que ha puesto en mí para concretarlo. Le agradezco sobre todo la motivación con la que me acompañó en estos dos años, haciendo de este proceso más que una responsabilidad académica una experiencia emocionante y divertida.

A mi codirector de tesis, Dr. Ulises Jesús Tamayo Pérez, gracias primeramente por abrirme las puertas y acompañarme en mis primeros pasos por el laboratorio, por su orientación y por siempre contagiarme su alegría. Todos sus consejos sin lugar a duda permitieron la materialización de este proyecto.

Agradezco también a mi asesora de tesis, Dra. Karen Estrella Martínez Torres, muchas gracias por la invaluable ayuda brindada en estos últimos dos años, no solamente como parte de mi comité sino también como mi profesora, ha sido un gusto para mí aprender de usted.

Muy especialmente a mi asesor de tesis, Dr. Aníbal Luna León, le agradezco enormemente todo el tiempo que dedicó en resolver mis dudas, y por siempre atenderlas con paciencia, jovialidad, y el humorismo que tanto lo caracteriza.

A mi asesor de tesis, Dr. Francisco Fernández Melchor, por prestar siempre su mejor disposición para el desarrollo de este proyecto de tesis, muchas gracias por su amabilidad y por siempre crear un entorno agradable durante sus clases, las cuales recordare con gran afecto.

Especial mención al Dr. Roberto Machorro Mejía y todo el equipo del laboratorio de óptica del Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Nohemí, Roberto, Ramón y Estrella, muchas gracias por compartir conmigo su amplia experiencia y por el excelente ambiente de trabajo en el laboratorio, sus aportaciones han sido una parte esencial de este proyecto de investigación.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Jorge Octavio Mata Ramírez, a quien también he tenido el gusto de conocer en este trayecto y que me brindó su orientación para el entendimiento de este tema de investigación que tanto me entusiasma.

Al Dr. Priscy Alfredo Luque Morales, por la confianza con la que contribuyó en la disposición de instrumentos y herramientas de laboratorio, los cuales fueron una parte esencial para este proyecto.

A la Dra. Aurora García García de León por su constante apoyo y dedicación en todo lo que respecta a la realización y conclusión de esta maestría.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Felipe Beltrán Morales, quien me ha apoyado en este proceso incluso antes de iniciarlo, muchas gracias por todas las sugerencias y consejos que de una u otra forma me han traído hasta aquí.

De mis compañeras de maestría, agradezco a la Mtra. Nayeli Monserrat Castrejón Esparza y la Mtra. Gladys Adriana Acosta Fernández por aconsejarme a través de su experiencia, a América Xiomara Jiménez Pérez por motivarme en los momentos más agotadores, y a mi compañera de generación Lizeth Guadalupe Félix Lugo por los buenos momentos compartidos.

A Gabriel Ramos Romo, por acompañarme en esta etapa de mi vida, gracias por resolver mis dudas en lo que fue este nuevo mundo y por impulsarme a seguir mis sueños.

Finalmente, quiero agradecer a las instituciones que han hecho posible la realización de este grado, al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico brindado, a la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño (MyDAUD) por recibirme y contribuir en mi formación académica.

RESUMEN

La isla de calor urbano es una de las problemáticas ambientales más apremiantes de la actualidad debido a su impacto sobre el consumo energético y la morbilidad y mortalidad relacionada al calor, en este sentido, las propiedades ópticas de los materiales constructivos son sumamente relevantes para la mitigación del sobrecalentamiento urbano. La presente investigación tiene como objetivo el diseño y la caracterización de un material termocrómico multicapa adaptado a las condiciones climáticas de un clima BSk. El diseño del recubrimiento se realizó a partir de la configuración de una prueba de concepto, posteriormente las muestras prototipo fueron fabricadas mediante el método de deposición de recubrimiento por centrifugado. El proceso de caracterización fue mediante técnicas de espectrofotometría, termografía infrarroja y de análisis mecano-óptico de topografía, acorde a lo sugerido por el ASTM-E903 y el ASTM E1933; como contribución, en esta investigación se propuso la adecuación de estos métodos integrando un sistema termoeléctrico para el control y manipulación de la temperatura superficial de las muestras. Los resultados indicaron que cuando el recubrimiento se encuentra en su estado de coloración, las propiedades termocrómicas permiten una baja reflectancia en el espectro VIS (3.73 %) favoreciendo al calentamiento pasivo, sin embargo, su alta reflectancia en el espectro NIR (52.70 %) y su alta emitancia en la ventana atmosférica de 8 a 14 μm (0.95) pueden llegar a comprometer su eficiencia. Por otra parte, el recubrimiento multicapa es efectivo para promover el efecto de enfriamiento pasivo dada su alta reflectancia en el espectro NIR (65.35 %) y su alta emitancia en la ventana atmosférica de 8 a 14 μm (0.88) cuando el material exhibe su estado de decoloración. Por lo anterior, la incorporación de este tipo de recubrimiento puede contribuir en la mitigación de la isla de calor urbano en periodos de calor extremo sin afectar en gran medida a los periodos de clima fríos gracias a la modulación de su reflectancia en los espectros visible e infrarrojo cercano.

Palabras clave: isla de calor urbano, estrategias de mitigación, materiales fríos, materiales termocrómicos, reflectancia solar.

ABSTRACT

Due to its impact on energy consumption and heat-related morbidity and mortality, the urban heat island is currently one of the most critical environmental problems. In this regard, the optical properties of building materials have significant impacts on the mitigation of urban overheating. This investigation aims to design and characterize a multilayer thermochromic coating that is adapted to the climatic conditions of a BSk climate. The design of the coating was based on the configuration of a proof-of-concept sample, and prototype samples were produced using the spin coating deposition technique. The coating was characterized using spectrophotometry, infrared thermography, and mechano-optical topography analysis, as suggested by ASTM-E903 and ASTM-E1933. As a contribution, in this research the adequacy of these methods was proposed by integrating a thermoelectric system for the control and manipulation of the surface temperature of the samples. The results indicated that when the coating is in its colored state, the thermochromic properties allow a low reflectance in the VIS spectrum (3.73 %) favoring passive heating, however, its high reflectance in the NIR spectrum (52.70 %) and its high emittance in the atmospheric window of 8 to 14 μm (0.95) can compromise its efficiency. On the other hand, the multilayer coating is effective in promoting the passive cooling effect given its high reflectance in the NIR spectrum (65.35 %) and its high emittance in the atmospheric window of 8 to 14 μm (0.88) when the material exhibits its colorless state. Due to the modulation of its reflectance in the visible and near infrared, the incorporation of this type of coating can contribute to the mitigation of the urban heat island during periods of extreme heat without significantly impacting periods of cold weather.

Keywords: urban heat island, mitigation strategies, cool materials, thermochromic materials, solar reflectance

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	12
ÍNDICE DE ECUACIONES	13
GLOSARIO DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	14
INTRODUCCIÓN	1
<i>Conceptos fundamentales</i>	2
<i>Introducción al fenómeno de la isla de calor urbano</i>	4
<i>Resumen de capítulos</i>	6
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.1. Panorama general.....	8
1.2. Planteamiento del Problema	10
1.2.1. <i>Efectos de la isla de calor urbano sobre el consumo energético y la morbilidad y mortalidad relacionada al calor</i>	10
1.2.2. <i>Estrategias de mitigación a microescala: incorporación de materiales fríos</i>	12
1.3. Justificación y motivación	16
1.4. Antecedentes	18
1.4.1. <i>Estudios precursores de la isla de calor urbano</i>	18
1.4.2. <i>Clasificación de zonas climáticas locales</i>	18
1.4.3. <i>Progreso histórico en el estudio de los materiales fríos.</i>	19
1.5. Contextualización del objeto de estudio	21
1.6. Pregunta de investigación e hipótesis	24
1.7. Objetivos de investigación	24
1.7.1. <i>Objetivo general</i>	24
1.7.2. <i>Objetivos específicos</i>	24
1.8. Alcances y limitaciones	25
1.8.1. <i>Alcance</i>	25
1.8.2. <i>Limitaciones</i>	25
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	27
2.1. Marco Conceptual.....	28
2.1.1. <i>Energía térmica</i>	29
2.1.2. <i>Propiedades térmicas de los materiales</i>	29
2.1.3. <i>Mecanismos de transferencia de calor</i>	30
2.1.4. <i>Energía radiante</i>	31
2.1.5. <i>Radiación visible</i>	32
2.1.6. <i>Comportamiento de la luz</i>	34
2.1.7. <i>Radiación ultravioleta</i>	37
2.1.8. <i>Radiación infrarroja</i>	38
2.1.9. <i>Ventana atmosférica</i>	40
2.1.10. <i>Propiedades ópticas de los materiales</i>	41

2.1.11.	<i>Propiedades espectrales y propiedades hemisféricas</i>	44
2.1.12.	<i>Diferencias entre reflectividad, reflectancia y albedo</i>	45
2.2.	Marco teórico	47
2.2.1.	<i>Teoría del cuerpo negro perfecto</i>	47
2.2.2.	<i>La base energética de la isla de calor urbano</i>	50
2.3.	Estado del arte: materiales fríos predominantes en la literatura	52
2.3.1.	<i>Análisis bibliométrico de tendencias</i>	52
2.3.2.	<i>Progreso histórico de las tendencias de investigación</i>	53
2.3.3.	<i>Clasificación de materiales fríos</i>	55
2.3.4.	<i>Materiales de colores claros</i>	56
2.3.5.	<i>Materiales de colores fríos</i>	57
2.3.6.	<i>Materiales Retroreflectivos</i>	58
2.3.7.	<i>Materiales de enfriamiento radiante diurno</i>	59
2.3.8.	<i>Materiales termocrómicos</i>	60
2.3.9.	<i>Materiales de cambio de fase</i>	61
2.3.10.	<i>Materiales fluorescentes</i>	62
2.3.11.	<i>Países predominantes en el estudio de los materiales fríos</i>	64
2.3.12.	<i>Correlaciones entre el tipo de material frío y las características del clima</i>	65
2.3.13.	<i>Requerimientos tecnológicos para el desarrollo de materiales fríos</i>	68
2.4.	Técnicas de caracterización	73
2.4.1.	<i>Espectrofotometría de reflectancia difusa</i>	73
2.4.2.	<i>Termografía infrarroja</i>	74
2.4.3.	<i>Análisis mecano-óptico de topografía</i>	74
2.5.	Marco normativo	75
2.5.1.	<i>ASTM E903</i>	77
2.5.2.	<i>ASTM E1933</i>	78
CAPÍTULO III. MÉTODO		79
3.1.	Diseño de la investigación	80
3.2.	Variables del objeto de estudio	81
3.3.	Proceso metodológico	82
3.4.	Diseño del material	85
3.4.1.	<i>Mapeo de zonas climáticas locales</i>	85
3.4.2.	<i>Análisis de flujo entre zona climática y materiales fríos</i>	87
3.4.3.	<i>Cálculo de la temperatura sol aire</i>	88
3.5.	Diseño del experimento	89
3.5.1.	<i>Composición de recubrimiento termocrómico</i>	90
3.5.2.	<i>Diseño y fabricación de muestras</i>	92
3.5.2.1.	<i>Definición de sustratos</i>	92
3.5.2.2.	<i>Técnicas de deposición</i>	93
3.5.3.	<i>Diseño y fabricación de porta muestras</i>	94
3.5.4.	<i>Configuración de sistema termoeléctrico para el control de la temperatura</i>	96
3.5.5.	<i>Protocolo para el análisis de espectrofotometría</i>	97
3.5.6.	<i>Protocolo para el análisis de termografía infrarroja</i>	100
3.5.7.	<i>Protocolo para el análisis mecano-óptico de la topografía</i>	104
CAPÍTULO IV. RESULTADOS		105
4.1.	Diseño del material: Obtención de prueba de concepto (PoC)	106
4.1.1.	<i>Mapeo de zonas climáticas locales</i>	106
4.1.2.	<i>Análisis de flujo entre zona climática y materiales fríos</i>	107
4.1.3.	<i>Cálculo de la temperatura sol aire</i>	108

4.1.4.	<i>Obtención de la prueba de concepto</i>	110
4.1.5.	<i>Selección de productos para muestra prototipo</i>	113
4.2.	Composición de recubrimiento termocrómico	117
4.3.	Diseño y fabricación de muestras	118
4.3.1.	<i>Muestras del recubrimiento altamente reflectivo</i>	119
4.3.2.	<i>Muestras del recubrimiento termocrómico</i>	121
4.3.3.	<i>Muestras del recubrimiento protector UV mediante técnica de recubrimiento por centrifugado</i>	122
4.3.4.	<i>Muestras del recubrimiento protector UV por medio de aerosol</i>	123
4.3.5.	<i>Muestras multicapa mediante deposición mixta</i>	125
4.3.6.	<i>Selección de muestras prototipo</i>	129
4.4.	Diseño y fabricación de porta muestras	130
4.5.	Montaje del módulo experimental	132
4.5.1.	<i>Configuración del módulo experimental</i>	132
4.5.2.	<i>Montaje del módulo experimental</i>	134
4.6.	Análisis de espectrofotometría	137
4.6.1.	<i>Calibración de espectrofotómetro</i>	137
4.6.2.	<i>Reflectancia difusa de la muestra AR-04</i>	138
4.6.3.	<i>Reflectancia difusa de la muestra AR-TC-01</i>	141
4.6.4.	<i>Reflectancia difusa de la muestra AR-TC-UV-04</i>	143
4.6.5.	<i>Diferencias de reflectancia difusa en intervalos críticos de temperatura</i>	145
4.7.	Análisis de termografía infrarroja.....	151
4.7.1.	<i>Emitancia térmica de la muestra AR-04</i>	152
4.7.2.	<i>Emitancia térmica de la muestra AR-TC-01</i>	155
4.7.3.	<i>Emitancia térmica de la muestra AR-TC-UV-04</i>	157
4.8.	Análisis mecano-óptico de topografía	159
DISCUSIÓN		162
CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES		167
REFERENCIAS		172
APENDICES		183
	Apéndice A: Revisión de la literatura	184
	Apéndice B: Tablas de emisividad.....	189
	Apéndice C: Parámetros de medición de análisis de espectrofotometría para la muestra AR-04	190
	Apéndice D: Parámetros de medición de análisis de espectrofotometría para la muestra AR-TC-01	191
	Apéndice E: Parámetros de medición de análisis de espectrofotometría para la muestra AR-TC-UV-04.....	192
ANEXOS		193
	Anexo A: Diseño y fabricación de muestras.....	194
	Anexo B: Configuración del módulo experimental	195
	Anexo C: Medición de la reflectancia difusa.....	196

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Conceptos que sustentan la presente investigación.	3
Figura 2. Incremento de la temperatura máxima para el mes de agosto en el periodo 2018-2021.....	10
Figura 3. Estrategias de mitigación más relevantes en el estudio de la ICU.....	13
Figura 4. a) Distribución espacial de la temperatura para los estados de California, Baja California, y Baja California Sur.....	15
Figura 5. Precursores en el estudio de los materiales fríos	20
Figura 6. Clasificación de materiales fríos y subcategorías respecto a los componentes utilizados.....	23
Figura 7. Perspectiva deductiva del objeto de estudio en relación con el planteamiento del problema	26
Figura 8. Tipos de energía.....	28
Figura 9. Espectro de la radiación electromagnética.	31
Figura 10. Espacio de color CIELAB, gráfico de coordenadas.	33
Figura 11. Tipos de reflexión.....	35
Figura 12. Absorción de la radiación electromagnética.....	35
Figura 13. Refracción de la radiación electromagnética.....	36
Figura 14. Dispersión del espectro visible de la radiación electromagnética.....	36
Figura 15. Difracción de ondas electromagnéticas.....	37
Figura 16. Esquema del experimento de Herschell.....	39
Figura 17. Imagen radiométrica tomada mediante una cámara termográfica.....	40
Figura 18. Relación del espectro electromagnético y la ventana atmosférica infrarroja.....	41
Figura 19. Relación entre la radiación incidente y la radiación reflejada por la superficies.....	45
Figura 20. Espectro de radiación de un cuerpo negro.....	49
Figura 21. Variación diurna del balance energético.....	50
Figura 22. Esquema de los intercambios radiantes en la capa límite urbana.....	51
Figura 23. Análisis bibliométrico de tendencias	53
Figura 24. Progreso reciente de las tendencias de investigación de materiales fríos.....	54
Figura 25. Reflexión especular, lambertiana y retroreflectiva.....	59
Figura 26. Correlación entre el espectro electromagnético y los rangos de reflectancia y emitancia espectral de los materiales fríos.....	64
Figura 27. Jerarquía de países que estudian la temática de materiales fríos	65
Figura 28. Distribución geográfica de los diversos tipos de materiales fríos estudiados en el campo en relación con la clasificación climática.....	67
Figura 29. Conexiones comerciales entre los países investigadores y países proveedores de insumos.....	71
Figura 30. Tipos de esfera de integración.....	77

Figura 31. Precisiones metodológicas para el diseño de la investigación.....	80
Figura 32. Secuencia cronológica del proceso metodológico.....	82
Figura 33. Clasificación de zonas climáticas locales	86
Figura 34. Método para la delimitación geográfica de zonas climáticas locales	87
Figura 35. Procedimiento para el análisis de flujos entre tipos de materiales y zonas climáticas. ..	87
Figura 36. Cálculo de la temperatura sol aire	88
Figura 37. Diseño del experimento.	89
Figura 38. Medición de masa de los componentes.	91
Figura 39. Procedimiento para la impresión 3D del porta muestras.	96
Figura 40. Protocolo para el análisis de espectrofotometría.	98
Figura 41. Material seleccionado como modificador de superficie.	100
Figura 42. Protocolo para el análisis de termografía infrarroja.....	103
Figura 43. Zonas climáticas locales de la ciudad de Ensenada, B.C.....	106
Figura 44. Análisis de flujos entre zonas climáticas y tipo de material.	107
Figura 45. Isotermas de temperatura de los días típicos mensuales.....	108
Figura 46. Cálculo de la temperatura sol aire.	109
Figura 47. Criterios de diseño para la elaboración de la prueba de concepto.	110
Figura 48 Prueba de concepto (PoC) para el diseño del material prototipo.....	112
Figura 49. Recubrimiento elastomérico acrílico APOC 252 Sunwhite.	113
Figura 50. Clasificación de materiales fríos en el CRRC.	114
Figura 51. Productos seleccionados para el componente termocrómico.	116
Figura 52. Barniz protector a la radiación UV de la marca GOLDEN.	117
Figura 53. Medición de pH del compuesto aglutinante.	117
Figura 54. Evaluación de termocromismo.	118
Figura 55. Preparación de sustratos.	118
Figura 56. Arreglo experimental para la fabricación de muestras.	119
Figura 57. Muestras resultantes de la deposición de recubrimiento altamente reflectivo.....	120
Figura 58. Muestras resultantes de la deposición de recubrimiento termocrómico.	122
Figura 59. Muestras resultantes de la aplicación de protector a la radiación UV	123
Figura 60. Muestras resultantes de la aplicación de protector UV por la técnica de aerosol.....	124
Figura 61. Resultados de la fabricación de muestras multicapa.	127
Figura 62. Muestras seleccionadas para la etapa de caracterización óptica.....	129
Figura 63. Diseño de porta-muestras	130
Figura 64. Modelo 3D del porta muestras.....	131
Figura 65. Resultado final a la fabricación del porta-muestras.....	131

Figura 66. Configuración de modulo experimental	133
Figura 67. Corte de pieza de aluminio (i) y colocación de imanes.	135
Figura 68. Colocación de pasta térmica sobre disipador (f) y celda peltier (h)	135
Figura 69. Resultado del ensamblaje del portaobjetos.....	136
Figura 70. Resultado del montaje del módulo experimental.....	136
Figura 71. Muestras de referencia (MgCO ₃), y su colocación en puertos de reflectancia para calibración.....	138
Figura 72. Reflectancia difusa de la muestra AR-04.	140
Figura 73. Reflectancia difusa de la muestra AR-TC-01.....	143
Figura 74. Reflectancia difusa de la muestra AR-TC-UV-04.....	145
Figura 75. Reflectancia de muestras prototipo a 13°C.....	146
Figura 76. Reflectancia de muestras prototipo a 29°C.....	148
Figura 77. Reflectancia de muestras prototipo a 31°C.....	149
Figura 78. Reflectancia de muestras prototipo a 45°C.....	150
Figura 79. Análisis de muestra prototipo mediante microscopio AFM.	160
Figura 80. Topografía de la muestra AR-04	160
Figura 81. Topografía de la muestra AR-TC-01	161
Figura 82. Topografía de la muestra AR-TC-UV-04.....	161

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades térmicas y físicas de los materiales.....	29
Tabla 2. Longitud de onda, frecuencia y energía del fotón del espectro electromagnético.	32
Tabla 3. Propiedades ópticas de los materiales	43
Tabla 4. Clasificación de materiales fríos en función de los compuestos base	56
Tabla 5. Componentes clave; mayores valores de reflectancia solar; mayor reducción de T_{sup} ; mayor energético.....	69
Tabla 6. Marco normativo, técnicas e instrumentos.....	76
Tabla 7. Operacionalización de variables.	81
Tabla 8. Proceso metodológico de la investigación.	84
Tabla 9. Especificaciones técnicas de la balanza de precisión PA163, OHAUS.....	91
Tabla 10. Concentración de pigmentos TC propuesta para el diseño del recubrimiento TC	91
Tabla 11. Especificaciones técnicas del sonicador ultrasónico 1510, Branson.....	93
Tabla 12. Especificaciones técnicas del instrumento Spin Coater, WS-650MZ-23NPPB.....	93
Tabla 13. Especificaciones técnicas del vernier digital IP54	94
Tabla 14. Especificaciones técnicas de la impresora 3D Prusa i3 MK3S	95
Tabla 15. Instrumentos y herramientas requeridas para análisis de espectrofotometría	99
Tabla 16. Especificaciones técnicas del equipo FLIR C5	101
Tabla 17. Especificaciones técnicas del instrumento de medición Nanosurf <i>Easyscan 2</i>	104
Tabla 18. Ingredientes del recubrimiento elastomérico acrílico APOC 252 Sunwhite.....	113
Tabla 19. Revisión de la literatura para la selección de componentes para la fabricación de muestras	115
Tabla 20. Espesores resultantes de la aplicación del recubrimiento altamente reflectivo.....	120
Tabla 21. Espesores resultantes de la aplicación del recubrimiento termocrómico.	121
Tabla 22. Espesores resultantes de la aplicación del recubrimiento protector UV mediante técnica de recubrimiento por centrifugado.....	123
Tabla 23. Espesores resultantes de la aplicación de protector UV por la técnica de aerosol	124
Tabla 24. Resultados de la fabricación de muestras multicapa.....	128
Tabla 25. Elementos que conforman el módulo experimental	134
Tabla 26. Muestras seleccionadas para el análisis de espectrofotometría.....	137
Tabla 27. Muestras seleccionadas para el análisis de termografía infrarroja	151
Tabla 28. Resultados del análisis de termográfica infrarroja para la muestra AR-04	154
Tabla 29. Resultados del análisis de termográfica infrarroja para la muestra AR-TC-01.....	156
Tabla 30. Resultados del análisis de termográfica infrarroja para la muestra AR-TC-UV-04	158
Tabla 31. Muestras seleccionadas para el análisis de mecano óptico de topografía	159

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Absortividad	42
Ecuación 2. Reflectividad	42
Ecuación 3. Transmisividad	42
Ecuación 4. Primera ley de la termodinámica	42
Ecuación 5. Relación entre reflectividad, absortividad y transmisividad en cuerpos no opacos	42
Ecuación 6. Relación entre reflectividad, absortividad y transmisividad en cuerpos opacos	42
Ecuación 7. Relación entre emisividad y transmisividad	43
Ecuación 8. Absortividad espectral	44
Ecuación 9. Reflectividad espectral	44
Ecuación 10. Transmisividad espectral	44
Ecuación 11. Emisividad espectral	44
Ecuación 13. Ley de Stefan-Boltzmann	47
Ecuación 14. Energía del fotón	48
Ecuación 15. Radiación de cuerpo negro de Planck	48
Ecuación 12. Balance energético	51
Ecuación 16. Ley del coseno de Lambert	73
Ecuación 17. Cálculo de la temperatura sol aire	88

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Descripción
3DPCA	Acetato de celulosa tridimensionalmente poroso
AAGP	Geo polímero activado alcalino
BES	Simulación energética de edificios
BFS	Escoria de alto horno
CB	Negro de carbón
CC	Materiales de colores fríos
DPHA	Hexaacrilato de dipentaeritritol
DRC	Materiales de enfriamiento radiante diurno
DSC	Calorimetría diferencial de barrido
EDS	Espectrometría de rayos X de dispersión de energía
FESEM	Microscopía electrónica de barrido por emisión de campo
FL	Materiales fluorescentes
HGM	Microesferas huecas de vidrio
ICU	Isla de calor urbano
IR	Espectro Infrarrojo
LC	Materiales de colores claros
maPCM	PCM macroencapsulado
miPCM	PCM microencapsulado
MTP	Polvo termocrómico microencapsulado
NIR	Espectro infrarrojo cercano
PCM	Materiales de cambio de fase
PDLC	Cristales líquidos dispersos por polímeros
PET	Tereftalato de polietileno
PMMA	Polimetacrilato de metilo
QDs	Puntos cuánticos
QUV	Prueba de intemperie acelerada
RR	Materiales retroreflectivos
SEM	Microscopía electrónica de barrido
TC	Materiales termocrómicos
TG	Análisis termogravimétrico
TPX	Polimetilpenteno
TT	Temperatura de transición
UV	Espectro Ultravioleta
VIS	Espectro Visible

GLOSARIO DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
Ag	Plata	MgCO ₃	Carbonato de magnesio
Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio	PbS	Sulfuro de plomo
Al ₂ O ₃ : Cr	Óxido de cromo (iii)	PEG/SiO ₂	Polietilenglicol/sílice
BaSO ₄	Sulfato de bario	Si	Sílice
Bi ₄ Ti ₃ O ₁₂	Titanato de bismuto	SiC	Carburo de silicio
C ₃ H ₈ O	Alcohol isopropílico	SiO ₂	Dióxido de silicio
C ₅ H ₉ NO	Metilpirrolidona	Ti	Titanio
Ca	Calcio	TiO ₂	Dióxido de titanio
Ca (OH) ₂	Hidróxido de calcio	VO ₂	Óxido de vanadio
CaCO ₃	Carbonato de calcio	Y ₂ O ₃	Óxido de itrio
CaO	Óxido de calcio	Zn	Zinc
CaSiO ₃	Silicato de calcio	ZnO	Óxido de zinc
CH ₃ (CH ₂) ₂₀ CH ₃	Docosane	ZnS	Sulfuro de zinc
CIS	Sulfuro de cobre e indio	ZrO ₂	Dióxido de circonio
Cr	Cromo	α	Absorbancia
Cr ₂ O ₃	Óxido de cromo (III)	ε	Emitancia térmica
CuO	Óxido de cobre (II)	ρ	Reflectancia
Di	2-Etilhexilo	R _{VIS}	Reflectancia visible
Fe	Hierro	R _{IR}	Reflectancia infrarroja
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro (III)	R _{UV}	Reflectancia ultravioleta
HfO ₂	Óxido de hafnio (IV)		
K ₂ O	Óxido de potasio		
Mn	Manganeso		

El hombre sumergido en las tinieblas de la noche, que ha descansado de sus trabajos y penalidades, abre los ojos al placer más brillante cuando las horas del día se deslizan al descorrer el velo de la naturaleza; todo parece que recobra una nueva existencia en el gran teatro del mundo, al adornarse la Tierra con los brillantes colores de la luz, cuya belleza deslumbra nuestros ojos...

Wenceslao Barquera, Física de la luz, Imprenta de María F. de Jáuregui, México, 1809.

INTRODUCCIÓN



Conceptos fundamentales

A manera de introducción, la presente investigación se localiza en el panorama de la isla de calor urbano (ICU) y de las estrategias de mitigación enfocadas a la incorporación de nuevos materiales de construcción capaces de reducir la temperatura de las superficies urbanas, dicho lo anterior, los conceptos que dan fundamento al tema de investigación son los siguientes: diseño de enfriamiento pasivo, reflectancia espectral y termocromismo (Figura 1).

En primer lugar, el diseño de enfriamiento pasivo se refiere a un enfoque de diseño en el cual se emplean distintas técnicas para mejorar el confort térmico y la calidad del aire interior, sumado a un bajo consumo de energía eléctrica, de acuerdo con Santamouris (2005) las técnicas de enfriamiento pasivo se clasifican en los siguientes tres grupos:

- Técnicas de protección al sol y al calor: Son técnicas que recurren al diseño paisajista, el uso de espacios al aire libre, la forma y el diseño de la construcción, así como sus acabados externos, estrategias de control solar y sombreado, aislamiento térmico, control de ganancias internas, entre otros.
- Técnicas para la modulación del calor: La modulación de ganancias de calor se encarga de la capacidad de almacenamiento térmico de la construcción, este tipo de técnicas proporcionan la atenuación de los picos en la carga de refrigeración y la modulación de la temperatura interna.
- Técnicas para la disipación del calor: Las principales técnicas de disipación de calor son el enfriamiento basado en el uso del suelo, el enfriamiento convectivo y evaporativo usando el aire y el agua como sumidero y el enfriamiento radiante utilizando el cielo como disipador de calor.

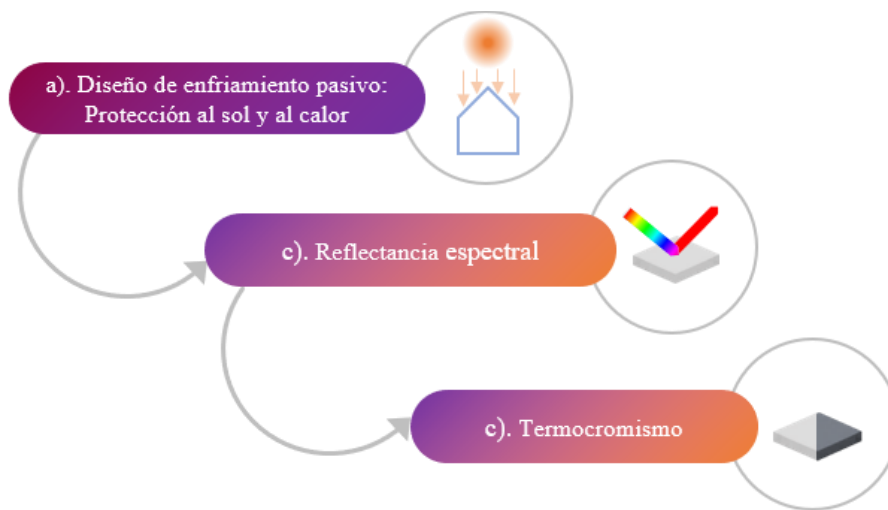
De las distintas técnicas de enfriamiento pasivo antes mencionadas, este estudio se acota al uso de técnicas de protección al sol y al calor mediante el uso de materiales fríos como recubrimientos exteriores. El tercer concepto fundamental es el de reflectancia espectral, este se refiere a la fracción de la radiación electromagnética reflejada por una superficie en determinada longitud de onda y dirección con respecto a la radiación electromagnética que incide sobre ella, la reflectancia de un compuesto puede encontrarse en un rango de 0 a 100 % (Cengel et al., 2011). Actualmente, el estudio de materiales con altos porcentajes de reflectancia en rangos espectrales específicos (principalmente el espectro visible y el espectro infrarrojo), constituye

un área de especial interés para reducir el fenómeno de la ICU (Agencia de Protección Ambiental [por sus siglas en inglés EPA], 2022b).

Finalmente, el termocromismo se refiere al cambio dramático de color que ocurre cuando un material se funde o disuelve en un solvente (Stylios, 2006), estos se producen mediante la incorporación de pigmentos termocrómicos a los aglutinantes adecuados. Generalmente, los pigmentos termocrómicos exhiben su estado de coloración a bajas temperaturas y se caracterizan por una determinada temperatura de transición; cuando la temperatura del ambiente supera a la temperatura de transición del pigmento, este exhibe entonces el cambio de color (Pisello, 2015). Es debido a su habilidad de cambio que este tipo de materiales pertenece a una línea de investigación dedicada a su incorporación en cubiertas, muros exteriores y pavimentos como estrategia de mitigación a la ICU, ya que su comportamiento dinámico permite la modulación de la reflectancia solar, promoviendo el enfriamiento pasivo sin comprometer al confort interior y exterior durante periodos de invierno.

Figura 1

Conceptos que sustentan a la investigación



Introducción al fenómeno de la isla de calor urbano

A medida que las ciudades crecen y se desarrollan, comienzan a tener lugar una secuencia de transformaciones en el paisaje, los paisajes abiertos y permeables (árboles, vegetación y cuerpos de agua) son reemplazados por superficies impermeables (camino, aceras, edificios y estacionamientos) (EPA, 2011). Este intercambio da como resultado la disminución de las áreas sombreadas, así como también del efecto de enfriamiento derivado de la evaporación de superficies de agua. En adición, las superficies urbanas, constituidas principalmente por materiales como el concreto, retienen un alto porcentaje de la energía radiante proveniente del sol, energía que posteriormente es liberada en forma de calor sensible, incrementando así la temperatura del ambiente y ocasionando el efecto de isla de calor urbano (Steward y Oke, 2012), también conocido por sus siglas ICU.

Si bien ha pasado más de un siglo desde que se informó por primera vez del efecto ICU, en los últimos treinta años los académicos se han concentrado en estudiar sus consecuencias sobre el consumo de energía y las implicaciones para la salud humana (Akbari y Kolokotsa, 2016), señalando una sinergia entre la magnitud de la ICU, la presencia de eventos de calor extremo, la demanda de enfriamiento de los edificios y los índices de morbilidad y mortalidad humana (Founda y Santamouris, 2017; Santamouris, 2020).

El aumento de la temperatura eleva la demanda de enfriamiento de los edificios en un rango de 12-18 %, así como también ocasiona un incremento del límite de la demanda eléctrica durante la temporada cálida, conduciendo una serie de eventos que ponen en serio estrés a la infraestructura eléctrica: se disminuye la capacidad de generación de las plantas de poder, reduce la capacidad de las líneas de transmisión eléctrica, se presentan pérdidas entre subestaciones y transformadores, y finalmente, el aumento de la demanda lidera también a la construcción de un mayor número de plantas de poder para dar abasto al actual suministro de energía (Santamouris, 2020).

Además del impacto en la demanda de energía, otro factor de riesgo cada vez más significativo es el incremento de la morbilidad y mortalidad humana relacionada a eventos de calor (Morais et al., 2021). El riesgo a eventos de clima extremo deriva de amenazas físicas, la extensión de la exposición ante la amenaza, y la capacidad de los ciudadanos de estar preparados para confrontar los desafíos del clima cambiante, sin embargo, no se requiere que ocurra un

evento de alto riesgo para que la población experimente impactos significativos en sus índices de mortalidad, un impacto extremo puede darse también como resultado de un impacto moderadamente fuerte cuando este es recibido por una población altamente vulnerable (Ebi et al., 2020). Las afectaciones a la salud se correlacionan con una serie de factores socioeconómicos y ambientales que en conjunto definen el grado de vulnerabilidad al calor, en este sentido la población puede ser vulnerable en función del lenguaje, parámetros sociales/económicos, por las características ambientales/urbanas y finalmente por la edad y condiciones de aislamiento social (Lee y Brown, 2022; Nayak et al., 2018).

Ante esta serie de problemáticas, en los últimos años los investigadores se han dedicado a la producción y evaluación de nuevas tecnologías de enfriamiento pasivo: *los materiales fríos*. Este tipo de materiales varían de acuerdo con las propiedades ópticas que los caracterizan, ya sea el rango espectral en que estos demuestran su mejor desempeño, el tipo de reflectancia que estos poseen (lambertiana, especular o retroreflectiva), su carácter fluorescente o bien su comportamiento dinámico ante diversos estímulos de temperatura, clasificándose en los siguientes siete grupos: a) materiales de colores claros, b) materiales de colores fríos, c) materiales retroreflectivos, d) materiales de enfriamiento radiante diurno, e) materiales termocrómicos, f) materiales de cambio de fase, g) materiales fluorescentes.

En la presente investigación se tiene por objetivo el diseño y la caracterización de un material frío, conformado por la combinación entre los materiales de claros/fríos y los materiales termocrómicos, esto con el propósito de dar respuesta al siguiente cuestionamiento: *¿De qué manera puede un recubrimiento termocrómico elaborado a partir de una estructura multicapa, contribuir en la mitigación del efecto de la ICU a microescala durante los periodos cálidos extremos sin afectar negativamente a los periodos fríos?*

Resumen de capítulos

Las bases teóricas y los métodos que sustentan este estudio, así como los resultados obtenidos se desarrollan en este documento mediante una estructura de cuatro capítulos:

- Capítulo I: Contiene las temáticas que dan lugar al planteamiento del problema, justificación y pertinencia de la investigación, contextualización del objeto de estudio, antecedentes, pregunta de investigación e hipótesis, objetivos de investigación y finalmente los alcances y limitaciones.
- Capítulo II: Aborda los conceptos, teorías, publicaciones y normas relevantes para la investigación que en conjunto constituyen el marco teórico referencial.
- Capítulo III: Se describen las técnicas que definen el método empleado durante esta investigación, subdividiéndose en los siguientes apartados: a) diseño de la investigación, b) diseño del material, c) diseño del experimento.
- Capítulo IV: Se exponen los resultados obtenidos del diseño y la fabricación de muestras prototipo, así como de la ejecución del experimento. Este capítulo se subdivide en siete apartados: a) diseño del material, b) composición del recubrimiento termocrómico, c) diseño y fabricación de muestras, d) montaje del módulo experimental, e) análisis de espectrofotometría, d) análisis de termografía infrarroja, e) análisis mecano-óptico de topografía.

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Panorama general

En la actualidad 60 % de la población global se concentra en las ciudades (Organización de las Naciones Unidas para los asentamientos humanos [ONU-Habitat], 2021), el proceso de urbanización requerido para dar lugar al acelerado crecimiento de la ciudad implica el intercambio de las superficies naturales (suelo y vegetación) por nuevas superficies impermeables (asfalto, pisos y concreto) las cuales reducen la evapotranspiración y aumentan la liberación de calor sensible (Bokaie et al., 2016; Yang et al., 2020). Asimismo, el conjunto de factores tales como la densidad poblacional, las características térmicas de los materiales constructivos, la geometría urbana y el calor generado por actividades antropogénicas resulta en un fenómeno conocido como isla de calor urbano.

La ICU se presenta cuando se da una diferencia de temperatura entre las áreas rurales y las áreas urbanas, siendo estas últimas las que se ven afectadas por un incremento de la temperatura ambiental de 1 a 10 °C (Santamouris, 2020). Las temperaturas extremas imponen estrés térmico en la salud humana, lo que resulta en un aumento de la demanda energética de enfriamiento (Yang et al., 2020), o bien, en el incremento de hospitalizaciones y la tasa de mortalidad (Pyrgou y Santamouris, 2018), siendo los grupos de población vulnerable los más afectados por esta situación (Lee y Brown, 2022). Los grupos poblacionales más vulnerables a los efectos de la ICU se definen por un conjunto de factores socioeconómicos y ambientales tales como la edad, la raza, el lenguaje, el nivel socioeconómico, y el tipo y uso de suelo (LU/LC¹) (Nayak et al., 2018).

Ante esta problemática los futuros escenarios de mitigación plantean la implementación de diversas estrategias para reducir el impacto de la ICU, como es el caso de infraestructura verde, dispositivos de control solar y el uso de materiales reflectivos, también conocidos como materiales fríos (Carlosena et al., 2021). Los materiales fríos poseen como cualidades una alta reflectancia solar y una alta emitancia térmica (mayores al 80 %), lo que les permite mantener una temperatura superficial menor con respecto a otros materiales de construcción, por lo que su aplicación en las superficies urbanas constituye una ruta potencial para la mitigación del sobrecalentamiento urbano, en este sentido, hoy en día existe un campo de la investigación orientado a la evaluación del desempeño de estos materiales.

¹ Land Use/Land Cover

La incorporación de materiales altamente reflectivos en el espectro visible ha demostrado su efectividad en numerosas investigaciones de campo (Doulos et al., 2004) sin embargo estos presentan la desventaja de no cumplir con determinados parámetros arquitectónicos y estéticos, por lo que la incorporación de materiales altamente reflectivos en el espectro infrarrojo es una alternativa viable en lo que respecta a una mayor variedad de tonalidades distintas al blanco (Rosso et al., 2017), estas investigaciones se llevan a cabo en laboratorio con fines de desarrollar y caracterizar las muestras así como también se recurre a estudios de campo para evaluar su desempeño ante la exposición solar.

Por otra parte, los materiales altamente reflectivos en el espectro visible comprometen el confort visual de los peatones debido a su reflectividad de tipo difusa, por lo que investigadores como Yuan (2019) y Levinson (2020) plantean el uso de materiales cuya reflectancia sea de tipo retroreflectiva, sin embargo, gran parte de estos estudios aún se limitan a condiciones de laboratorio. Otro tipo de materiales de gran potencial también estudiados en los últimos años son aquellos de enfriamiento radiante diurno, estos materiales presentan buenos resultados en zonas climáticas con bajos porcentajes de humedad atmosférica, aunque su introducción y evaluación en climas húmedos aún presenta ciertos desafíos (Ulpiani et al., 2021). Otros materiales con bastante relevancia en la actualidad son los materiales fluorescentes (Garshasbi et al., 2022), los cuales han presentado resultados favorables en laboratorio.

Si bien la mayoría de los materiales antes mencionados cumplen con el objetivo de reducir la demanda energética de enfriamiento, estos también presentan dificultades para garantizar el confort térmico durante los periodos fríos, dicho lo anterior los materiales fríos considerados de comportamiento dinámico, como es el caso de los materiales de cambio de fase y los materiales termocrómicos son una alternativa viable para reducir la penalidad energética por calentamiento (Santamouris et al., 2020).

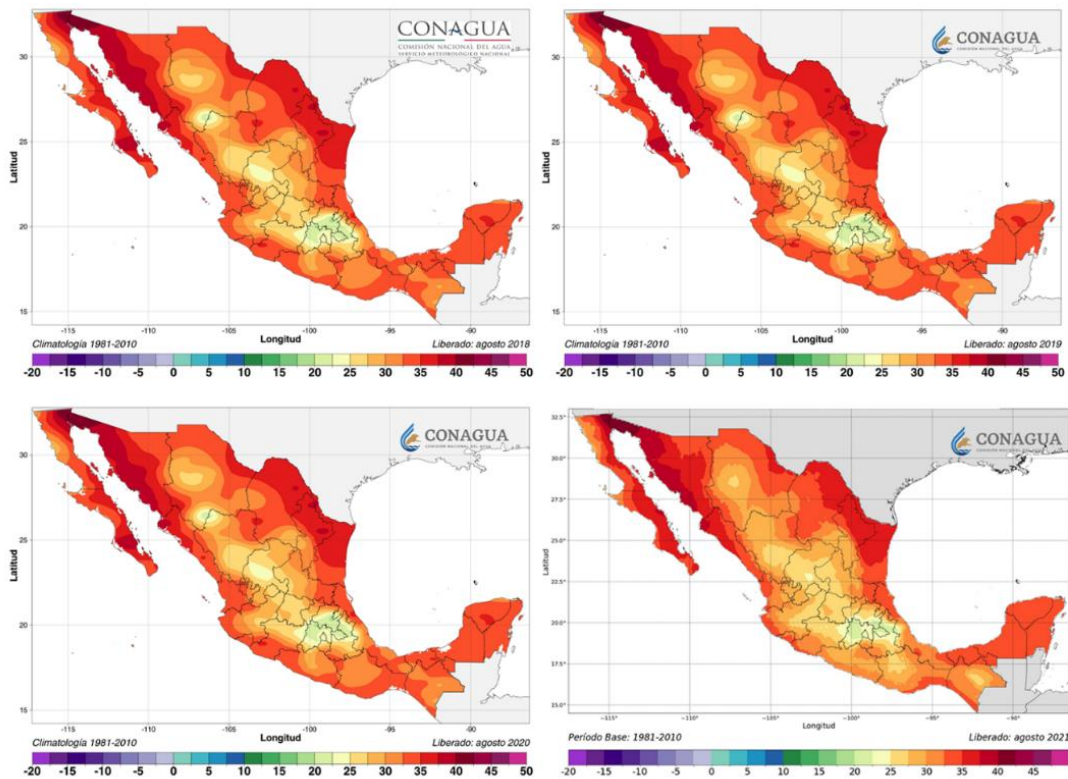
1.2. Planteamiento del Problema

1.2.1. Efectos de la isla de calor urbano sobre el consumo energético y la morbilidad y mortalidad relacionada al calor

La isla de calor urbano (ICU), internacionalmente conocida como *urban heat island*, es un fenómeno documentado en 450 ciudades a nivel global y uno de los principales retos del cambio climático (Paolini y Santamouris, 2023). La ICU agrava significativamente el consumo de energía debido al incremento de la demanda de enfriamiento, también se ha demostrado como la exposición a altas temperaturas se relaciona con efectos adversos en la mortalidad y morbilidad humana (Santamouris, 2020), de acuerdo con la Secretaría de Salud (SSA), durante las temporadas de verano en México se ha reportado el incremento de casos de deshidratación, golpes de calor, quemaduras solares así como el número de defunciones, principalmente en el norte y sureste del país, lo anterior se encuentra correlacionado al incremento de la temperatura en dichas zonas (SSA, 2020), tal cual se ilustra en la Figura 2.

Figura 2

Incremento de la temperatura máxima para el mes de agosto en el periodo 2018-2021



Nota. Mapa de la temperatura máxima en México, tomado de CONAGUA, 2023.

Asimismo, hallazgos recientes en la literatura científica reportan una mayor vulnerabilidad en poblaciones mayores a 65 años y menores a 9 años, así como también reportan un mayor riesgo en la población femenina, la población analfabeta, y en zonas con mayor temperatura superficial (LST²) (Abrar et al., 2022; Navarro-Estupiñan et al., 2020). Los factores que influyen en la ICU se han explorado en varios estudios, de acuerdo con Paolini y Santamouris, el sobrecalentamiento urbano deriva de una mayor cantidad de ganancias térmicas y una menor cantidad de pérdidas térmicas, lo cual se presenta principalmente en las ciudades debido a la alta absorbancia de los materiales de construcción:

La energía absorbida se almacena en la masa de los materiales, aumentando su temperatura, y se libera a la atmósfera en forma de calor convectivo y radiación infrarroja. Paralelamente, los materiales absorben la radiación infrarroja emitida por la atmósfera y el resto de superficies del entorno construido. (Paolini y Santamouris, 2023, p.7).

En consecuencia, a las problemáticas antes planteadas, el incremento de la demanda de energía y la falta de accesibilidad a la misma denotan en una situación llamada pobreza energética. La pobreza energética ocurre cuando la población se ve limitada a acceder a servicios de energía debido a bajos ingresos, poca eficiencia y bajo rendimiento energético de los edificios, y altos precios en el servicio de electricidad; por lo anterior, además de la vulnerabilidad a eventos de clima extremo, la población puede también considerarse vulnerable a la pobreza energética cuando se entrelazan factores tales como aspectos sociodemográficos, las características de los hogares, la salud, el analfabetismo energético y finalmente factores culturales (Poverty y Hub, 2022).

Debido a las características de los materiales constructivos, los edificios son uno de los principales factores que dan origen al fenómeno de la ICU, aunque también son estos edificios los que simultáneamente sufren de los efectos del sobrecalentamiento de la ciudad (Liu et al., 2019). Un edificio se define por un conjunto de muros, cubiertas y ventanas que delimitan el ambiente térmico interior del ambiente térmico exterior, es decir por su envolvente arquitectónica, sin embargo, el avance tecnológico en lo que respecta a la envolvente se considera reducido e incluso desviado (Santamouris, 2020), es por eso que la investigación de

² Land Surface Temperature

nuevos materiales de construcción denominados como materiales fríos ha llamado la atención como posible estrategia de mitigación a la ICU.

1.2.2. Estrategias de mitigación a microescala: incorporación de materiales fríos

Como consecuencia a las implicaciones de la isla de calor urbano se plantean en la literatura tres grupos principales de estrategias de mitigación, en el primer grupo se encuentran aquellas estrategias dirigidas al LU/LC³), como la incorporación de áreas verdes, cubiertas y fachadas frías/verdes, materiales altamente reflectivos o de alto albedo, entre otros. El segundo grupo se compone por las estrategias de diseño urbano, enfocadas al aprovechamiento de la radiación solar, el uso estratégico de fluidos en los centros urbanos como la aspereza del viento, el diseño de cañones urbanos y sistemas de cuerpos de agua. Por último, existen también las estrategias de planeación urbana, las cuales abarcan la morfología y estructura urbana, las políticas públicas, la conciencia de los habitantes y la intensidad del tráfico (Gonzalez-Trevizo et al., 2021).

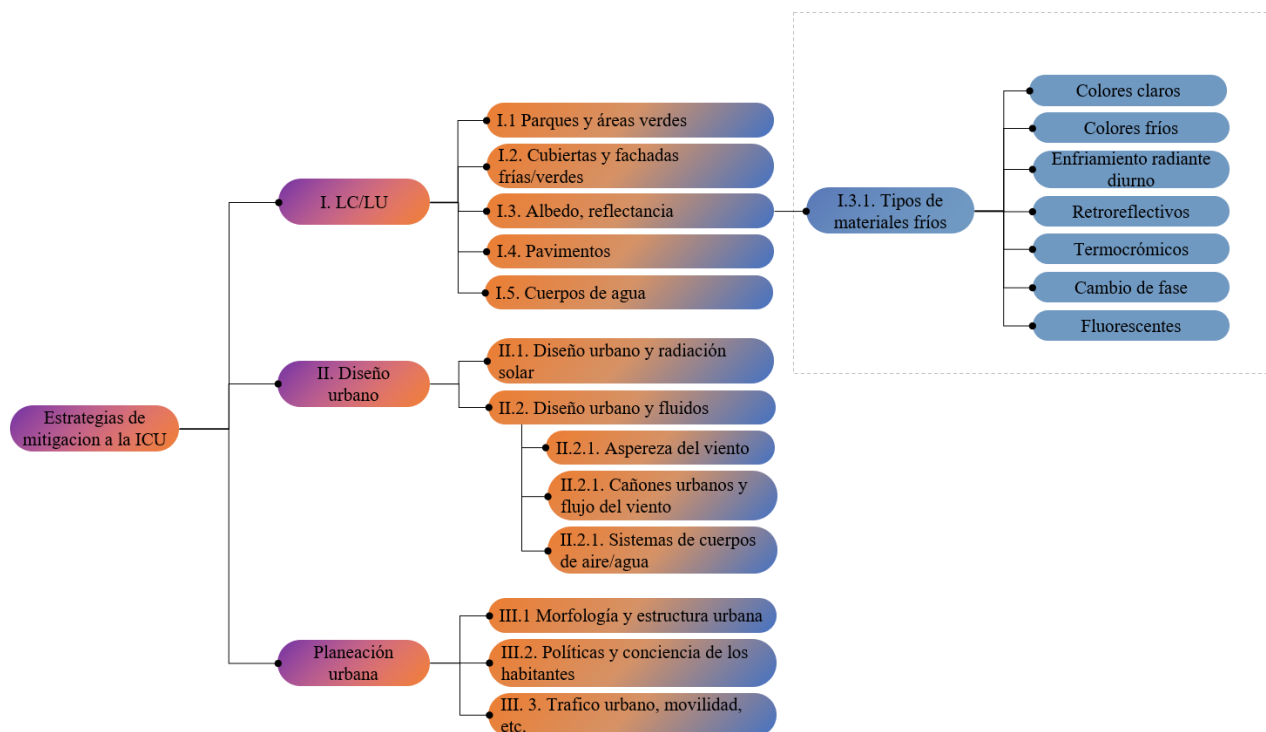
De los tipos de estrategias previamente descritas, el LU/LC se relaciona estrechamente con los materiales constructivos, debido principalmente a la interacción entre la radiación solar y las superficies urbanas. La energía del sol representa la principal fuente de calor que actúa sobre la tierra, la mayor parte de esta energía se encuentra entre las longitudes de onda de 300 nm y 2500 nm, conteniéndose un 5 % en el espectro ultravioleta (UV), un 43 % en el espectro visible (VIS) y un 52 % en el espectro infrarrojo cercano (NIR), cuando la radiación solar incide sobre las superficies opacas una parte de ella se refleja o dispersa en la región VIS, determinando su color y brillo específicos mientras que el porcentaje restante es absorbido por la misma superficie (Santamouris et al., 2022), es por eso que los materiales de color blanco mantienen una temperatura superficial menor a la de otros materiales de colores más oscuros (Cetto, 2019). Los materiales caracterizados por una alta reflectancia solar se denominan en la literatura como materiales fríos, (Santamouris y Yun, 2020), estos a su vez se clasifican en siete grandes grupos, en la Figura 3 se presentan las estrategias de mitigación a la ICU más relevantes en el panorama actual de este campo de investigación, así como los tipos de materiales fríos identificados en la literatura al momento de realizar esta investigación: colores claros, definidos por una alta reflectancia en el espectro visible; colores fríos, caracterizados por una alta reflectancia en el

³ Land Cover/Land Use por sus siglas en inglés

espectro infrarrojo; materiales de enfriamiento radiante diurno, caracterizados por una alta reflectancia solar visible e infrarroja y una alta emitancia en el rango de 8 a 14 μm ; materiales retroreflectivos, los cuales presentan una reflectancia de tipo retroreflectiva principalmente en el espectro visible; los materiales termocrómicos, los cuales presentan distintos colores en función de la temperatura del ambiente, los materiales de cambio de fase, los cuales retienen o liberan calor al cambiar de un estado a otro, principalmente de sólido a líquido; y finalmente los materiales que se caracterizan por una cualidad óptica conocida como fluorescencia.

Figura 3

Estrategias de mitigación más relevantes en el estudio de la ICU



En lo que respecta al estudio de los materiales fríos, investigadores como F. Rosso (2017) han analizado el efecto de recubrimientos altamente reflectivos en el espectro infrarrojo (colores fríos) aplicados en muros exteriores, obteniendo una temperatura superficial de 8 °C por debajo de la temperatura del ambiente; sin embargo, los materiales propiamente reflectivos, capaces de enfriar de manera pasiva las superficies urbanas presentan repercusiones en la demanda energética de calentamiento durante los periodos fríos, de ahí que la incorporación de materiales de comportamiento dinámico, como es el caso de los materiales termocrómicos puede potencialmente contribuir a la mejora del confort térmico durante los meses fríos, sin embargo

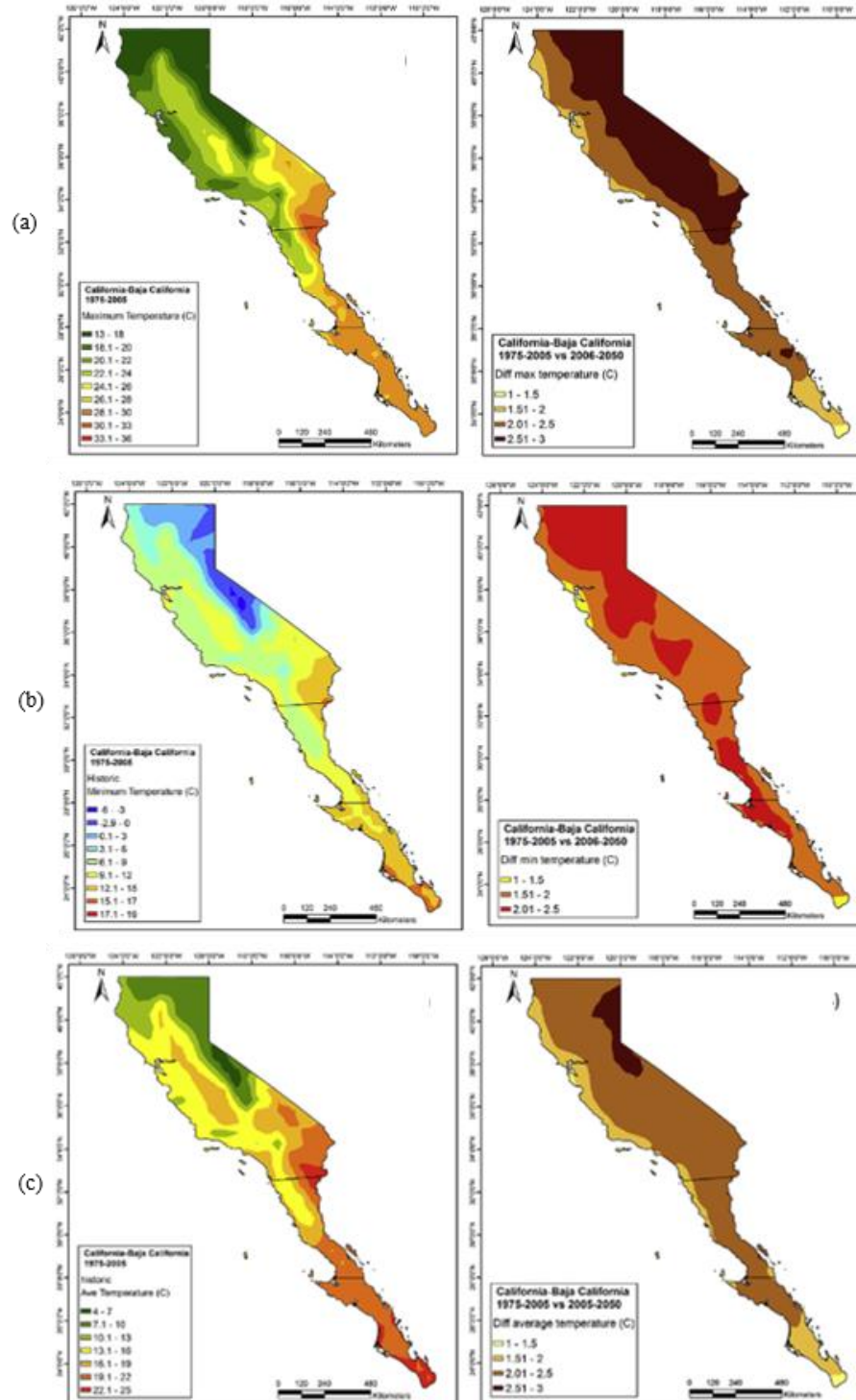
de acuerdo con Garshasbi y Santamouris (2019) este tipo de materiales tiende a decrecer su desempeño después de periodos prolongados de exposición a la radiación ultravioleta. Sumado a lo anterior, los materiales termocrómicos también presentan el reto de caracterizar sus propiedades ópticas en distintos intervalos de temperatura, lo cual se vuelve un proceso complejo ya que actualmente los instrumentos utilizados para su caracterización no permiten la modulación de la temperatura.

La presente investigación toma lugar en la ciudad de Ensenada, B.C. México, una ciudad costera caracterizada por un clima tipo semiárido templado-frío (BSk) de acuerdo a la clasificación climática Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006) y una población de 443,807 habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020). De acuerdo con un análisis prospectivo realizado por Vaghefi y otros (2017), se estima que para el periodo 2006-2050 se presentará un incremento importante de la temperatura en la península de Baja California, señalando un aumento en la temperatura máxima de 1 a 3 °C (véase Figura 4a), un aumento en la temperatura mínima de 1 a 2.5 °C (véase Figura 4b) y un aumento de 1 a 2.5°C en la temperatura promedio (véase Figura 4c). Dicho lo anterior, la ciudad de Ensenada requiere de estrategias de mitigación ante eventos de calor atípicos que desafíen su infraestructura eléctrica pero que favorezcan a los periodos semifríos característicos de la ciudad.

Como conclusión a las problemáticas y posibles soluciones planteadas en esta sección, existe actualmente un área de oportunidad significativa para la fabricación y caracterización de los materiales termocrómicos, por lo que ante los desafíos actuales y futuros del sobrecalentamiento urbano, en esta investigación se tiene como propósito diseñar un material frío con base al alto potencial de enfriamiento de los materiales de colores claros/fríos, así como también se propone incorporar en el diseño la capacidad de respuesta térmica de los materiales termocrómicos. Como parte de los objetivos de este estudio se encuentra también la propuesta de un método de caracterización óptica que permita el análisis del material en distintos intervalos de temperatura superficial.

Figura 4

Distribución espacial de la temperatura para los estados de California, Baja California, y Baja California Sur



Nota: a) temperatura máxima b) temperatura mínima, c) temperatura promedio.

1.3. Justificación y motivación

Hoy en día el aumento de la temperatura de las áreas urbanas puede llegar a alcanzar hasta 10 °C (Santamouris, 2020), teniendo un impacto severo sobre la calidad del ambiente, el consumo de energía y la salud humana. Análisis previos han evaluado el impacto de la ICU sobre los aspectos antes mencionados, de acuerdo con la agencia internacional de la energía (IEA⁴), en el año 2019 el gasto de energía de los edificios contabilizó 130 EJ, siendo el sector con el mayor consumo total final de energía y el responsable del 35 % del consumo global así como también del 38 % de las emisiones de CO₂ relacionadas a la energía (Agencia Internacional de Energía [por sus siglas en inglés IEA], 2020).

En lo que respecta al impacto sobre la salud, hoy en día más de 200 millones de personas habitan en ciudades expuestas a altas temperaturas de manera regular, con máximas promedio de 35 °C por temporadas de por lo menos tres meses, de acuerdo estudios predictivos, este número aumentara a 1.6 billones para el 2050; similarmente, en la actualidad el número de personas que habitan en ciudades expuestas a temperaturas máximas de 35 °C y en condiciones de pobreza es mayor de 26 millones de personas, con una tendencia de crecimiento de casi 215 millones para el año 2050 (C40 Cities y UCCRN, 2018).

El impacto a salud es uno de los riesgos más preocupantes con respecto al sobrecalentamiento, por lo que diversos organismos han iniciado el desarrollo de mecanismos para su análisis, por ejemplo, Estados Unidos comenzó el registro de muertes asociadas a eventos de calor (EPA, 2022a). Asimismo el estado de Nueva York diseño un índice de vulnerabilidad al calor, conocido por sus siglas en inglés HVI⁵ para correlacionar determinados factores socioeconómicos al riesgo de exposición (Nayak et al., 2018). En México, el registro nominal de los daños a la salud por temperaturas naturales extremas inicio en el año 2012 por parte de la Secretaría de Salud (SSA), quienes han identificado la relación entre las altas temperaturas y el riesgo de sufrir de padecimientos como golpes de calor e incluso la muerte.

Otro aspecto sumamente relevante en el fenómeno de la ICU es el crecimiento poblacional de las ciudades, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para el año 2030 existirán un total de 43 megaciudades en el mundo, con una población de al menos 1 billón de habitantes (Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones

⁴ International Energy Agency

⁵ Heat Vulnerability Index

Unidas [por sus siglas en inglés UNDESA], 2018). Lo antes descrito ejemplifica la importancia del desarrollo de proyectos de investigación enfocados a la mitigación de la ICU, que atiendan las necesidades actuales y futuras de la población.

A manera de contextualización, hoy en día existen instituciones internacionales que promueven la incorporación de estrategias para la disminución del sobrecalentamiento de las ciudades, el Consejo Americano para la economía de la eficiencia energética (ACEEE⁶) ha propuesto lineamientos para la mitigación de las islas de calor, como es el caso de la implementación de techos fríos y techos verdes, así como el uso de materiales de colores claros en los pavimentos y la reincorporación de vegetación en las áreas urbanas (Hewitt et al., 2014). En adición, se han constituido organizaciones como la alianza global de ciudades frías (GCCA⁷), el consejo europeo de techos fríos (ECRC⁸) y el consejo de calificación de techos frío ampliamente conocido como CRRC⁹, demostrando la pertinencia de esta temática para la generación de mejores materiales constructivos. Dicho lo anterior, la presente investigación se fundamenta primeramente en la necesidad de incorporar materiales que promuevan el enfriamiento pasivo de los edificios, enfocándose en los materiales de colores claros/fríos y los materiales termocrómicos.

Dado el carácter innovador del material propuesto, así como el método de caracterización implementado, se espera que los resultados obtenidos contribuyan a dar respuesta a las preguntas de investigación aun no resueltas en esta temática y al desarrollo de mayores técnicas para el análisis de materiales de comportamiento dinámico. Asimismo, se espera que los resultados del presente estudio contribuyan también en la identificación de posibles rutas de mejora en la fabricación de materiales termocrómicos, para que estos puedan ser incorporados en la industria de la construcción ayudando a solventar la problemática del clima actual, así como a prevenir los futuros escenarios del cambio climático, promoviendo el uso asequible de la energía y la salud y bienestar de la población acorde a los objetivos trazados en la agenda 2030 para el desarrollo sostenible.

⁶ American Council for an Energy-Efficient Economy

⁷ Global Cool Cities Alliance

⁸ European Cool Roof Council

⁹ Cool Roof Council

1.4. Antecedentes

1.4.1. Estudios precursores de la isla de calor urbano

Las primeras observaciones respecto al incremento de la temperatura en las zonas urbanas se atribuyen a Luke Howard, un farmacéutico inglés quien en el año 1818 publica por primera vez *The climate of London* en donde se describen los resultados del análisis del clima de la ciudad en el periodo 1806-1816; posteriormente una segunda edición de esta publicación con un contenido más extenso sería publicada en el año 1833. En este documento se describe un incremento de la temperatura de la ciudad de Londres de 1.579 °F, respecto a mediciones tomadas en las comunidades suburbanas de Plaistow y Tottenham Green; De acuerdo con Howard, el motivo del incremento de la temperatura se debía a la presencia de lo que él denominó calor artificial, derivado de las estructuras que componen la ciudad y la población abarrotada (Mills, 2006). Si bien durante el siglo XIX ya se tenía conocimiento respecto al aumento de la temperatura ambiental en las ciudades, este fenómeno fue identificado bajo el término Isla de calor urbano hasta mediados del siglo XX por Gordon Manley (1958) quien en ese momento se encontraba analizando alteraciones en los patrones de nieve entre áreas urbanas y áreas rurales (Adamowski y Prokoph, 2013). En el progreso histórico del estudio de la ICU también destacan Duckworth y Sandberg (1954) quienes analizaron las características de los gradientes urbanos respecto al tamaño de las ciudades y parámetros meteorológicos (Duckworth y Sandberg, 1954) así como también H.E. Landsberg (1981) quien analizó las diferencias entre áreas urbanas y rurales respecto a los niveles de radiación solar (Landsberg, 1981).

1.4.2. Clasificación de zonas climáticas locales

A partir de lo previamente descrito se observa como los primeros estudios enfocados al fenómeno de la ICU consideraban dos puntos de referencia para evaluar la diferencia de temperatura: el área urbana y el área rural, enfoque que habría de cambiar en el año 2012 cuando los investigadores T.R. Oke e I.D. Stewart propusieron analizar las zonas urbanas desde sus diversas características físicas y climáticas, evidenciando como la concepción del entorno urbano desde una perspectiva general provoca cierto nivel de incertidumbre sobre lo “real” de dichos análisis; a partir de esta conclusión se desarrolló un sistema de clasificación climática llamado *Local climate zones*, conocido internacionalmente por sus siglas LCZ. Este sistema establece que dentro de la misma ciudad pueden coexistir distintas condiciones climáticas en función de las características del entorno construido (tipología, densidad, altura, distribución de

los edificios) y el entorno natural (el tipo de vegetación, su densidad, superficie del suelo y cuerpos de agua), el sistema de clasificación LCZ es hoy día uno de los más utilizados para el análisis del fenómeno de la ICU.

1.4.3. Progreso histórico en el estudio de los materiales fríos.

El principio de enfriamiento pasivo de un material frío se basa en la alta reflectancia de las superficies, asociada principalmente a aquellas tonalidades claras, dicho lo anterior el potencial para decrecer el sobrecalentamiento urbano de las superficies blancas o de colores cercanos comenzó a explorarse durante la última década del siglo XX; Akbari y Taha (1991) evaluaron mediante la simulación de escenarios el efecto del incremento del albedo (mayor en un 20 %) sobre el consumo energético de enfriamiento y calentamiento en zonas residenciales bajo las condiciones climáticas de las ciudades de Toronto, Vancouver, Edmonton y Montreal, obteniendo resultados favorables en los que se promovió el ahorro de energía de enfriamiento en un rango de 10 a 35 % (dependiendo de la ciudad), así como el ahorro de la energía por calentamiento en un 10 %. El siguiente estudio relevante en el tema fue publicado en el año 1997 por H. Taha y otros autores, quienes analizaron mediante un estudio de simulación el efecto del albedo y la vegetación a gran escala sobre distintas variables meteorológicas y la calidad del aire en relación al ozono, de acuerdo con los resultados del análisis de simulación, la temperatura del aire fue la variable más afectada por el incremento del albedo, con una reducción de hasta 2 °C, de igual manera se determinó también que como consecuencia a la reducción de la temperatura, la calidad de aire presentó una mejora debido a una menor cantidad de emisiones de hidrocarburos biogénicos (Taha et al., 1997).

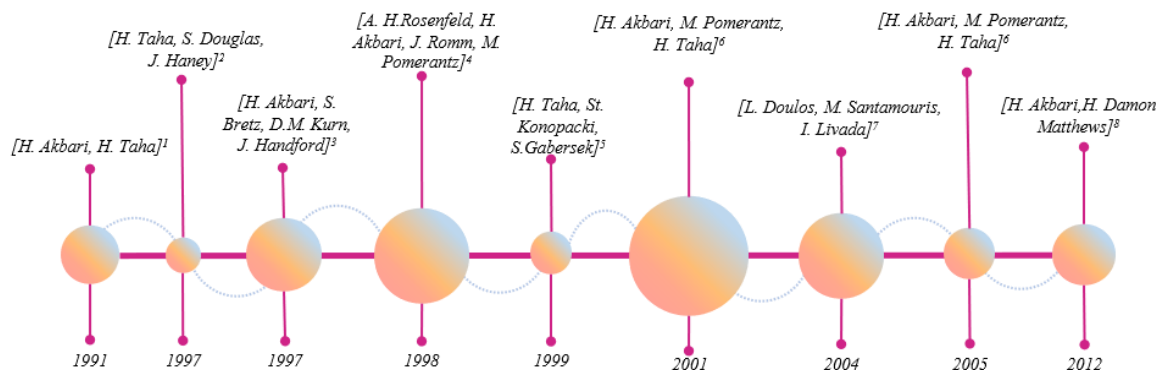
En 1997 fue también publicado un estudio titulado *Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs*, en el cual se observó el efecto de recubrimientos de alto albedo aplicados en condiciones reales sobre edificios escolares en la ciudad de Sacramento, California, registrando una reducción de 3.1 kW/d (35 % con respecto al caso base) así como también una reducción de 0.6 kW para la demanda pico, lo anterior para la temporada de verano (Akbari et al., 1997). En el año 1998, Rosenfeld y otros autores estimaron el ahorro energético directo e indirecto al intercambiar el color de las cubiertas de un tono oscuro a uno claro, esta investigación tomo lugar en la ciudad de los Ángeles; las cubiertas frías en conjunto con la vegetación urbana resultaron en la reducción del 12 % del ozono en el ambiente y la reducción del 10 % del uso de sistemas de aire acondicionado (Rosenfeld et al., 1998).

En el año 2001 se publicó el estudio con mayor número de citas en lo que respecta a los antecedentes de este tema, realizado por Akbari y otros, este se realizó con el propósito de correlacionar el efecto de las cubiertas frías al consumo de energía y la concentración de esmog, estimando que alrededor del 20 % de la demanda de enfriamiento nacional para Estados Unidos puede reducirse a partir de estas estrategias de mitigación (Akbari et al., 2001). Otra investigación relevante realizada a principios del siglo XXI fue publicada por Doulos y otros autores, quienes analizaron mediante estudios de campo el desempeño térmico de 47 materiales comúnmente utilizados en la construcción de espacios exteriores, tomando en consideración variables tales como el tipo de material, la textura, el espesor, dimensiones y el color; como principales hallazgos, esta investigación determinó una correlación entre el balance térmico del material y sus valores de reflectancia y emitancia térmica, de igual modo se corroboró que la reflectancia de los materiales se ve influenciada por las características físicas del material, siendo los materiales rugosos y oscuros lo que absorben el mayor porcentaje de radiación solar (Doulos et al., 2004).

En la Figura 5 se muestra la línea de tiempo de las publicaciones más relevantes en lo que antecede a la temática de materiales fríos, dichas publicaciones fueron identificadas a través de la herramienta *Connected Papers* y seleccionadas en función del número de citas.

Figura 5

Precursores en el estudio de los materiales fríos



1.5. Contextualización del objeto de estudio

El conjunto de estructuras que conforman las ciudades (edificios, carreteras y otras infraestructuras) absorben y emiten de vuelta el calor del sol en una mayor medida que los paisajes naturales; cuando la concentración de estas estructuras es alta y la presencia de vegetación es limitada estas zonas urbanas se convierten en “islas” de mayor temperatura con respecto a las zonas rurales (EPA, 2022c). Como contextualización, la ICU es un tema relevante en la actualidad debido una serie de problemáticas derivadas: el consumo de energía, la morbilidad y mortalidad, y la pobreza energética.

Dentro del panorama del cambio climático, el clima excesivamente cálido ocasiona impactos adversos sobre la morbilidad y mortalidad relacionada con el calor, convirtiéndose en un problema de salud pública cada vez más relevante (Morais et al., 2021); de acuerdo con la organización mundial de la salud, los rápidos aumentos de las ganancias de calor en el cuerpo humano comprometen la capacidad del organismo para regular la temperatura corporal, provocando afectaciones tales como calambres de calor, agotamiento por calor, insolación e hipertermia además de agravar ciertas enfermedades subyacentes (Organización Mundial de la Salud [por sus siglas en inglés WHO], 2004). El incremento de la temperatura de las ciudades afecta de distinta forma el bienestar de sus habitantes, siendo los grupos vulnerables los que sufren de una mayor exposición, estos grupos se definen por un conjunto de factores socioeconómicos y ambientales, los cuales se miden a partir del índice HVI.

Asimismo el sobrecalentamiento urbano aumenta el consumo de energía requerido para satisfacer los requerimientos energéticos de enfriamiento (Santamouris y Vasilakopoulou, 2021), el incremento del consumo de energía consecuentemente conlleva a una mayor demanda de dicho servicio, sin embargo no toda la población tiene acceso a servicios energéticos, por lo que estas limitaciones ocasionan la pobreza energética, una problemática compleja que aborda aspectos socioeconómicos de la población así como las características de los edificios, sobre todo aquellas que influyen en su eficiencia energética (Poverty y Hub, 2022).

La ICU afecta principalmente a las ciudades debido al conjunto de estructuras que convergen en ella y que promueven la alta absorbancia de radiación solar, esto sumado a las dinámicas de expansión urbana, reiteran la necesidad de incorporar nuevos materiales como es el caso de los materiales fríos, los cuales se definen por sus propiedades ópticas: reflectancia

solar y emitancia térmica. Cuando la radiación solar incide sobre las superficies urbanas una parte de esta puede ser reflejada, absorbida o transmitida, entre mayor sea el porcentaje de la radiación reflejada menor será la temperatura de la superficie que la refleja. En adición, el porcentaje de radiación absorbido por el material deberá ser emitido de vuelta al espacio exterior, por lo que un alto valor de emitancia térmica contribuye también en disminuir la temperatura superficial. A manera de síntesis, el objeto de estudio de la presente investigación son las propiedades ópticas de los materiales, debido a su influencia sobre la temperatura de las superficies urbanas, estas propiedades son la reflectancia solar y la emitancia térmica, ambas consideradas como las principales características de los materiales fríos.

Dentro del contexto de la investigación de estos materiales existe una especial atención a los componentes que los conforman, ya que estos determinan de manera se clasifican dichos materiales. Primeramente los materiales de colores claros son aquellos que emplean compuestos naturales y artificiales de tonalidad blanca; los materiales de colores fríos recurren a pigmentos reflectivos en el espectro IR, nanomateriales y microesferas de vidrio; los materiales de enfriamiento radiante diurno pueden consistir en estructuras fotónicas multicapa, metamateriales de estructura fotónica 2D-3D, pigmentos IR, nanomateriales y compuestos derivados de polímeros; los materiales retroreflectivos se elaboran a partir de esferas de vidrio, esferas de bario o por medio de láminas de estructura de prisma; los materiales termocrómicos pueden estar hechos a base de colorantes o compuestos no colorantes, así como también pueden contener compuestos reflectivos en los espectros VIS y NIR; los materiales de cambio de fase pueden ser fabricados mediante componentes orgánicos, inorgánicos, eutécticos, y mejorados con compuestos reflectivos (Vis/NIR); finalmente, los materiales fluorescentes consisten en compuestos de bulto o nanomateriales. Lo anterior se presenta a manera de resumen en la Figura 6.

Figura 6

Clasificación de materiales fríos y subcategorías respecto a los componentes utilizados



1.6. Pregunta de investigación e hipótesis

Con base a lo antes descrito, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿De qué manera puede un recubrimiento termocrómico elaborado a partir de una estructura multicapa, contribuir en la mitigación del efecto de la ICU a microescala durante los periodos cálidos extremos sin afectar negativamente a los periodos fríos?

Como respuesta a la pregunta previamente descrita, se propone la siguiente hipótesis de investigación:

La incorporación de un recubrimiento termocrómico multicapa, constituido por una primera capa de un material altamente reflectivo en los espectros VIS y NIR, una segunda capa de un material termocrómico y una tercera capa de un material altamente absorbente el espectro UV-A, permitirá la modulación de la reflectancia difusa y la emitancia térmica con respecto de la temperatura del ambiente, contribuyendo en la mitigación de la ICU a microescala durante los periodos cálidos extremos sin afectar negativamente a los periodos fríos.

1.7. Objetivos de investigación

1.7.1. Objetivo general

Como objetivo general, esta investigación se propone lo siguiente:

Diseñar y caracterizar un recubrimiento multicapa, considerando en el diseño las cualidades ópticas de los materiales altamente reflectivos en los espectros visible e infrarrojo, y la capacidad adaptativa al ambiente térmico de los materiales termocrómicos.

1.7.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos, se plantea lo siguiente:

- Diseñar una prueba de concepto (Proof of concept- PoC) de un recubrimiento frío tomando en consideración sus propiedades ópticas de reflectancia solar y emitancia térmica, así como las características térmicas del clima semiárido templado-frío (BSk).
- Fabricar muestras prototipo mediante la deposición de recubrimiento por centrifugado incorporando tres capas: Un recubrimiento altamente reflectivo (VIS/NIR), un recubrimiento termocrómico, y un recubrimiento altamente absorbente (UV-A).

- Configurar un arreglo experimental a partir de un sistema termoeléctrico que permita la regulación de la temperatura superficial de las muestras prototipo en distintos intervalos.
- Caracterizar la reflectancia de las muestras en los espectros UV-A, VIS y NIR, así como su emitancia térmica en el rango de la ventana atmosférica infrarroja de 8 a 14 μm .

1.8. Alcances y limitaciones

1.8.1. Alcance

El alcance de la presente investigación se centra en el diseño, fabricación y caracterización de un material termocrómico multicapa que aplicado en cubiertas arquitectónicas promueva la mitigación a la ICU a microescala.

1.8.2. Limitaciones

Las limitaciones presentadas en este estudio se relacionan en primer lugar con las restricciones tecnológicas relacionadas a la medición de la reflectancia y emitancia en distintos intervalos de temperatura; la medición de la reflectancia se realiza comúnmente mediante técnicas de espectrofotometría e instrumentos llamados espectrofotómetros, los cuales en su mayoría no permiten por sí mismos la modulación de la temperatura superficial, por lo que la medición de la reflectancia de las muestras desarrolladas en este estudio requirió de una adecuación de este método que hiciera posible la modulación de la temperatura en distintos intervalos, lo cual implicó un mayor recurso de tiempo.

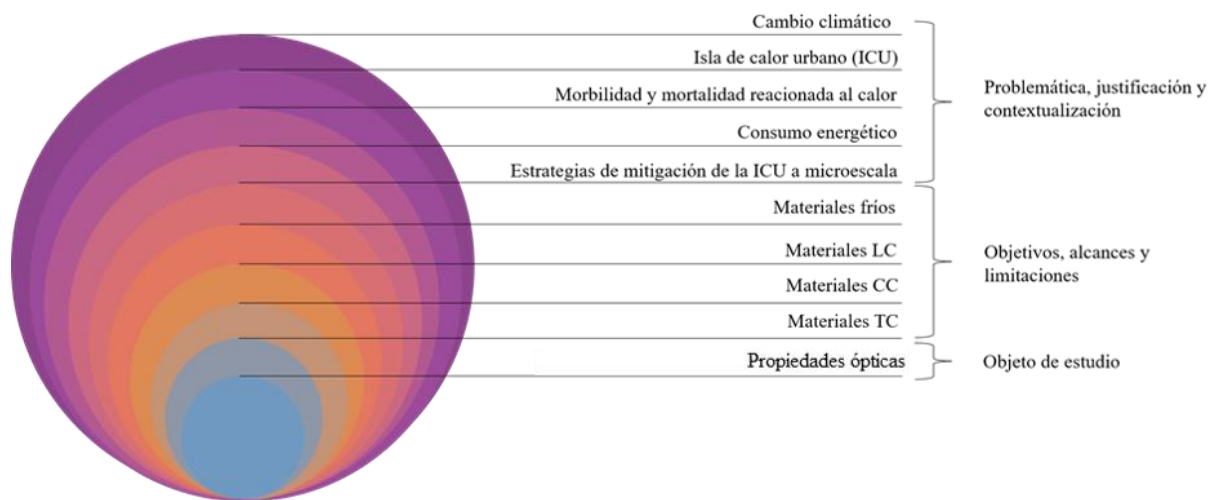
En segundo lugar, otra limitante importante para la investigación fue el rango espectral de la esfera de integración utilizada durante el análisis de espectrofotometría, la cual comprende un rango de 300 a 900 nm de los cuales únicamente fue posible analizar el rango de 360 a los 800 nm, debido a las características y el funcionamiento del instrumento, lo cual limitó el estudio de las muestras en lo que respecta al rango del espectro infrarrojo.

Como conclusión a las secciones previamente desarrolladas, en la Figura 7 se sintetiza a través de un diagrama de cebolla la contención del objeto de estudio con respecto al planteamiento del problema; de esta forma y bajo una perspectiva deductiva, la presente investigación se localiza dentro de una problemática general que es el cambio climático, de la

cual se tiene como propósito atender el fenómeno de la ICU y sus efectos sobre la morbilidad y mortalidad relacionada al calor y al consumo energético; este estudio está orientado hacia las estrategias de mitigación a microescala, como es el caso de los materiales fríos; de los distintos tipos de materiales fríos, se pretende evaluar aquellos altamente reflectivos en los espectros VIS e IR , así como también los materiales termocrómicos, por lo anterior es sumamente relevante para esta investigación evaluar las propiedades ópticas de este tipo de materiales, y son por lo tanto su objeto de estudio.

Figura 7

Perspectiva deductiva del objeto de estudio en relación con el planteamiento del problema



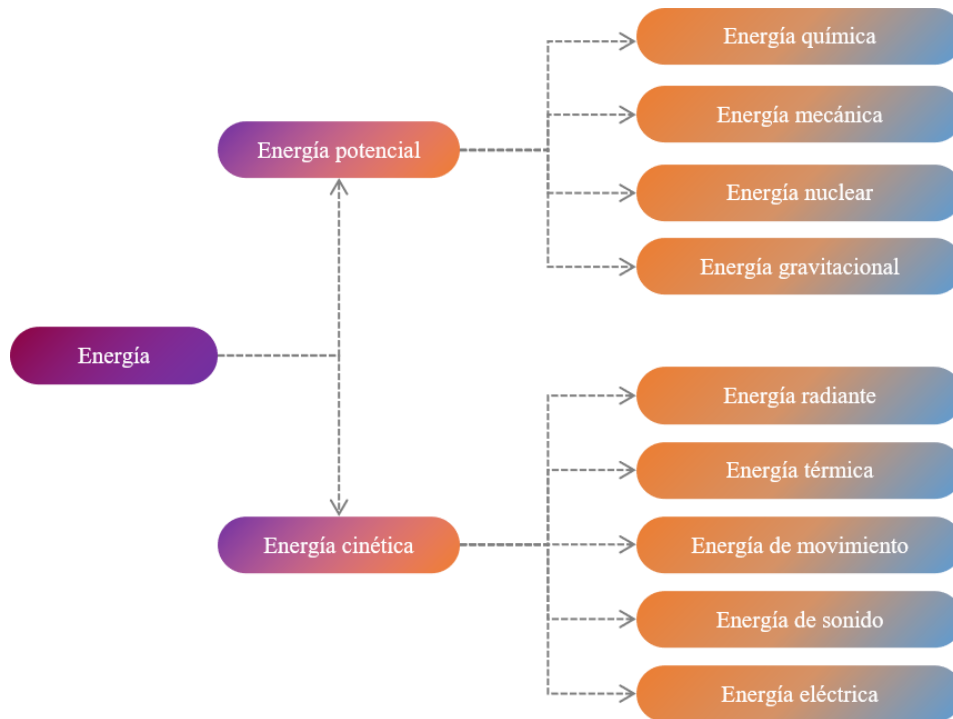
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

2.1. Marco Conceptual

Durante la revisión del estado del arte se identificaron los conceptos fundamentales para el desarrollo de la investigación, tales conceptos hacen referencia a la energía. La ciencia que se encarga del estudio de la energía, sus formas y sus transformaciones se conoce como termodinámica, de acuerdo con la comunidad científica, la energía se define como la habilidad de realizar un trabajo (Boles et al., 2019) y se manifiesta de diversas formas las cuales se clasifican en dos grandes grupos: energía potencial y energía cinética. La energía potencial se refiere a la energía almacenada por un cuerpo y depende de su posición con respecto a otros cuerpos, en este grupo se encuentran la energía química, mecánica, nuclear y gravitacional. En cambio, la energía cinética es aquella que se da por el movimiento de ondas, electrones, átomos, moléculas u objetos, en este grupo se encuentran la energía radiante, la energía térmica, la energía de movimiento, el sonido y la energía eléctrica (EIA, 2021), esto se ilustra en la Figura 8. Dicho lo anterior, el marco conceptual del presente estudio se focaliza en dos tipos de energía: *Energía térmica y energía radiante.*

Figura 8

Tipos de energía



Nota. Elaborada a partir de EIA, 2021.

2.1.1. Energía térmica

La energía térmica, también conocida como calor se debe al movimiento aleatorio de átomos y moléculas, en la medida que incrementa la velocidad de dichos movimientos, incrementa también el calor generado (EIA, 2021). La energía térmica se transfiere de un material a otro cuando se presenta una diferencia de temperatura entre ambos materiales o bien entre distintas partes del material, esta transferencia se da a partir de los mecanismos de transferencia de calor y en función de determinadas propiedades térmicas y físicas de la materia (Boles et al., 2019).

2.1.2. Propiedades térmicas de los materiales

Las propiedades térmicas son aquellas que definen la capacidad de los materiales de transmitir el flujo de calor o bien, acumularlo; las principales propiedades son la conductividad térmica, el calor específico y la densidad, asimismo existen otras capacidades del material como la conductancia y la resistencia térmica, las cuales dependen del coeficiente de conductividad y la superficie del material (Lira, 2018). En la Tabla 1 se describen las principales propiedades térmicas y físicas de los materiales.

Tabla 1

Propiedades térmicas y físicas de los materiales

Propiedad	Simbología	Unidad ¹	Definición
Conductividad térmica	λ	W/(m·K)	Propiedad física que define la magnitud del flujo de calor entre la superficie de un cuerpo material con un espesor de 1 metro cuando hay una diferencia de un grado (1 °C, 1 K o 1 °F) entre las dos caras del material
Conductancia térmica	C	W/(m ² ·K)	Capacidad de conducción del flujo de calor de un material en función de su coeficiente de conductividad (λ) y superficie (m ²)
Resistencia térmica	R	(K·m ² /W)	Capacidad de resistencia al flujo de calor de un material en función de su coeficiente de conductividad (λ) y superficie (m ²)
Calor específico	c	(J/kg·K)	Propiedad física que mide la cantidad de energía térmica que una unidad de masa requiere para elevar un grado su temperatura

Nota. ¹ Las unidades corresponden al Sistema Internacional de Unidades

Elaborada a partir de Lira, 2018.

2.1.3. *Mecanismos de transferencia de calor*

El calor se transmite desde las zonas de mayor temperatura hacia las zonas de menor temperatura hasta alcanzar el estado de equilibrio térmico (Domingo, 2011), esta transmisión de calor se da mediante los mecanismos de transferencia de calor: *conducción, convección, radiación y cambio de fase.*

- **Conducción:** Transferencia de calor por contacto directo entre cuerpos o distintas partes de un mismo cuerpo, puede darse en superficies transparentes, semitransparentes y opacas. La cantidad propagada de calor depende de las propiedades térmicas del material, su superficie y volumen (Lira, 2018).

- **Convección:** Transferencia de calor dado por el movimiento físico de moléculas a distinta temperatura, generalmente la convección se da en fluidos (gases y líquidos) (Domingo, 2011). En este caso la cantidad de calor que se transfiere depende de la densidad del fluido y el área de las aperturas (Lira, 2018).

- **Radiación:** Transferencia de calor en forma de radiación electromagnética, la radiación electromagnética es emitida por todos los cuerpos a una temperatura T, aunque la fuente principal generalmente es el sol (Domingo, 2011). La radiación electromagnética se transfiere a través de superficies transparentes y semitransparentes; en este tipo de mecanismo de transferencia, la cantidad de calor transferido depende de las propiedades ópticas del material, así como la geometría y superficie tanto del material como de sus aberturas (Lira, 2018).

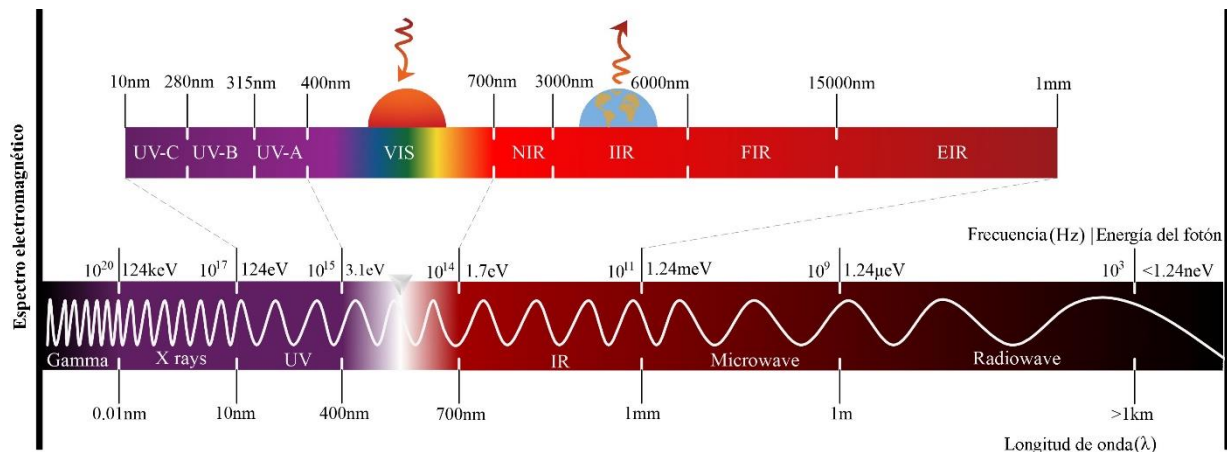
- **Cambio de fase:** el cambio de fase de un material se refiere al paso de un estado de agregación a otro; puede darse como fusión (sólido a líquido), solidificación (líquido a sólido), vaporización (líquido a gas), condensación (gas a líquido) y sublimación (sólido a gas) (Peréz, 2017). La transferencia de calor por cambio de fase se da cuando al momento de darse el cambio de fase se libera calor latente, el cual se transfiere a otro cuerpo o material (Lira, 2018).

2.1.4. Energía radiante

La energía radiante es la energía que poseen las ondas electromagnéticas, esta se distingue de otros tipos de energía por no requerir de un soporte material para su propagación en el vacío, sino de una partícula de luz denominada fotón. Un fotón es un cuanto de la radiación electromagnética caracterizado por su frecuencia, entendiéndose por frecuencia al número de crestas que pasan por un punto en un segundo (CESAR, 2017). La radiación electromagnética (EM) se compone por una amplia variedad de longitudes de onda y frecuencias, su representación gráfica se conoce como espectro electromagnético, constituido por ondas de radio (10000 km-1 m), microondas (1 m-1 mm), infrarrojo (1 mm-700 nm), visible (700 nm-400 nm), ultravioleta (400 nm-10 nm), rayos x (10 nm-0.01 nm), y rayos gama (<0.01 nm), lo anterior se ilustra en la Figura 9.

Figura 9

Espectro de la radiación electromagnética



Nota. En el gráfico se presentan los rangos del espectro electromagnético. Elaborada a partir de Butcher, 2016; Hecht, 2017; Mikla et al., 2012.

La longitud de onda puede también ser descrita en términos energéticos, ya que en la medida que la longitud de onda se acorta aumenta su energía; la energía de una onda electromagnética recibe el nombre de energía del fotón, expresada en la unidad de medida electronvoltio (eV). La energía del fotón es la energía transportada por un único fotón con cierta longitud de onda y cierta frecuencia electromagnética, una mayor frecuencia electromagnética implica una mayor energía del fotón y una mayor longitud de onda implica una menor energía del fotón. En la Tabla 2 se describen los distintos rangos del espectro electromagnético, su longitud de onda, frecuencia y energía.

Tabla 2

Longitud de onda, frecuencia y energía del fotón del espectro electromagnético

Nombre del rango espectral	Longitud de onda	Frecuencia (Hz)	Energía del fotón
Rayos gama	<0.01 nm	$>10^{20}$	<124 keV
Rayos x	0.01 nm-10 nm	10^{20} - 10^{17}	124 keV-124 eV
Ultravioleta	10 nm-400 nm	10^{17} - 10^{15}	124 eV-3.1 eV
Visible	400 nm-700 nm	10^{15} - 10^{14}	3.1 eV-1.7 eV
Infrarojo	700 nm-1 mm	10^{14} - 10^{11}	1.7 eV-1.24 μ eV
Microondas	1 mm-1 m	10^{11} - 10^9	1.24 μ eV-1.24 neV
Ondas de radio	1 m-10,000 km	$<10^9$	>1.24 neV

Nota. Elaborada a partir de la herramienta *Photon Energy Calculator* y lo establecido por de Butcher, 2016; Hecht, 2017.

2.1.5. Radiación visible

La fracción de la radiación electromagnética capaz de ser percibida por el ojo humano se encuentra en un rango de 400 nm (violeta) y 700 nm (rojo) en el espectro electromagnético y es conocida como luz visible (VIS). Toda la radiación electromagnética se considera como luz, sin embargo, el ser humano únicamente percibe longitudes de onda dentro del espectro visible debido a la forma de cono del ojo, el cual actúa como receptor; otras porciones del espectro tienen longitudes de onda demasiado grandes o demasiado pequeñas y energéticas para las limitaciones biológicas de la percepción humana (Butcher, 2016).

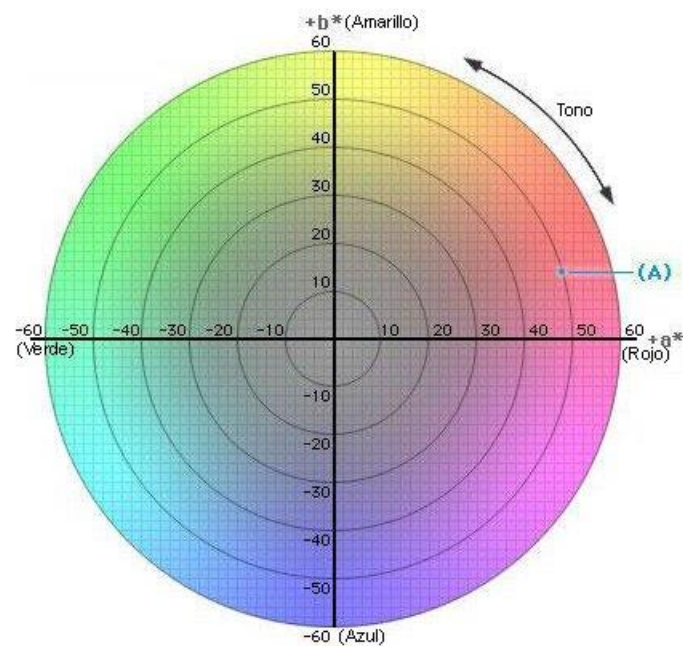
La luz blanca se compone de un conjunto de luces de distintos colores, los cuales difieren entre sí debido a su longitud de onda y su frecuencia. Los colores que conforman la luz blanca se vuelven visibles cuando esta atraviesa un medio transparente, fenómenos conocidos como dispersión y refracción. Cuando un cuerpo opaco es iluminado por luz blanca, este refleja un color o bien una mezcla de colores, mientras que a su vez absorbe el resto, las radiaciones luminosas reflejadas determinan el color con que nuestros ojos ven el objeto (Cengel et al., 2011).

Los colores pueden caracterizarse mediante técnicas de colorimetría a partir de espacios de color, un espacio de color se refiere a un método utilizado para expresar el color de un objeto objetivamente mediante una anotación numérica, la organización líder en la ciencia de la luz y

el color es la comisión internacional de la iluminación (CIE¹⁰), la cual se encarga de definir los espacios de color, tales como CIE XYZ, CIE L*C*h, y CIE L*a*b*, siendo este último uno de los más populares. El espacio de color L*a*b* fue modelado en base a una teoría de color oponente que establece que dos colores no pueden ser rojo y verde al mismo tiempo o amarillo y azul al mismo tiempo. Cuando un color se expresa en CIE L*a*b*, la L* define la luminosidad, a*denota el valor cromático rojo/verde y b* el valor cromático amarillo/azul. En la Figura 10 se muestra la gráfica de coordenadas del sistema CIE L*a*b* (Talens, 2017).

Figura 10

Espacio de color CIELAB, grafico de coordenadas



Nota. Tomado de Talens, 2017.

En este método la diferencia de color se define como una comparación numérica entre una muestra con el estándar y se determina mediante coordenadas absolutas de color, conocidas como Delta (Δ); Deltas por L* (ΔL^*), por a* (Δa^*) y por b* (Δb^*) pueden ser positivas (+) o

¹⁰ *Commission internationale de l'éclairage*

bien, pueden ser negativas (-). En cuanto a la diferencia total, llamada Delta E (ΔE^*), esta siempre es positiva. Lo anterior se expresa de la siguiente manera:

ΔL^* = diferencia en luz y oscuridad (+ = más luminoso, - = más oscuro)

Δa^* = diferencia en rojo y verde (+ = más rojo, - = más verde)

Δb^* = diferencia en amarillo y azul (+ = más amarillo, - = más azul)

ΔE^* = diferencia total de color

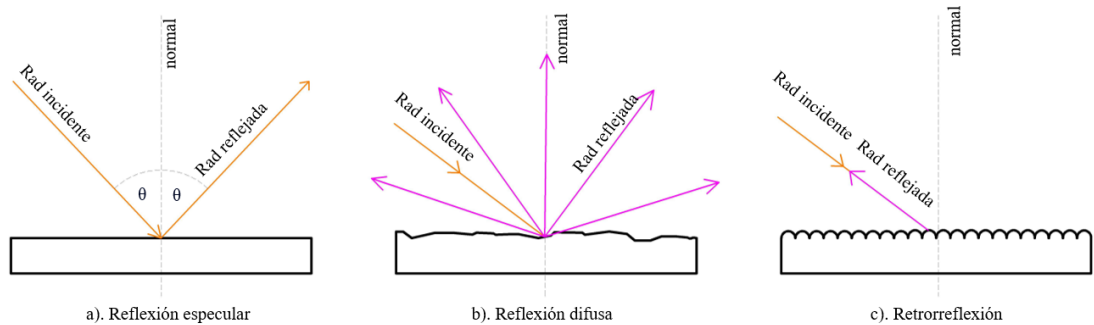
2.1.6. *Comportamiento de la luz*

Del latín *lux, lucis*, la luz es una onda electromagnética capaz de ser percibida por el ojo humano y que hace visible los objetos y sus colores (Real Academia Española [RAE], 2022). Las ondas de luz se comportan de manera similar a lo largo del espectro electromagnético, el comportamiento de la luz puede ser descrito mediante distintos tipos de interacciones (Allen et al. 2016). La disciplina que estudia la interacción de la radiación electromagnética y la materia es la espectroscopia y se basa en que la radiación incidente sobre la materia es distinta a la radiación saliente, es decir existe una diferencia energética a la cual se le conoce como energía de interacción o de absorción (Cortez, 2016). Los principales tipos de interacciones son la reflexión, la absorción, la refracción, la difracción y la dispersión.

Todo cuerpo opaco o transparente refleja una porción de la radiación que incide sobre él, esta propiedad de la materia se conoce como reflexión, y puede darse de dos formas, difusa o especular. Cuando una superficie posee una textura irregular la luz que incide sobre ella será reflejada de manera difusa, es decir en distintas direcciones, en cambio si la superficie del material es pulida, como la de un espejo, la luz será reflejada de manera especular, esto es, en una sola dirección (Cetto, 2019). Asimismo, la radiación o luz incidente puede ser también reflejada de forma retroreflectiva, una superficie retroreflectiva es aquella con la capacidad de reflejar la radiación en el sentido contrario de la fuente incidente (Levinson et al., 2020). En la Figura 11 se denotan los distintos tipos de reflexión.

Figura 11

Tipos de reflexión

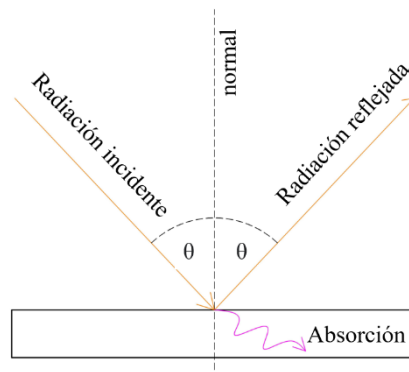


Nota. a) reflexión especular, b) reflexión difusa, c) retrorreflexión. Elaborada a partir de Cengel et al.; Levinson et al., 2020.

Así como una parte de la radiación incidente es reflejada, otra parte de esta es también absorbida por la materia, la absorción ocurre cuando los fotones de la luz incidente golpean átomos y moléculas haciéndolos vibrar, cuanto más se mueven más caliente se vuelve, este calor se emite desde el material en forma de energía térmica (Cengel et al., 2011). Dicho lo anterior, en la medida en que un cuerpo absorbe un mayor porcentaje de radiación mayor será su temperatura (véase Figura 12).

Figura 12

Absorción de la radiación electromagnética.



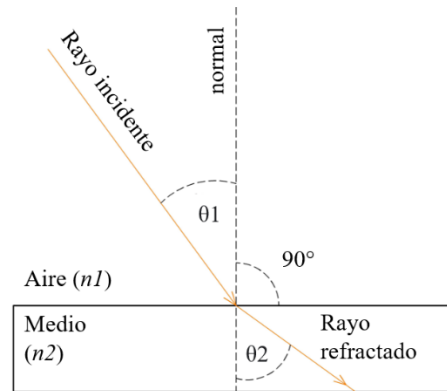
Nota. Elaborada a partir de Cengel et al., 2011.

La refracción se refiere al cambio de dirección que sufre una onda al pasar de un medio material a otro, ambos medios caracterizados por un parámetro denominado índice de refracción (n) (Cetto, 2019). El índice n de un material es un factor que influye en la reflectancia solar, de

acuerdo con la teoría de dispersión de Rayleigh a mayor índice de refracción mejor será la reflectancia solar (Miles et al., 2001), lo anterior se ejemplifica en la Figura 13.

Figura 13

Refracción de la radiación electromagnética

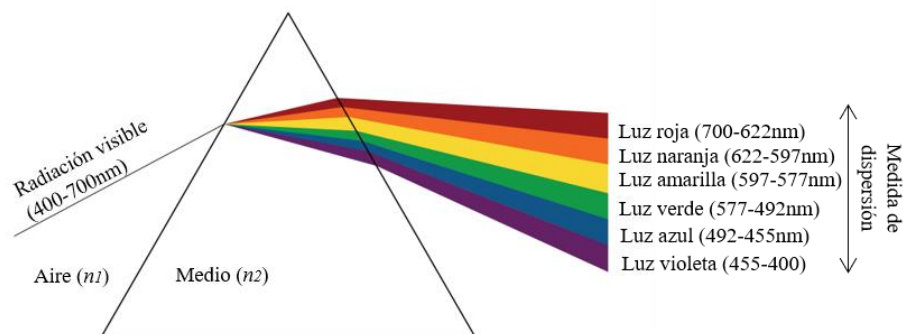


Nota. Elaborada a partir de Cetto, 2019.

Otro fenómeno de la luz que depende del índice n es la dispersión, conocida como la descomposición de una radiación compleja en diferentes radiaciones simples a consecuencia de la refracción (véase Figura 14). Un ejemplo claro de este fenómeno es la dispersión de la radiación visible al atravesar un prisma o la aparición de un arcoíris cuando la radiación proveniente del sol interactúa con gotas de agua suspendidas en la atmósfera (Cetto, 2019).

Figura 14

Dispersión del espectro visible de la radiación electromagnética

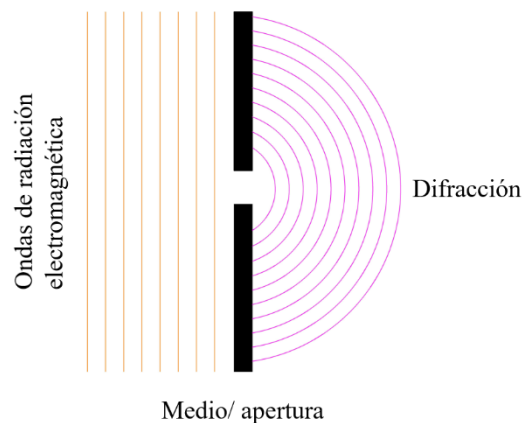


Nota. Elaborada a partir de Cetto, 2019.

Finalmente, la difracción es un fenómeno que se presenta cuando una onda electromagnética se ve distorsionada por un objeto, a diferencia de la refracción, las ondas no atraviesan el medio, sino que atraviesan pequeñas rendijas con una apertura igual o menor a la longitud de onda de la radiación o bien, si la apertura es mayor la radiación habrá de propagarse alrededor del objeto (Butcher, 2016), tal cual se ilustra en la Figura 15.

Figura 15

Difracción de ondas electromagnéticas



Nota. Elaborada a partir de Butcher, 2016.

Como se mencionó al inicio de esta sección, el espectro electromagnético se compone por una amplia gama de longitudes de onda, salvo por el espectro de radiación visible todos los espectros restantes son inaccesibles a la vista del ser humano. Los rangos espectrales de mayor relevancia para el desarrollo del presente tema de investigación además del espectro visible son el espectro ultravioleta y el espectro infrarrojo.

2.1.7. Radiación ultravioleta

Cerca del espectro de luz visible se encuentra el espectro ultravioleta, que comprende el rango de longitudes de onda de 10 nm a 400 nm, descubierto por Johann Wilhelm Ritter en el año 1801, la energía del fotón en este rango va desde 3.1 eV a 124 eV, por lo que este tipo de radiación es sumamente energética. La radiación UV se clasifica en UV-A (315 nm a 400 nm), UV-B (280 nm - 315 nm) y UV-C (10 nm-280 nm) (Butcher, 2016).

La radiación de tipo UV-A es la más cercana al espectro de radiación visible por lo que posee una menor energía en comparación con otros tipos de radiación UV, sin embargo, a pesar de contener una menor cantidad de energía la radiación UV-A es capaz de provocar el envejecimiento prematuro de la piel. Por su parte la radiación de tipo UV-B se conoce como la región intermedia del espectro UV responsable de provocar daño en los ojos, eritemas solares o quemaduras graves; la radiación UV-B es absorbida casi en su totalidad por la capa de ozono sin embargo la exposición en pequeñas dosis durante muchos años ocasiona el envejecimiento prematuro y cánceres cutáneos. Finalmente, la radiación de tipo UV-C se considera la más energética de las tres y por lo tanto la más dañina, esta es absorbida por la capa de ozono (Butcher, 2016).

Además del daño causado a organismos vivos la exposición a la radiación UV también ocasiona el deterioro de los materiales, afectando en su color y textura. Una manera de disminuir el efecto de la degradación UV es la incorporación de materiales con propiedades absorbentes en el espectro ultravioleta, estos pueden ser de dos tipos, absorbedores UV y los estabilizadores de luz de amina (HALS¹¹). Los absorbedores UV se utilizan para absorber la radiación UV evitando que esta dañe recubrimientos de pintura, plásticos u otros revestimientos (Afirm Group, 2021). Por su parte los HALS no absorben la radiación UV, sino que estos neutralizan los radicales libres a través de la formación de radicales de nitróxido, que posteriormente consumen especies de radicales dañinos en un proceso llamado ciclo de Denisov (Hodgson y Coote, 2010).

2.1.8. Radiación infrarroja

En el año 1665 Isaac Newton descubrió mediante uno de los experimentos más conocidos y referidos en la disciplina de la óptica que la luz blanca se descompone en siete colores: violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo, los cuales conforman el espectro de radiación visible (Freire, 2023).

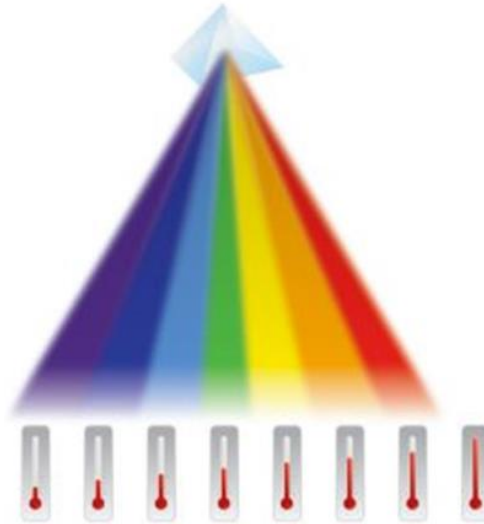
Mucho tiempo después, en el año 1800, el científico William Herschel llevó a cabo un experimento que consistió nuevamente en la descomposición de la luz solar por medio del fenómeno de la refracción, solo que en esta ocasión como parte del proceso experimental Herschel tomó la temperatura de los distintos colores, obteniendo como resultado una mayor

¹¹ *Hindered Amine Light Stabilizer*

temperatura en la zona situada más allá del rojo, (White, 2013). Lo anterior se ejemplifica en la Figura 16.

Figura 16

Esquema del experimento de Herschell



Nota. Tomada de Lira, 2017.

Herschel llamó a esta radiación energía calorífica, tiempo después recibió el nombre de radiación infrarroja (infra, significa más allá del rojo) (Cortez, 2016). El IR se subdivide en cuatro regiones: el IR cercano también conocido como NIR que va de 700 a 3000 nm, el IR intermedio (3000-6000 nm), el IR lejano (6000-15000 nm) y el IR extremo (15000 nm-1 mm), cabe mencionar que esta subdivisión es flexible en la literatura por lo que no existe una nomenclatura universal (Hecht, 2017). La energía IR se mide por medio de dispositivos como termopares o cámaras termográficas que responden al calor generado por la absorción del IR en una superficie ennegrecida (véase Figura 17). La interacción de la energía IR con la materia, se estudia por medio de la espectroscopia de infrarrojo mediante instrumentos denominados espectrofotómetros de infrarrojo y espectrofotómetros de transformadora de Fourier (FTIR) para el análisis del espectro infrarrojo lejano (Cortez, 2016).

Figura 17

Imagen radiométrica



Nota. Capturada mediante cámara termográfica FLIR C5.

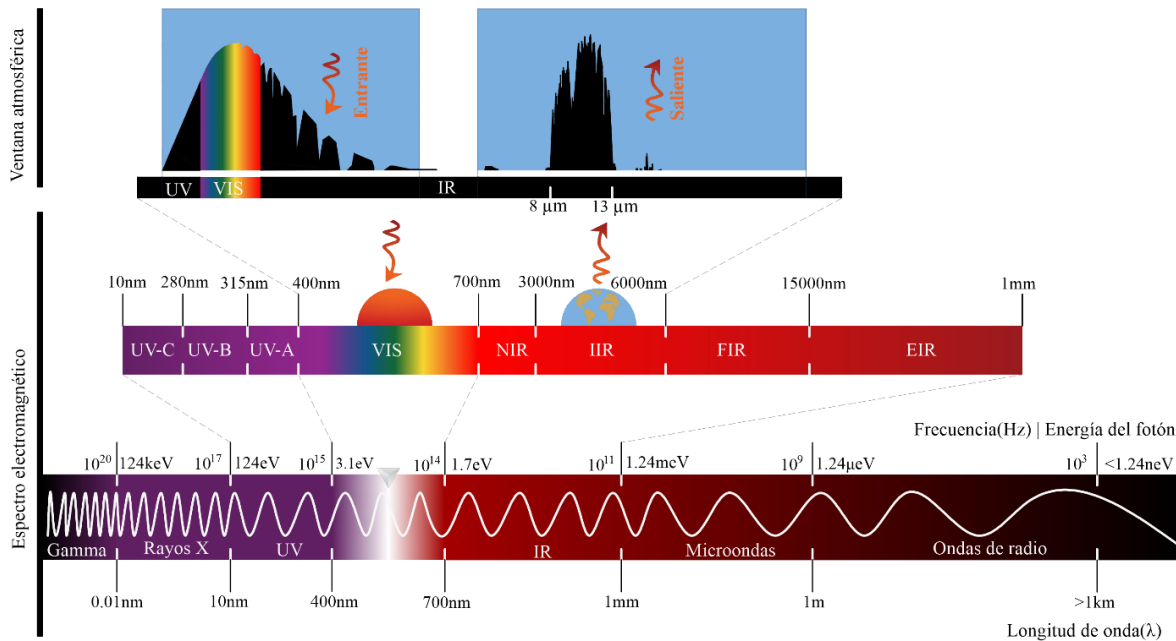
2.1.9. Ventana atmosférica

Para el planeta tierra la fuente principal de radiación electromagnética es el sol; este emana energía en distintas longitudes de onda a la atmósfera terrestre, sin embargo no todas las longitudes de onda de la radiación electromagnética llegan a la tierra, así como no todas las longitudes de onda emitidas por la tierra llegan de vuelta al espacio; la radiación electromagnética es reflejada o absorbida por distintitos gases presentes en la atmósfera como es el caso del vapor de agua, el dióxido de carbono y el ozono (Butcher, 2016).

Las zonas por donde se filtra la energía electromagnética que llega a la tierra se conocen como *ventanas atmosféricas* y se caracterizan por una alta transmisividad con respecto a otras regiones de la atmósfera. Los mayores picos de transmisividad de la atmósfera terrestre se encuentran en el espectro visible, el IR cercano y el IR intermedio (Garg, 2018), principalmente las investigaciones relacionadas a la incorporación de materiales fríos hacen uso de la ventana atmosférica localizada en el rango de 8 a 13 μm (véase Figura 18) para emitir de vuelta la radiación absorbida por los materiales (Li et al., 2020).

Figura 18

Relación del espectro electromagnético y la ventana atmosférica infrarroja



Nota. En la imagen se observan los rangos del espectro electromagnético y localización de la ventana atmosférica infrarroja. Elaborada a partir de Butcher, 2016; Hecht, 2017; Mikla et al., 2012; NOAA, 2023.

2.1.10. Propiedades ópticas de los materiales

La energía radiante fluye en forma de ondas electromagnéticas en cualquier medio con una dirección determinada (propagación rectilínea), esta se distingue de otros mecanismos de transferencia de calor por no depender de un medio material para su transmisión además de ser un mecanismo mucho más rápido ya que viaja a la velocidad de la luz (2.9979×10^8 m/s) y no sufre de atenuación en el vacío. Sin embargo, a pesar de no requerir de un soporte material la energía radiante se vuelve perceptible cuando esta interactúa con la materia.

La energía que incide sobre una superficie recibe el nombre de irradiación (G), cuando la radiación incidente G hace contacto contra una superficie, una parte de esta radiación es absorbida, otra parte es reflejada y la parte restante es transmitida, lo anterior se describe a partir de ciertas propiedades ópticas de los materiales: La fracción de G que es absorbida se denomina como absorptividad, la fracción que es reflejada se conoce como reflectividad y la fracción que es transmitida como transmisividad (Cengel et al., 2011).

Ecuación 1

Absortividad

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G} \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

Ecuación 2

Reflectividad

$$\rho = \frac{G_{ref}}{G} \quad 0 \leq \rho \leq 1$$

Ecuación 3

Transmisividad

$$\tau = \frac{G_{tr}}{G} \quad 0 \leq \tau \leq 1$$

De acuerdo con la primera ley de la termodinámica la suma de la radiación absorbida, reflejada y transmitida será igual a la radiación incidente G :

Ecuación 4

Primera ley de la termodinámica

$$G = G_{abs} + G_{ref} + G_{tr}$$

Asimismo, la suma de la radiación absorbida, reflejada y transmitida dará como resultado un valor 1 a excepción de los cuerpos opacos, en donde la transmisividad tiene un valor 0, lo anterior se describe mediante las siguientes ecuaciones:

Ecuación 5

Relación entre reflectividad, absortividad y transmisividad en cuerpos no opacos

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Ecuación 6

Relación entre reflectividad, absortividad y transmisividad en cuerpos opacos

$$\alpha + \rho = 1$$

Además de las propiedades previamente descritas, los materiales se caracteriza también por una propiedad conocida como emisividad (ϵ), la cual representa la razón entre la radiación

emitida por la superficie a una temperatura dada y la radiación que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura, entendiéndose por cuerpo negro a una superficie idealizada que funciona como un emisor y absorbedor perfecto (Cengel et al., 2011). De acuerdo con la ley de radiación de Kirchoff, la radiación emitida por un objeto a alta temperatura es equivalente a la cantidad de radiación que el cuerpo absorbe, es decir ε es equivalente a α (Fest, 2013). En la Tabla 3 se describen las principales propiedades ópticas de los materiales.

Ecuación 7

Relación entre emisividad y transmisividad

$$\varepsilon(T) = \alpha(T)$$

Tabla 3

Propiedades ópticas de los materiales

Propiedad	Simbología	Unidad	Definición
Reflectividad	ρ	%	Propiedad direccional del material de reflejar una fracción de la radiación electromagnética que incide sobre él
Transmisividad	τ	%	Propiedad física de un material de transmitir una fracción de la radiación electromagnética que incide sobre él
Absortividad	α	%	Propiedad física del material de absorber una fracción de la radiación electromagnética incidida sobre él
Emisividad	ε	%	Propiedad del material de emitir en forma de radiación infrarroja de onda larga, a la radiación solar (ultravioleta, visible e infrarroja) previamente absorbida

Nota. Elaborada a partir de Lira, 2018.

De acuerdo con Lira (2018) de estas propiedades derivan ciertas capacidades de los materiales, de la reflectividad deriva la reflectancia, la cual se refiere a la fracción de la radiación reflejada; de la transmisividad depende la transmitancia, la cual es la fracción de radiación transmitida; similarmente de la absortividad deriva la absorbancia, fracción de radiación absorbida; y por último de la emisividad proviene la emitancia, razón de la radiación IR que emitiría un cuerpo negro perfecto.

2.1.11. Propiedades espectrales y propiedades hemisféricas

La irradiación G comprende la radiación que incide sobre una superficie desde todas las direcciones del espacio hemisférico y por lo tanto representa un promedio para todas las direcciones y longitudes de onda, las propiedades hemisféricas resultan más convenientes en la práctica sin embargo también es posible el análisis de las propiedades ópticas a partir de una sola longitud de onda; la absorptividad, la reflectividad y la transmisividad *direccional espectral* se definen entonces como las fracciones absorbidas, reflejadas o bien transmitidas con respecto a la radiación que incide en una sola longitud de onda y una dirección específica (Cengel et al., 2011):

Ecuación 8

Absortividad espectral

$$\alpha_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda, abs}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)}$$

Ecuación 9

Reflectividad espectral

$$\rho_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda, ref}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)}$$

Ecuación 10

Transmisividad espectral

$$\tau_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda, tr}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)}$$

Donde se utiliza el subíndice λ para designar propiedades espectrales. Con relación a la emisividad direccional espectral, al igual que la emisividad hemisférica se define como una razón de la intensidad de la radiación que una determinada superficie emite con relación a la intensidad de la radiación que emite un cuerpo negro a la misma temperatura, solo que en este caso dicha radiación se emite en una longitud de onda y una dirección determinada, la ley de Kirchoff establece la siguiente relación para la emisividad en su forma espectral cuando la irradiación o la radiación emitida son independientes de la dirección:

Ecuación 11

Emisividad espectral

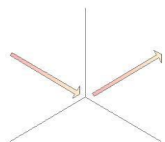
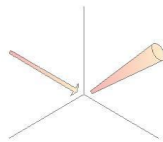
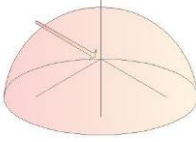
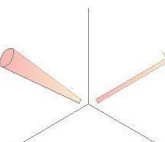
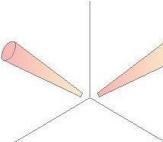
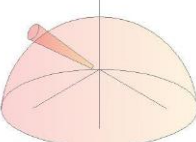
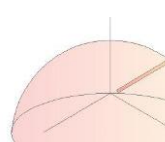
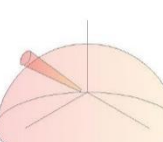
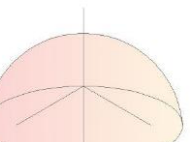
$$\varepsilon_{\lambda}(T) = \alpha_{\lambda}(T)$$

2.1.12. Diferencias entre reflectividad, reflectancia y albedo

Cuando la luz del sol llega a la superficie terrestre una parte de esta radiación es absorbida mientras que otra parte es reflejada, la relación entre la radiación incidente y la radiación reflejada puede darse de manera direccional, cónica y finalmente hemisférica (Indian Institute of Technology Bombay [IIT Bombay], 2018), en la Figura 19 se describen las posibles relaciones entre la radiación incidente y la radiación reflejada.

Figura 19

Relación entre la radiación incidente y la radiación reflejada por las superficies

Radiación incidente	Radiación reflejada		
	Direccional	Cónica	Hemisférica
Direccional	Bidireccional 	Direccional-Cónica 	Direccional-Hemisférica 
Cónica	Cónica-direccional 	Bicónica 	Cónica-Hemisférica 
Hemisférica	Hemisférica-direccional 	Hemisférica -Cónica 	Bihemisférica 

Nota. Elaborada a partir de IIT Bombay, 2018.

Como se mencionó anteriormente, la reflectividad es una propiedad direccional que representa la fracción de la radiación incidente reflejada por una superficie (Howell et al., 2021), similarmente el concepto de reflectancia se define como la fracción del flujo solar reflejado por una superficie (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales [ASTM International], 2011). A partir de estas definiciones, reflectividad y reflectancia podrían entenderse como un mismo concepto, sin embargo, de acuerdo con Marsh ambos difieren en ciertos aspectos, en primer lugar, la reflectividad es una propiedad particular del material, por lo que esta no varía

en función su espesor (más allá de la escala nanométrica), en cambio la reflectancia si se ve afectada por el espesor del material debido a las reflexiones internas. Por lo anterior, si bien en la mayoría de los materiales opacos y de espesor medible los valores de reflectividad y de reflectancia son en esencia equivalentes, para materiales traslucidos estos valores abran de diferir (Marsh, 2010).

Con respecto al albedo, este término se utiliza comúnmente en la climatología para referirse a la cantidad de luz solar que se refleja desde un objeto o sustancia (Philander, 2012), correspondiente a un tipo de reflectancia bihemisferica. (IIT Bombay, 2018). Cabe destacar que el albedo no es una propiedad intrínseca de la superficie, sino que también depende de la distribuciones espectrales y angulares de la luz incidente, que a su vez se rigen por la composición atmosférica y la dirección del haz de luz del sol. (Coakley, 2003). Este concepto esta estrechamente relacionado con el balance energetico de la atmósfera, ya que un alto albedo contribuye al enfriamiento de la superficie terrestre (Dabén, 2013). En la presente investigación, el término utilizado para la caracterización del material propuesto será reflectancia, dado que esta propuesta considera el espesor del material sumado a la técnica de medición retomada del estándar internacional ASTM E-903 para el diseño del arreglo experimental, en el cual se hace referencia a la reflectancia espectral y solar.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Teoría del cuerpo negro perfecto

Todos los cuerpos emiten o absorben radiación en función de sus propiedades, condiciones y temperatura; para conocer la cantidad de radiación que es emitida por un cuerpo es necesario contar con un estándar que permita la comparación entre una superficie real y una superficie idealizada conocida como cuerpo negro, la cual funciona como un emisor y absorbedor perfecto (Cengel et al., 2011). El término cuerpo negro fue propuesto por el científico Gustav Kirchhoff en el año 1860, dicho concepto se define como un cuerpo ideal, el cual permite el paso de toda la radiación incidente hacia él, en otras palabras su reflectividad y transmisividad son iguales a cero mientras que su absorptividad es igual a 1.0 en todas las longitudes de onda y direcciones (McCluney, 2008).

El reto principal de esta teoría fue encontrar la fórmula que reprodujera la distribución espectral de la radiación de cuerpo negro a distintas temperaturas. La siguiente contribución para la comprensión de la radiación de cuerpo negro se atribuye a Jožef Stefan (1879) quien propuso que la densidad de energía de la radiación de cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. A partir de la propuesta de Stefan, el físico Ludwig Boltzmann (1884) formuló la ley de Stefan-Boltzmann (Morrón, 2014), la cual establece que el flujo radiante total emitido por la superficie de un objeto a una temperatura T se expresa de la siguiente forma (McCluney, 2008):

Ecuación 12

Ley de Stefan-Boltzmann

$$M_{bb} = \sigma T^4$$

En donde M_{bb} es la irradiancia que sale de la superficie en el vacío ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67031 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$); y T es la temperatura en Kelvin. Posteriormente, científicos como Wilhelm Wien (1893), Lord Rayleigh y James Jean (1900) dieron continuidad al estudio de la radiación de cuerpo negro, sin embargo, la física clásica presentaba ciertas limitaciones para explicar este fenómeno. Ejemplo de lo anterior fue la denominada catástrofe ultravioleta, la cual hace referencia a la ley de Rayleigh-Jean, la cual explicaba exitosamente la radiación de cuerpo negro a bajas frecuencias, aunque a altas frecuencias la intensidad de la radiación tomaba valores infinitos. En contraste con las ideas de

la física clásica, en el año 1900 el físico alemán Max Planck propuso que la energía no es emitida de forma continua, sino que esta es emitida en determinados momentos y en pequeñas cantidades que él denominó cuantos o fotones (Díaz, 2018). De acuerdo con Planck, la energía de un cuanto depende de la frecuencia de la radiación. Lo anterior se expresa mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 13

Energía del fotón

$$E = h \cdot f$$

En donde E es la energía, h es la constante de Planck ($6.626176 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$) y f es la frecuencia de la radiación; a partir de esta teoría Planck desarrolló una ecuación para calcular la densidad de la energía radiante espectral en una cavidad en equilibrio térmico, esta ecuación se conoce como la ley de radiación espectral de cuerpo negro de Planck (McCluney, 2008):

Ecuación 14

Radiación de cuerpo negro de Planck

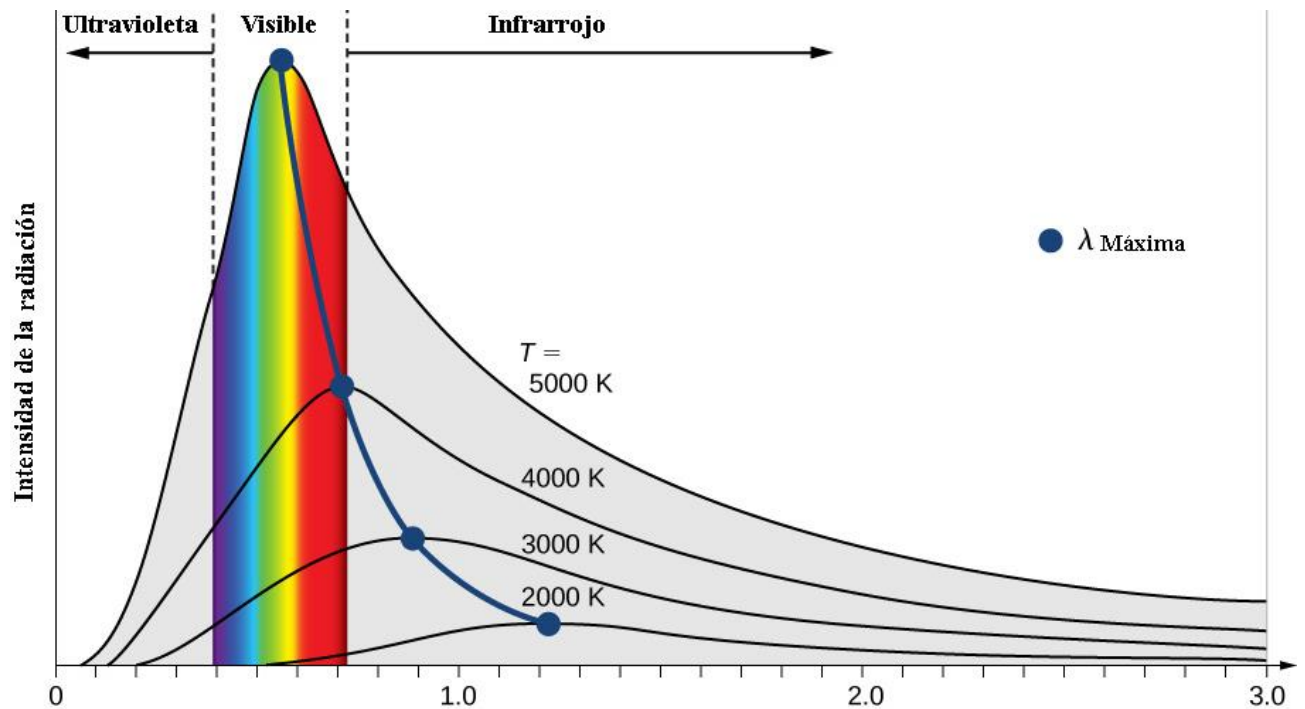
$$L_{bb\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)}$$

En donde h es la constante de Planck; c es la velocidad de la luz en el vacío ($2.9979246 \times 10^8 \text{ m/s}$); k es la constante de Boltzmann ($1.380662 \times 10^{-23} \text{J}\cdot\text{K}^{-1}$) y λ es la longitud de onda. Utilizando estos valores, las unidades para $L_{bb\lambda}$ son $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$.

En la Figura 20 se muestra la relación entre la intensidad de la radiación de cuerpo negro y la temperatura del cuerpo con respecto a la longitud de onda de la radiación emitida.

Figura 20

Espectro de radiación de un cuerpo negro



Nota. Imagen tomada de Ling y Sanny, 2016.

Son pocas las superficies que se acercan a un cuerpo negro en estas propiedades ópticas, algunas son el negro de carbón, el carborundo, el negro dorado, y el Sol, este último presenta una curva de radiación bastante similar a la de un cuerpo negro, con un pico de intensidad localizado en el espectro visible, aquel al que precisamente el ojo humano se encuentra adaptado (Rebolo, 2018).

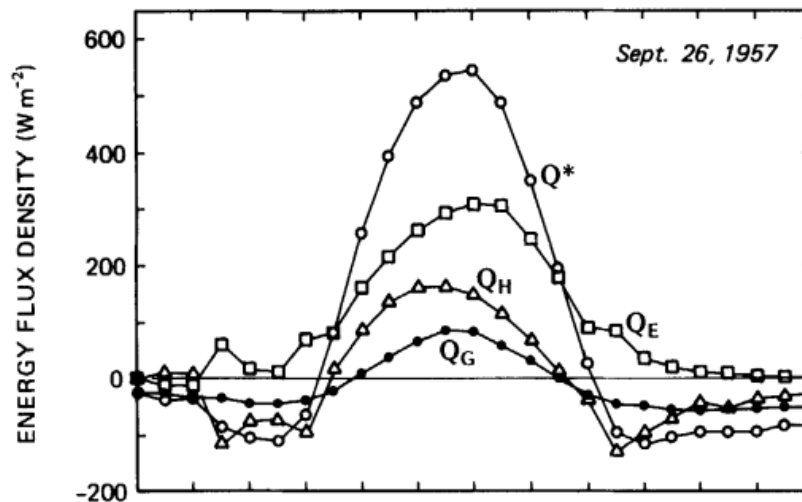
2.2.2. La base energética de la isla de calor urbano

De acuerdo con Oke (1982) la isla de calor urbano se define como una anomalía térmica positiva cuyas dimensiones pueden obtenerse de forma horizontal, vertical y temporal. Las bases energéticas de la ICU se sustentan dos conceptos clave: el balance energético rural y el balance energético del dosel urbano, los cuales son descritos en la publicación *The energetic basis of the urban heat island*.

En la Figura 21 se muestran los parámetros que determinan el balance térmico rural, primeramente, la energía térmica del sistema es impulsada por la densidad de flujo de la superficie radiante neta (Q^*) la cual es dominada por el intercambio de radiación de onda corta durante el día y la radiación de onda larga en la noche. El déficit de energía radiante superficial es disipado por conducción de calor hacia el suelo subyacente (Q_c) y por convección de calor sensible y latente hacia el aire (Q_H y Q_E respectivamente). En otras palabras, el balance térmico se da entre el suelo y el aire, por lo que en condiciones reales este intercambio de calor se ve influenciado por la presencia de vegetación, las propiedades térmicas del suelo y el estado de la atmósfera.

Figura 21

Variación diurna del balance energético



Nota. Imagen tomada de Oke, 1982.

En el caso del balance energético del dosel urbano, este intercambio se vuelve un proceso mucho más complejo de analizar debido a que cada superficie es el resultado de una combinación entre factores térmicos, radiantes, de humedad y aerodinámicos, lo cual ocasiona la presencia de diversos microclimas, por lo anterior el balance energético de la capa límite urbana esta dado por la siguiente relación:

Ecuación 15

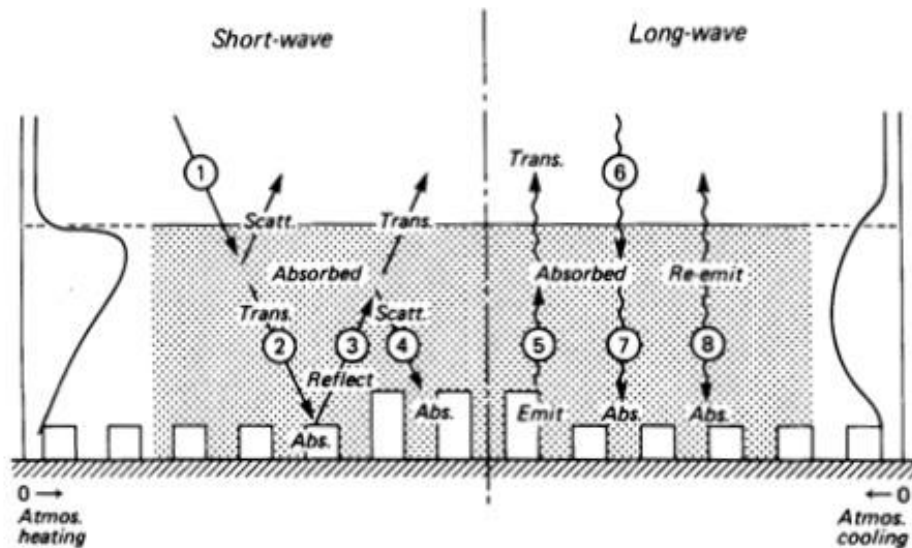
Balance energético

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S$$

En donde Q_F es el flujo de calor antropogénico que entra en la capa límite urbana y ΔQ_S es el calor almacenado. En la Figura 22 se muestra un esquema de los intercambios de energía radiante en un sistema urbano, en el cual se observa claramente el impacto de la geometría y sus propiedades térmicas y ópticas en el reflejo, la absorción, la transmisión y la emisión de la radiación solar incidente.

Figura 22

Esquema de los intercambios radiantes en la capa límite urbana.



Nota. Imagen tomada de Oke, 1982.

2.3. Estado del arte: materiales fríos predominantes en la literatura

El sol emite energía radiante en todas las direcciones y en distintas longitudes de onda, los rangos más significativos son el espectro UV (200 nm-400 nm), el espectro VIS (400 nm - 700 nm) y el espectro IR (700 nm-1000 nm). Cuando la radiación solar atraviesa los gases atmosféricos llega a la tierra en un 8 % de radiación UV, 42.3 % de radiación VIS y un 49.4 % de radiación IR, al hacer contacto con las superficies urbanas la radiación incidente puede ser reflejada, absorbida, transmitida y finalmente emitida (Cengel et al., 2011). En los sistemas urbanos las superficies con mayor exposición a la radiación solar son los techos (20-40 %) y los pavimentos (29-44 %), esto en función de la densidad urbana (Akbari y Matthews, 2012). Los materiales constructivos convencionales absorben gran parte de la radiación solar para después liberarla en forma de calor sensible ocasionando el sobrecalentamiento del ambiente construido (Steward y Oke, 2012).

Ante la problemática que representa este sobrecalentamiento, existen hoy en día determinadas estrategias de mitigación como la planeación urbana, el diseño urbano y la intervención sobre el tipo y uso de suelo, en esta última se encuentra el desarrollo de nuevos materiales de construcción (Gonzalez-Trevizo et al., 2021). Como estrategia de mitigación, los materiales fríos poseen un alto grado de reflectancia solar y emisividad térmica (arriba del 80%) por lo que presentan beneficios en la reducción de la demanda energética de enfriamiento, optimizan el confort térmico interior y exterior, favorecen el desempeño de sistemas HVAC¹² y PV¹³ y finalmente contribuyen en la disminución de la ICU (Pisello, 2017).

2.3.1. Análisis bibliométrico de tendencias

Con el propósito de conocer los conceptos más relevantes para el estudio reciente de materiales fríos, un total de 95 artículos fueron seleccionados para posteriormente extraer sus palabras clave y analizar su ocurrencia. De un total de 444 palabras clave, la mayor parte corresponde a palabras únicas (291, \pm 65%), en un principio la palabra clave con mayor ocurrencia fue *urban heat island*¹⁴ (22, \pm 5%) por lo que, para lograr un mejor análisis de las tendencias con respecto a los materiales fríos, el concepto *urban heat island* fue omitido para

¹² Heating, ventilation, and air conditioning

¹³ Photovoltaics

¹⁴ Isla de calor urbano

CC), los materiales de enfriamiento radiante diurno (*daytime radiative cooling, DRC*), los materiales retroreflectivos (*retroreflective, RR*), termocrómicos (*thermochromic, TC*), de cambio de fase (*phase change materials, PCM*) y fluorescentes (*fluorescent, FL*).

De acuerdo con la Figura 24, en el año 2016 los materiales de enfriamiento pasivo más estudiados fueron LC, RR y FL, con un porcentaje equivalente de 33.33 %. En 2017, destacaron los CC (35.71 %) y PCM (28.77 %), asimismo se mantuvo el interés por los materiales RR (14.28 %), DRC (14.28 %) y los materiales TC (7.14 %). En 2018 predominaron los materiales CC (30.76 %) y los materiales RR (30.76 %), otros materiales analizados en este año fueron los LC (15.31 %), PCM (15.31 %) and TC (7.69 %). Posteriormente, en el año 2019 se prestó especial atención a los materiales PCM (40 %) y los materiales termocrómicos (26.66 %), otros materiales explorados fueron los CC (20 %), LC (6.66 %) y los DRC (6.66 %).

En 2020 predominó el estudio de los DRC (28 %), los TC (28 %), PCM (20 %) y FL (12 %). En 2021 el interés de los investigadores se centró en los materiales TC (38.46 %) y los materiales DRC (30.76 %), asimismo materiales de tipo CC (23.07 %) y PCM (7.69 %) fueron también evaluados. Finalmente, en el año 2022, los materiales de mayor predominancia en la investigación fueron los DRC (60 %), seguidos de los materiales CC, TC, PCM y FL, con un porcentaje equivalente de 10 %. De acuerdo con los resultados, existe una clara tendencia hacia el estudio de los materiales de enfriamiento radiante diurno, la cual aumenta significativamente a partir de año 2020, asimismo materiales en tendencia continua son los CC, TC y PCM.

Figura 24

Progreso reciente de las tendencias de investigación de materiales fríos



Nota. Imagen elaborada a partir de la revisión de la literatura y la hoja de cálculo Excel.

2.3.3. Clasificación de materiales fríos

Durante la revisión de la literatura se identificaron 22 tipos de materiales fríos, clasificados en siete grupos en función sus propiedades ópticas y el rango espectral en donde se presentan sus picos de reflectancia y emitancia térmica (véase Tabla 4). El primer grupo que se muestra en la columna izquierda de la tabla se refiere a aquellos materiales con una alta reflectancia en el espectro VIS (400 nm a 700 nm), este se integra por materiales naturales y materiales artificiales. El segundo grupo se refiere a materiales altamente reflectivos en el espectro infrarrojo (700 nm a 1 mm), en este grupo se utilizan como compuestos pigmentos reflectivos en el espectro IR, nanocompuestos y microesferas de vidrio huecas. El tercer grupo se refiere a aquellos materiales de enfriamiento radiante diurno, compuesto por estructuras fotónicas multicapa, metamateriales de estructura fotónica 2D-3D y recubrimientos basados en pigmentos reflectivos en el espectro IR y nanocompuestos. Finalmente, el último grupo de la columna de la izquierda está formado por materiales que presentan fluorescencia, estos pueden ser a base de compuestos de bulto o nanocompuestos.

En la segunda columna se localizan en primer lugar los materiales retroreflectivos, conformado por compuestos como perlas de vidrio, perlas de bario, y laminas con estructura de prisma. El sexto grupo se refiere a los materiales de cambio de fase, subdivididos en materiales orgánicos, inorgánicos y eutécticos, asimismo en esta investigación se identificó a aquellos materiales PCM con pigmentos reflectantes incorporados. El último grupo incluye materiales caracterizados por su comportamiento termocrómico, estos pueden ser a base de colorantes (comúnmente se utilizan colorantes de leuco), o pueden ser aquellos que no son a base de colorantes, como es el caso de nanocompuestos como cristales líquidos, así mismo en este estudio también se identificaron también aquellos materiales TC con pigmentos IR incorporados.

Tabla 4

Clasificación de materiales fríos en función de los compuestos base

Tipo de material	Subcategorías	Tipo de material	Subcategorías
LC	Materiales naturales	RR	Esferas de vidrio
	Materiales artificiales		Esferas de bario
CC	Pigmentos IR	TC	Estructura de prisma
	Nanocompuestos		Con base colorante
	Esperas de vidrio huecas		Sin base colorante
DRC	Estructuras fotónicas multicapa	PCM	Vis-NIR añadido
	Metamateriales de estructura fotónica 2D-3D		Orgánicos
	Pigmentos IR		Inorgánicos
	Nanocompuestos		Eutécticos
	Compuestos derivados de polímeros		Vis-NIR añadido
FL	Bulto		
	Nanocompuestos		

2.3.4. *Materiales de colores claros*

Un material exhibe una tonalidad blanca cuando este refleja la mayor parte de las radiaciones luminosas que inciden sobre él, en otras palabras, un material de color claro posee un alto porcentaje de reflectancia en el espectro visible (400 nm -700 nm), por lo que mantendrá una baja temperatura superficial con respecto a otros materiales de tonalidades más oscuras, ya que estos tienden a absorber un alto porcentaje de la radiación incidente. Uno de los materiales de construcción tradicionales es el mármol, con una reflectancia en el espectro visible de hasta 84 % y alrededor de 70 % en los espectros ultravioleta e infrarrojo, cualidades que promueven hasta un 5 % la reducción de la demanda energética de enfriamiento, aunque bien ocasionan un incremento de hasta 5000 kWh en la demanda de calentamiento (Rosso et al., 2016).

Además de los materiales naturales, otros materiales producidos por el hombre que han presentado potencial en la reducción de la temperatura son ciertas losetas cerámicas, aunque su efectividad varía respecto a distintos patrones geométricos que forman parte del diseño (Bellia et al., 2020), asimismo también se han evaluado las características de distintas mezclas de

concreto, Qin (2019) comparó el efecto de enfriamiento entre tres diferentes compuestos: cemento portland, cenizas volantes y escombros granulados (mejor conocido como slag), cada una de las mezclas se curó bajo distintas condiciones de humedad, como resultado se identificó una correlación directa entre la humedad del ambiente y el albedo del material, siendo la mezcla de cemento portland curada en un ambiente húmedo la que presentó mejores resultados (Qin et al., 2019). Si bien los materiales claros (naturales como elaborados por el hombre) son efectivos en la reducción de la temperatura de las superficies urbanas es importante atender los problemas de deslumbramiento para el confort de los peatones.

A pesar de no ser el material frío con mayor potencial de enfriamiento, los materiales LC son alternativa factible en regiones donde el desarrollo de materiales avanzados es difícil e inhibido por el progreso tecnológico limitado. Reconociendo los hallazgos de esta revisión de la literatura, uno de los materiales naturales de color claro más estudiados es el mármol blanco; A nivel mundial, los principales exportadores de mármol blanco son Turquía, la Unión Europea, Italia, Grecia y Egipto (WITS, 2023). Sin embargo, el costo de este material es bastante alto, por lo que su incorporación en entornos urbanos a gran escala no es factible desde el punto de vista económico. Como alternativa, investigaciones recientes han evaluado el uso de residuos de mármol (*waste marble, WMP*) como agregado en mezclas de mortero, aunque la motivación principal de estas investigaciones son las propiedades mecánicas del material más que sus propiedades ópticas (Benjeddou et al., 2020).

2.3.5. *Materiales de colores fríos*

Dado que el espectro solar está compuesto en mayor proporción por radiación infrarroja (aproximadamente un 50%), la mayor parte del calor absorbido por las superficies urbanas se atribuye a la componente del infrarrojo cercano (Rosati et al., 2021b), por lo que los materiales altamente reflectantes en esta banda del espectro son de gran interés para mitigar el efecto de la ICU. Los recubrimientos reflectivos en el espectro infrarrojo consisten en pigmentos conocidos en la literatura científica como pigmento IR. Este tipo de compuesto tiene una estructura cristalina y diámetros no superiores a 0.55 nm, lo que le permite reflejar una elevada proporción de la radiación que incide sobre él, tanto en el espectro infrarrojo como en una parte del espectro visible.

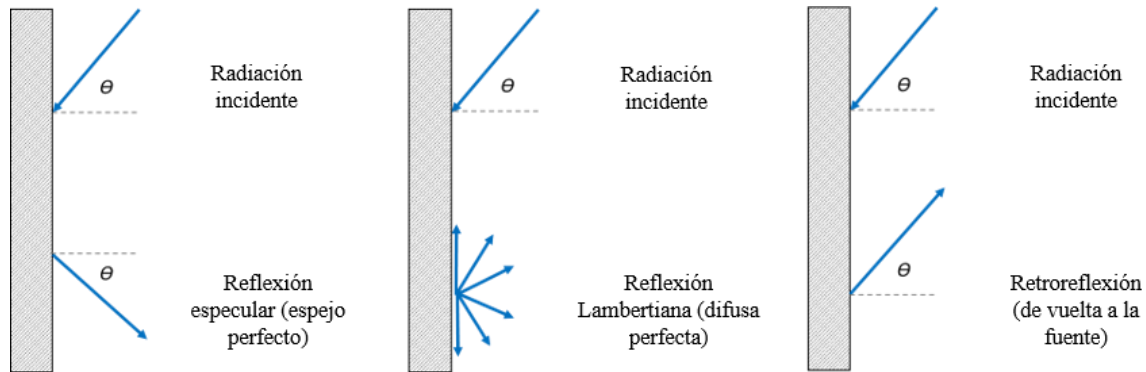
Los pigmentos IR comúnmente utilizados son blancos, especialmente el dióxido de titanio (TiO_2) (rutilo y anafase) con una reflectividad infrarroja de hasta el 80 % (Ramos et al., 2021). De manera similar, el carbonato de calcio (CaCO_3) presenta resultados prometedores como material frío, con un valor de reflectancia en el espectro NIR superior al 70 % (Zou et al., 2019). Sin embargo, a pesar de su buen comportamiento térmico, cuando estos componentes se incorporan a entornos urbanos, provocan ciertos problemas de deslumbramiento por su tonalidad blanca, sumado a lo anterior, los revestimientos blancos no siempre son factibles por motivos arquitectónicos o estéticos (Rosso et al., 2017). Debido a que la reflectancia de estos materiales se encuentra en la región infrarroja, la absorbancia en el espectro visible les permite tener diferentes colores además del blanco, las últimas tendencias en la investigación de este tipo de materiales se han centrado en el desarrollo de materiales de diferentes tonalidades. Rossi y otros autores (2020) analizaron el comportamiento termo-óptico de diferentes compuestos como el silicio (Si), el titanio (Ti), el hierro (Fe), el zinc (Zn), el cromo (Cr) y el calcio (Ca), obteniendo como resultado revestimientos rojos y marrones. Similarmente, Qi y otros (2022) evaluaron el rendimiento del óxido de cromo (Cr_2O_3) y el óxido de hierro (Fe_2O_3), que tiene un tono verde y rojo, respectivamente.

2.3.6. *Materiales Retroreflectivos*

Cuando la radiación hace contacto con una superficie, esta puede ser reflejada en tres formas ideales: *especular*, *lambertiana* y *retroreflectiva*. Los materiales que poseen cualidades retroreflectivas se conocen como retroreflectores, estos se caracterizan por reflejar la radiación que incide sobre ellos en la misma dirección (Levinson et al., 2020), tal como se ilustra en la Figura 25. En las ciudades donde predominan edificios de baja altura, la implementación de tecnologías pasivas de enfriamiento, como es el caso de materiales fríos, ha demostrado resultados positivos en relación a la disminución de la demanda energética de enfriamiento, sin embargo, en zonas urbanas compuestas por edificios de gran altura, en donde la luz de sol incide en mayor proporción sobre las superficies verticales, el uso de este tipo de materiales en muros exteriores promueve la reflexión múltiple entre los edificios, por lo que la radiación solar se retiene en los cañones urbanos y posteriormente es absorbida por las superficies (Steward y Oke, 2012). La aplicación de materiales retroreflectivos contribuye al reflejo de la radiación solar fuera de los cañones urbanos, promoviendo también la disminución del sobrecalentamiento urbano (Levinson et al., 2020).

Figura 25

Reflexión especular, lambertiana y retroreflectiva



Nota. Imagen elaborada a partir de Levinson et al., 2020.

En la literatura predominan tres tipos de materiales retrorreflectores, aquellos elaborados a partir de esferas de vidrio, esferas de bario y aquellos con estructura de prisma. Las esferas de vidrio varían en diámetro, los diámetros más pequeños se encuentran alrededor de 106 μm (Yuan et al., 2019) y los más grandes pueden llegar hasta 1 cm (Yuan et al., 2022); el diámetro de las esferas determina la retroreflectividad del material, la cual también varía en función del ángulo de incidencia, de acuerdo con los resultados obtenidos por E. Morini y otros (2017), esferas con un diámetro de 3 mm presentan mayor retroreflectividad que esferas de 0.2 mm en ángulos de 10° a 60°, sin embargo, cuando la fuente de radiación proviene de ángulos de 70° a 80° la esfera de 3 mm de diámetro presenta una reflexión difusa, mientras que la esfera de 0.2 mm mantiene su comportamiento retrorreflexivo. En cuanto a los materiales con estructura de prisma, generalmente se evalúan recubrimientos comerciales, de acuerdo con Yuan y otros autores, este tipo de productos poseen una mayor retroreflectividad a las esferas de cristal en ángulos menores a 65°, sobre todo en ángulos de 10° a 30° donde la retroreflectividad es tres veces mayor (Yuan et al., 2016).

2.3.7. *Materiales de enfriamiento radiante diurno*

El enfriamiento radiante se refiere al proceso en el que se produce una reducción de la temperatura como consecuencia de un exceso de radiación emitida sobre la radiación absorbida (American Meteorological Society [AMS], 2012). El enfriamiento radiante diurno es una técnica de enfriamiento pasivo relativamente nueva que expone la superficie a la radiación solar

directa durante el día (Zhao et al., 2019). En este sentido, los materiales DRC se basan en la alta transparencia de la atmósfera terrestre en el infrarrojo medio (MIR), es decir la ventana atmosférica (8-13 μm), a través de la cual es posible disipar el calor terrestre directamente al espacio exterior. Como consecuencia directa, el desempeño de estos materiales está determinado principalmente por factores ambientales como la humedad relativa y la presencia de contaminantes en el aire (Ulpiani et al., 2020).

Los materiales DRC deben atender tres cualidades esenciales: a) una alta reflectividad dentro del espectro solar, b) una baja reflectividad dentro de la ventana atmosférica, y c) una alta emisividad dentro de la ventana atmosférica (Feng et al., 2020). Para lograr estos objetivos, los DRC generalmente se componen de múltiples compuestos, lo que da como resultado estructuras multicapa o híbridas. Huang y otros autores (2017) analizaron el potencial de enfriamiento de un material DRC que consta de una capa inferior de negro de carbón y una capa superior de TiO_2 encapsulado en una capa de resina acrílica, alcanzando una reflectancia solar de 0.90 y una emisividad de 0.95; Bao y otros (2017). evaluaron el desempeño de un material DRC compuesto por una capa inferior de pintura negra y una capa superior compuesta por una combinación de TiO_2 y SiO_2 , logrando una reflectancia solar del 90,7 % y una emitancia del 90,1 %; similarmente, Jeong y otros investigadores (2020) estudiaron el uso de un material fotónico multicapa, optimizado por TiO_2 y SiO_2 , logrando una reflectancia solar del 94 % y una potencia de enfriamiento de 136 W/m^2 .

2.3.8. *Materiales termocrómicos*

Los materiales cromáticos son aquellos que exhiben un cambio de color a partir de un estímulo externo, tales estímulos pueden ser la luz, la temperatura, productos químicos o bien un impacto mecánico (Vik et al., 2016), los materiales que responden a un estímulo de temperatura se conocen como materiales termocrómicos y se caracterizan por una propiedad denominada termocromismo, la cual les permite sufrir cambios de color cuando estos aumentan o decrecen su temperatura (Talvenmaa, 2006). Como estrategia de mitigación al sobrecalentamiento de las ciudades, los materiales termocrómicos (TC) presentan la ventaja sobre los materiales fríos estáticos de cambiar de tonalidad en función de la temperatura del ambiente circundante, por lo que poseen el potencial de reducir el consumo de energía de los edificios tanto en los periodos de enfriamiento como los de calentamiento (Yuxuan et al., 2020).

De acuerdo con Garshasbi y Santamouris (2019), los materiales TC se clasifican en dos grandes grupos, en primer lugar se encuentran aquellos materiales cuyo carácter termocrómico se atribuye al uso de colorantes, en segundo lugar aquellos materiales cuya tecnología va más allá del uso de colorantes.

Estudios recientes se han focalizado en el potencial de estos materiales puestos en contraste con materiales fríos de comportamiento estático mediante el análisis de su desempeño en periodos de verano y de invierno. Fabiani y otros (2019) evaluaron el desempeño de pigmentos termocrómicos microencapsulados, con una TT de 20 °C aplicados a cubiertas arquitectónicas, obteniendo una reflectancia solar de 0.55 y una disminución de 6 °C de la temperatura superficial; por su parte, Berardi y otros (2020) estudiaron el comportamiento de pigmentos de leuco microencapsulados con una TT de 31 °C, alcanzando un índice de reflectancia solar de 110; de igual manera, Zhang y otros (2022) analizaron pigmentos microencapsulados con una TT de 31°C, con una reflectancia solar de 74.19 %.

2.3.9. *Materiales de cambio de fase*

Los materiales de cambio de fase, también llamados PCM²⁰, son un tipo de material capaz de absorber o liberar calor cuando se presenta un cambio de fase, este puede ser de un estado sólido a uno líquido, o bien, de un estado líquido a uno sólido (Yang et al., 2019), el cambio de fase ocurre cuando el material supera su punto de fusión (°C), por consiguiente los PCM pueden evitar el sobrecalentamiento de las superficies urbanas durante el verano sin aumentar la carga de calefacción en el invierno (Yoon et al., 2018).

De acuerdo con Baetens (2010), los PCM se clasifican en tres grandes grupos: a) compuestos orgánicos, b) compuestos inorgánicos, c) eutécticos. El primer grupo está constituido por ceras de parafina, generalmente estos compuestos son de bajo costo, aunque sus valores elevados de conductividad limitan su potencial de enfriamiento, además de las ceras parafinas, otros compuestos orgánicos son ciertos alcoholes, ácidos grasos, ésteres y glicoles. En el segundo grupo, compuestos inorgánicos de cambio de fase, destacan las sales hidratadas y metálicas, con una menor conductividad térmica a la de los compuestos orgánicos, al igual

²⁰ Phase change material

que un bajo costo. Finalmente, los PCM eutécticos consisten en una combinación de compuestos orgánicos e inorgánicos.

Aplicados como estrategia de mitigación a la ICU, los PCM han demostrado su efectividad para reducir la temperatura de los materiales, Lei et al. (2017) evaluó el efecto de enfriamiento de compuestos de cambio de fase conformados por PCM microencapsulado con un diámetro de 17-20 μm añadido a una mezcla de concreto, con un punto de fusión de 28 $^{\circ}\text{C}$, de acuerdo con los resultados obtenidos el material desarrollado aplicado a cubiertas y muros exterior reduce la temperatura superficial hasta 8.9 $^{\circ}\text{C}$; asimismo Ascione y otros (2019) analizaron el potencial de enfriamiento de un PCM con un punto de fusión de 23 $^{\circ}\text{C}$, las características del material se trasladaron a un software de simulación, el PCM aplicado en muros verticales logró un ahorro del 11.7 % en el consumo energético para el periodo de verano.

2.3.10. *Materiales fluorescentes*

Algunos materiales poseen la cualidad de emitir energía electromagnética en el rango UV-VIS a partir de la excitación de una molécula, a esto se le conoce como luminiscencia (Femenias, 2015). La fluorescencia es un tipo de luminiscencia, y se define como la capacidad que tienen algunas sustancias de emitir energía en forma de luz tras la absorción de energía electromagnética, generalmente, la energía total que emite la sustancia se caracteriza por una longitud de onda mayor a la fuente radiante (University Cambridge, 2022), en otras palabras, es menos energética. La diferencia de energía entre la longitud de onda del borde de absorción (pico de absorción) y la longitud de onda máxima de reemisión (fluorescencia) se conoce como desplazamiento de Stokes, en adición, la eficiencia de los materiales fluorescentes se cuantifica a partir de su rendimiento cuántico (energía emitida/energía absorbida) (Santamouris et al., 2020). En la literatura, el fenómeno de la fluorescencia recibe también el nombre de fotoluminiscencia (PL²¹), y su potencial de enfriamiento radica en su capacidad de reemitir radiación en el espectro visible (Garshasbi et al., 2020b).

²¹ Photoluminescence

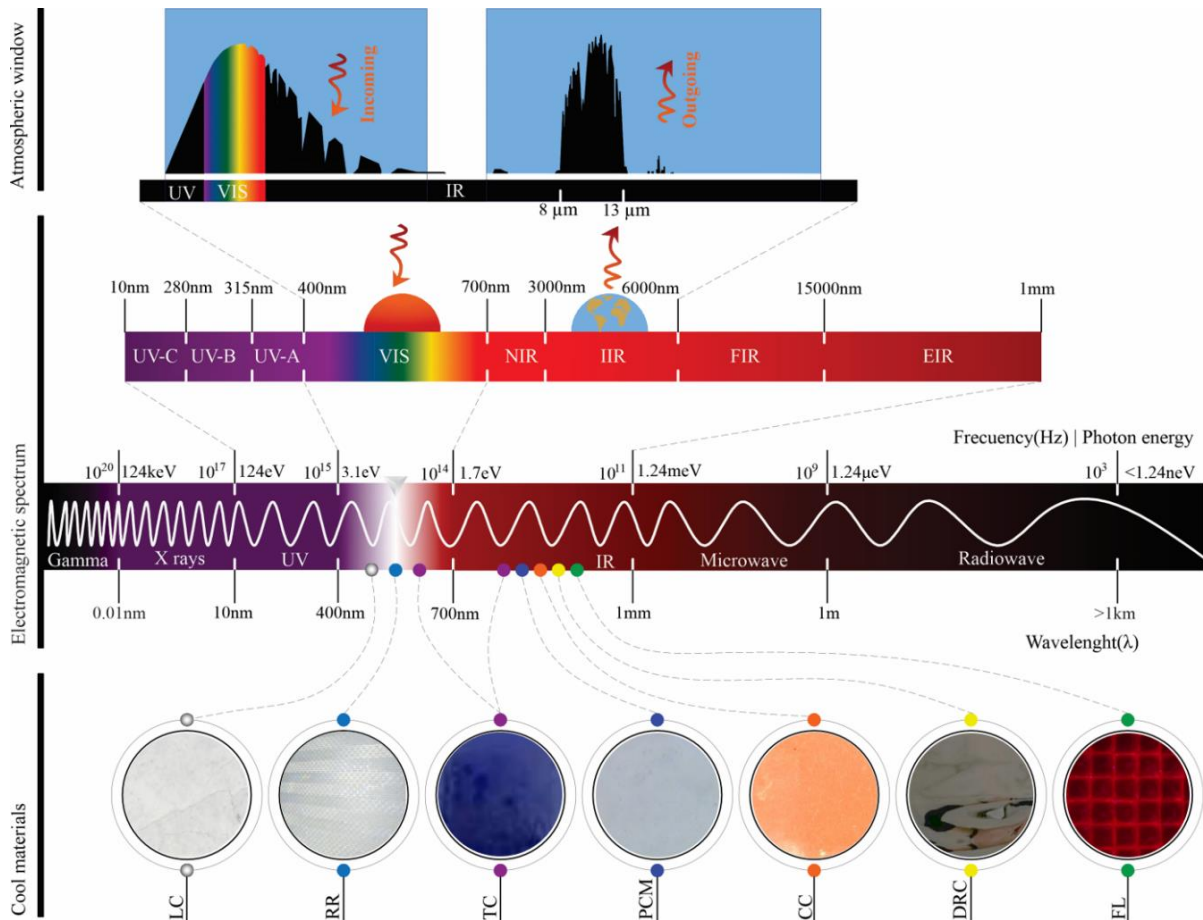
Los materiales fluorescentes se clasifican en dos grupos, en primer lugar, los materiales fluorescentes de bulto y en segundo lugar los nano materiales fluorescentes (Santamouris et al., 2020). En el primer grupo destaca el óxido de aluminio (Al_2O_3), Berdahl (2016) analizó el potencial de enfriamiento del óxido de aluminio dopado con cromo ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$) logrando un alto rendimiento cuántico (0.83 ± 0.10) y una disminución de la temperatura superficial en muestras fluorescentes de $6.5\text{ }^\circ\text{C}$ respecto a las muestras no fluorescentes al ser expuestas la radiación solar. En el grupo de los nano materiales, destaca el potencial de los puntos cuánticos (QDs²²), tales como la combinación de nano cristales de seleniuro de cadmio y sulfato de zinc (CdSe/ZnS) estos materiales exhiben un efecto luminiscente en longitudes de onda menores a 640 nm y logran una eficiencia cuántica de 25-30 %, este tipo de QDs en conjunto con recubrimientos reflectivos llegan a alcanzar una reflectancia en el espectro NIR de hasta 93 % y una disminución de la temperatura superficial de hasta $8\text{ }^\circ\text{C}$ (Garshasbi et al., 2020b).

Finalmente, es esencial comprender el potencial de enfriamiento de cada tipo de material frío, así como el rango del espectro electromagnético en el cual se encuentran sus picos de reflectancia y emitancia térmica, en la Figura 26 se localizan los siete tipos de materiales fríos con respecto al rango espectral correspondiente.

²² Quantum Dots

Figura 26

Correlación entre el espectro electromagnético y los rangos de reflectancia y emitancia espectral de los materiales fríos



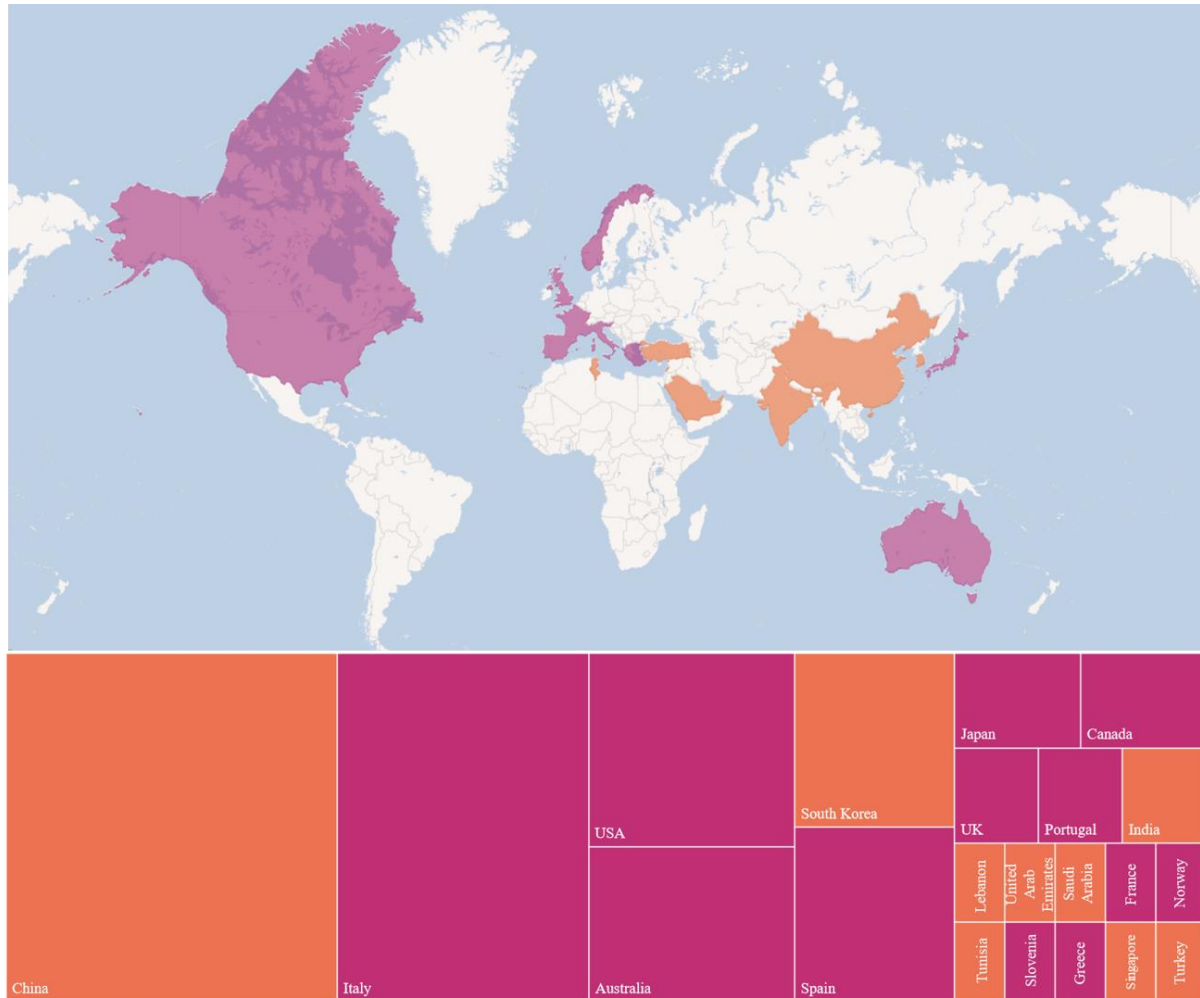
Nota. Elaborado a partir de lo descrito por Butcher, 2016; Hecht, 2017; Mikla et al., 2012; NOAA, 2023; y los resultados reportados por Berdahl et al., 2016; Carlosena et al., 2021; Fabiani, Piselli, et al., 2020; Levinson et al., 2020; Rosso et al., 2016; Rosso, Pisello, Castaldo, Cotana, et al., 2017; Yuxuan et al., 2020.

2.3.11. Países predominantes en el estudio de los materiales fríos

Durante la revisión de la literatura, 22 países fueron identificados como los más prevalentes en el campo de la investigación de los materiales fríos. Tal como se muestra en la Figura 27 la mayoría de estos estudios se realizan en economías desarrolladas (59 %): Italia (21 %), EE. UU. (10 %), Australia (8 %) y España (7 %) son las cuatro economías desarrolladas con mayor número de publicaciones sobre el tema. Por otro lado, el 41 % de las publicaciones revisadas se refiere a países en desarrollo, al respecto, China y Corea del Sur, son los países en desarrollo predominantes en el campo, con 29 % y 7 %, respectivamente.

Figura 27

Jerarquía de países que estudian la temática de materiales fríos



Nota. Los países identificados con el color magenta se consideran economías desarrolladas, los países identificados en color naranja son economías en desarrollo. La clasificación económica se realizó con base a (United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN, 2016).

2.3.12. Correlaciones entre el tipo de material frío y las características del clima

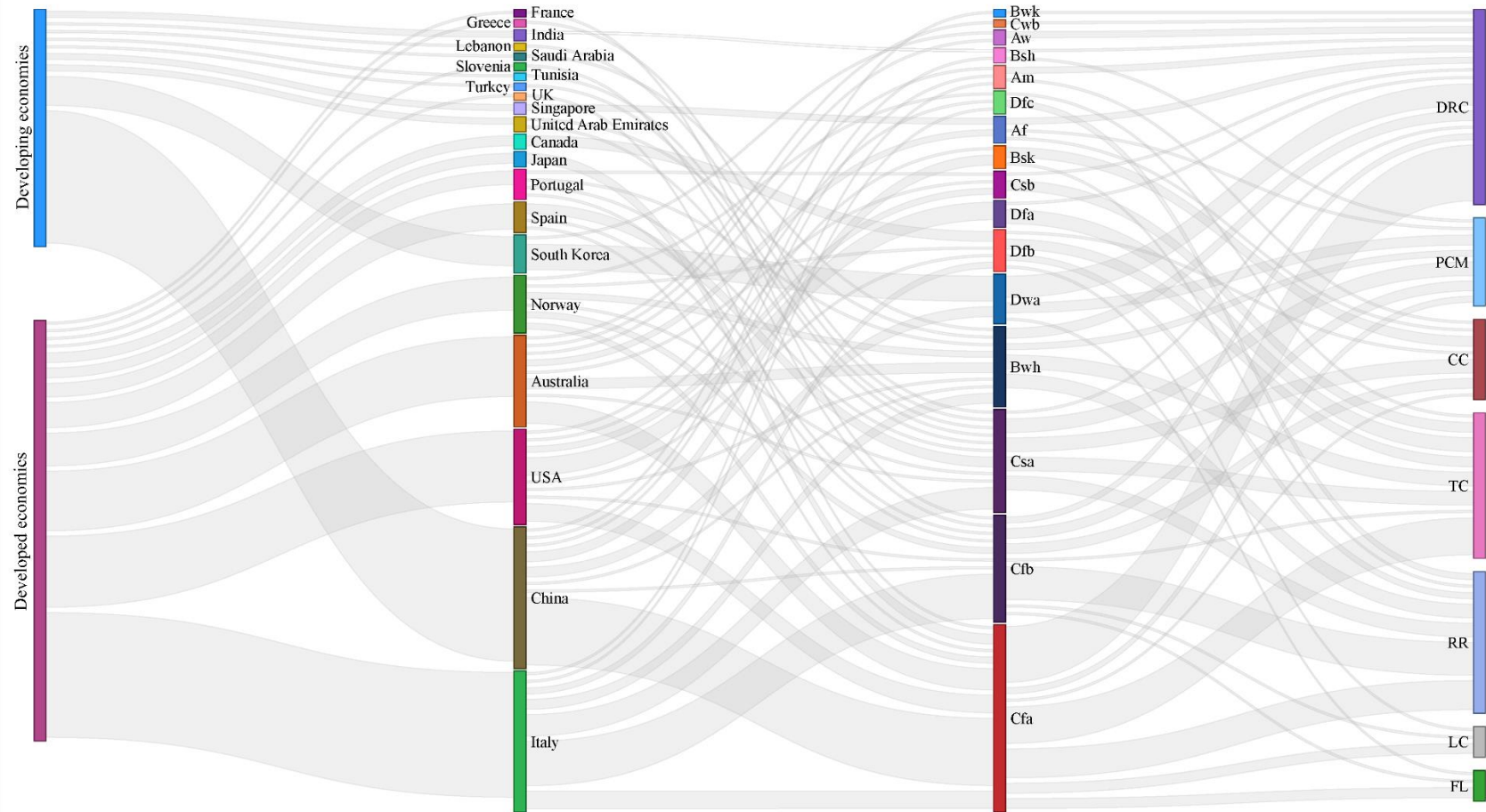
Las condiciones climáticas juegan un papel crucial en el desempeño térmico de los materiales, particularmente en lo que se refiere a su potencial de enfriamiento. Para determinar las relaciones entre los tipos de materiales fríos y las características climáticas de la zona en la que se evaluaron estas tecnologías, se realizó un análisis de flujo entre el tipo de economía, el país que realiza el estudio, la zona climática del sitio de estudio y el tipo de material frío analizado. El sistema de clasificación climática seleccionado fue la clasificación de Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006), mundialmente reconocido para la identificación del clima basado en la temperatura y la precipitación.

Las relaciones entre el tipo de material, la zona climática, el país y el tipo de economía se representan gráficamente en la Figura 28. A través de este análisis es posible identificar que los materiales CC se evalúan principalmente en climas Csa, Csb y BSk, materiales FL en zonas climáticas Cfa, Cfb y Dwa, materiales LC en climas Cfa, Cfb y Dfb, materiales PCM predominan en climas Cfa, Cfb, Csa y Dwa, los materiales DRC se estudian en mayor medida en las zonas climáticas Cfa, seguidas de las zonas Dwa y BWh, y los materiales retroreflectores en las zonas climáticas Cfa, Cfb, Csa y BWh, principalmente. Finalmente, materiales TC para climas Cfa, Csa, Csb, Dfa, Ddb y BWh. Los climas donde más se estudia este tema corresponden a las clasificaciones Cfa, Cfb, Csa y BWh, por lo que es correcto suponer un predominio en regiones templadas. Además, los materiales DRC, PCM, TC y TC tienen la frecuencia más alta en estas regiones.

El país en el que se lleva a cabo la investigación es otro factor a tener en cuenta al analizar las tecnologías de enfriamiento pasivo. De acuerdo con los resultados obtenidos, los países con mayor dominio y presencia en los resultados reportados son Italia, China, Estados Unidos y Australia. Este análisis sugiere que las naciones en desarrollo también están interesadas en el desarrollo de nuevos materiales, China lidera a los países en desarrollo con una gran cantidad de publicaciones, aunque en los que respecta otras naciones y economías en desarrollo el número de publicaciones es bastante limitado.

Figura 28

Distribución geográfica de los diversos tipos de materiales fríos estudiados en el campo en relación con la clasificación climática, país y desarrollo económico



Nota. Zonas climáticas: Clima ecuatorial lluvioso (Af), clima tropical monzónico (Am), clima tropical de sabana (Aw), clima semiárido cálido (BSh), clima estepario (BSk), clima árido cálido (BWh), clima árido templado y frío (BWk), clima subtropical húmedo (Cfa), clima oceánico (Cfb), clima mediterráneo típico (Csa), clima mediterráneo (Csb), clima templado subhúmedo (Cwb), clima continental templado (Dfa), hemiboreal (Dfb), clima continental húmedo (Dfc), clima continental templado (Dwa), Tipo de material: enfriamiento radiante diurno (DRC), cambio de fase (PCM), termocrómico (TC), color frío (CC), color claro (LC), retroreflectivo (RR), fluorescente (FL).

2.3.13. *Requerimientos tecnológicos para el desarrollo de materiales fríos*

La producción de muestras es una de las técnicas más utilizadas en la investigación de los materiales fríos; en este proceso se requiere la adquisición de componentes clave, a los cuales se les atribuye el comportamiento del material. Dicho lo anterior, los materiales LC utilizan principalmente rocas de tonos claros como el mármol; mientras que los materiales CC utilizan agentes como TiO_2 , SiO_2 , Cr_2O_3 y Fe_2O_3 , por nombrar algunos; similarmente, los materiales DRC utilizan TiO_2 y CaCO_3 como capas reflectantes, así como también emplean compuestos como CB^{23} (Huang y Ruan, 2017) y SiO_2/SiC (Bao et al., 2017) como capas emisivas; los materiales RR utilizan predominantemente perlas de vidrio, laminas de estructura de prisma (Yuan et al., 2016), y esferas de BaTiO_3 (Morini et al., 2018).

En los materiales TC predominan los pigmentos microencapsulados (TCM), por otro lado, también se han analizado los cristales líquidos dispersos en polímeros (PDLC) y el óxido de vanadio (VO_2); los materiales PCM se fabrican utilizando PCM microencapsulado (miPCM) y PCM macroencapsulado (maPCM), además de diatomita (Di) como matriz para la formación de CPMC (Jin et al., 2021). Finalmente, los materiales FL utilizan principalmente QDs para la fabricación de compuestos fluorescentes, los QDs de CdSe/ZnS (Garshasbi et al., 2020b) y los QDs de CIS/ZnS son algunos de los más utilizados (Garshasbi et al., 2020a).

El valor de reflectancia solar más alto reportado en los artículos revisados corresponde a materiales DRC, Dong et al. (2022) obtuvo un valor de reflectancia solar de 0.97 mediante el análisis de un material multicapa a base una matriz acrílica líquida con partículas de BaSO_4 , CaCO_3 , SiO_2 y una capa superior de politetrafluoroetileno; el valor máximo de reflectancia en el espectro visible está relacionado con los materiales TC, Chen et al. (2021) reportaron un valor cercano a 0.90 al desarrollar un material TC a partir de una base asfáltica y microcápsulas termocrómicas; Los materiales CC tienen la reflectancia infrarroja más alta, Meenakshi et al. (2018) señaló un valor de 0.97 para una sustancia compuesta de nitrato de bismuto, titanato de butilo y ácido nítrico.

²³ Carbon Black

Con respecto al potencial de enfriamiento, los materiales TC demostraron la reducción más significativa en la temperatura superficial, Hu et al (2019a) logró una disminución de 16,6 °C al combinar TiO₂ con compuestos TCM en un sustrato de asfalto. En cuanto a los parámetros energéticos, el mayor impacto derivado de la aplicación de materiales fríos corresponde a un 50,6 % de ahorro de energía anual, esto atribuido a materiales TC. En términos de períodos cálidos, el mayor impacto en la demanda de energía por enfriamiento reportado es una reducción del 38,76 % en la carga de refrigeración mediante el uso de PCM macroencapsulados (Rathore y Shukla, 2020). La información anteriormente descrita se presenta a manera de síntesis en la Tabla 5.

Tabla 5

Componentes clave; mayores valores de reflectancia solar; mayor reducción de T_{sup}; mayor impacto energético

Tipo de material	Componentes clave ¹	Reflectancia maxima	Mayor reducción de T _{sup}	Mayor impacto energético
LC	Membranas de colores claros, mármol blanco, BFS, cenizas volantes clase C, cemento Portland tipo I	0.85 (R _{VIS}) 0.7087 (R _{UV}) 0.7274 (R _{IR})	12.6 °C	4.5 % (Reducción de la demanda de energía de refrigeración)
CC	TiO ₂ , SiO ₂ , Cr ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , Bi ₄ Ti ₃ O ₁₂ , HGM/ BiOCl _{1-x} I _x , YIn _{0.9} Mn _{0.1} O ₃ -ZnO, Si, Ti, Fe, Zn, Cr, Ca, CuO, CaO, ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , Na ₂ O, K ₂ O, ZnO, CaCO ₃ .	0.96 (R _S) 0.97 (R _{IR})	14.1 °C	18 % (Reducción de la demanda de energía de refrigeración)
DRC	CB, TiO ₂ , C ₃ H ₈ O, SiO ₂ , SiC, Ag, Al ₂ O ₃ , ZnO, HfO ₂ , Na ₂ O, BaSO ₄ , Ca (OH) ₂ , CaSiO ₃ , CaCO ₃ , TPX, PET, C ₃ H ₉ NO, DPHA, PMMA, 3DPCA, AAGP, Vikuiti.	0.97 (R _S)	10.6 °C	136.3 W/m ² (Poder de enfriamiento)
RR	Esferas de vidrio, esferas de BaTiO ₃ , esferas de Al cubiertas de BaTiO ₃ , estructuras de prisma, microprisma no metalizado.	0.80 (R _S)	-	16.1 % (Reducción de la demanda de energía de refrigeración)
TC	TCM, PDLC, VO ₂ , TiO ₂ .	0.80-0.90 (R _{VIS}) 0.90 (R _{IR})	16.6 °C	50.6 % (Ahorro anual de energía)
PCM	miPCM, maPCM, C _n H _{2n+2} , CH ₃ (CH ₂) ₂₀ CH ₃ , PEG/SiO ₂ , Di.	0.89 (R _S)	10.90 °C	38.76 % (Reducción de la carga de refrigeración)
FL	CdSe/ZnS, PbS QDs, C ₄ H ₆ N(C ₈ H ₈) _x (C ₃ H ₄ O ₂) _y H, Ag, CIS/ZnS QDs, Al ₂ O ₃ :Cr, PET, PIBA, microesferas de vidrio huecas.	0.90 (R _S) 0.93 (R _{IR})	4.6 °C	8.1 W/m ² (Poder de enfriamiento)

Nota. ¹ En la sección de Glosario se encuentran con mayor detalle las abreviaturas con respecto a los componentes clave.

Nota*: Valores máximos mostrados referidos al material más eficiente de la categoría.

En términos de desarrollo científico y tecnológico, el estudio de materiales fríos requiere interacciones comerciales entre grupos de investigación y países tecnológicamente avanzados para producir componentes clave y fabricar los instrumentos de medición requeridos.

La Como se ilustra a continuación, los grupos de investigación Italia, el cual es el país con el mayor número de publicaciones, obtienen el 26 % de sus insumos de investigación de industrias italianas, y el resto proviene de empresas en los EE. UU. (26 %), Alemania (13 %), Japón (13 %), Reino Unido, México y Hong Kong (6 % casa uno). EE.UU. adquiere la mayor parte de sus insumos dentro del país (60 %), obteniendo el porcentaje restante en Australia, Canadá, Japón, India, Italia y Reino Unido en porcentajes equivalentes (6.66 %). Australia obtiene el 25 % de sus insumos de empresas austriacas y mantiene conexiones con China (25 %), EE. UU. (25 %) y el Reino Unido (25 %). Finalmente, España compra el 30 % de sus insumos a empresas italianas, y el porcentaje restante a Canadá (10 %), República Checa (10 %), Holanda (10 %) y EE.UU. (40 %).

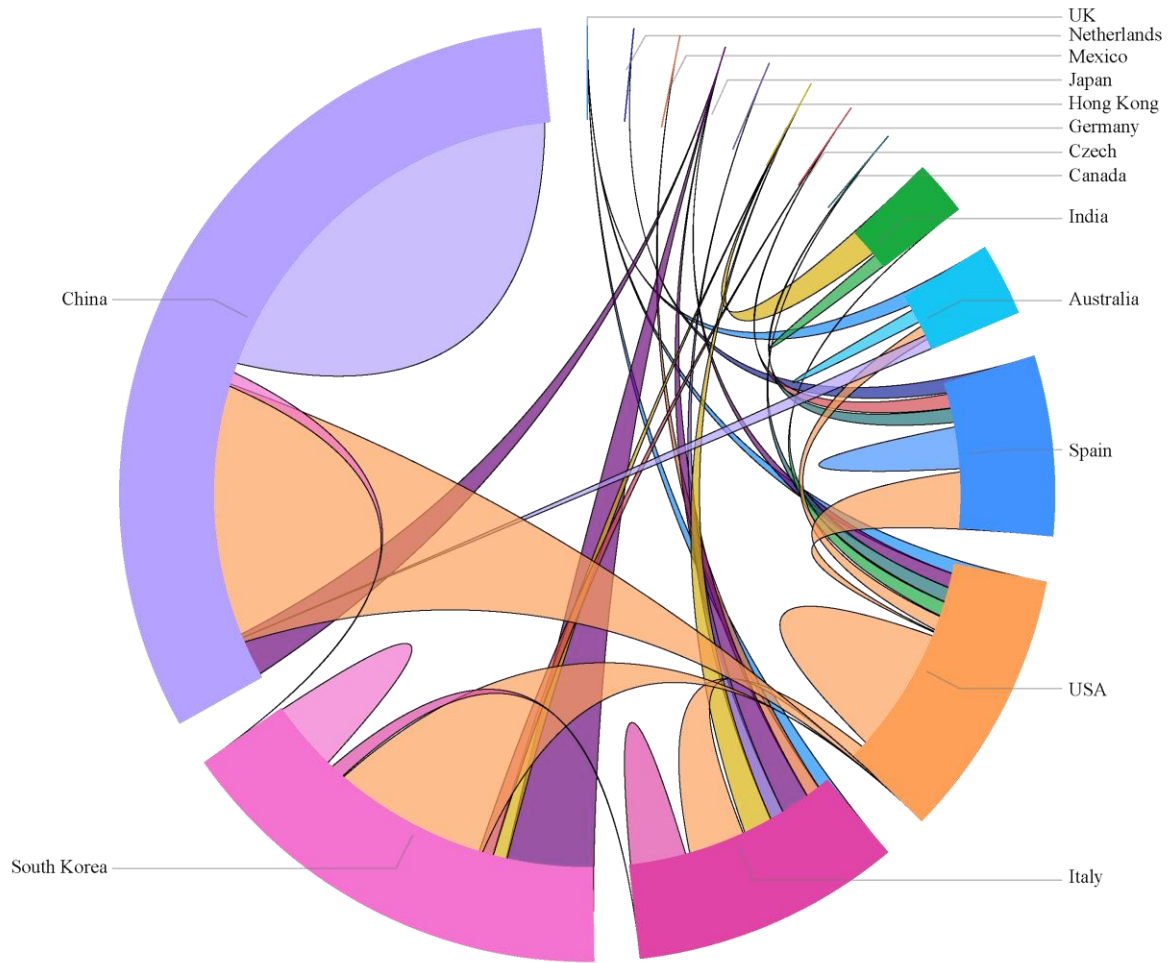
En cuanto a las economías en desarrollo, China obtiene la mayoría de sus compuestos e instrumentos internamente (56.86 %), mientras que sus vínculos comerciales restantes son con Estados Unidos (35.29 %), Japón (5.88 %) y Corea del Sur (1.96 %). Corea del Sur consume el 20 % de las empresas ubicadas dentro del país, y el resto en EE. UU. (40 %), Japón (24 %), República Checa (4 %), Alemania (4 %) e Italia (4 %). Finalmente, India adquiere el 33.33 % del país, mientras que la mayoría de productos y tecnologías se obtienen de empresas alemanas (66.66 %). Según los resultados, la viabilidad de adquirir desarrollo tecnológico es fundamental para el progreso científico en este campo debido a los requisitos metodológicos precisos para desarrollar y caracterizar materiales avanzados.

Figura 29 muestra las relaciones comerciales entre los países con mayor número de publicaciones (Italia, Estados Unidos, Australia, España, China, Corea del Sur e India) y los países donde se encuentran las oficinas centrales de las empresas de manufactura reportadas en las investigaciones. Como se ilustra a continuación, los grupos de investigación Italia, el cual es el país con el mayor número de publicaciones, obtienen el 26 % de sus insumos de investigación de industrias italianas, y el resto proviene de empresas en los EE. UU. (26 %), Alemania (13 %), Japón (13 %), Reino Unido, México y Hong Kong (6 % cada uno). EE.UU. adquiere la mayor parte de sus insumos dentro del país (60 %), obteniendo el porcentaje restante en Australia, Canadá, Japón, India, Italia y Reino Unido en porcentajes equivalentes (6.66 %). Australia obtiene el 25 % de sus insumos de empresas austriacas y mantiene conexiones con China (25 %), EE. UU. (25 %) y el Reino Unido (25 %). Finalmente, España compra el 30 % de sus insumos a empresas italianas, y el porcentaje restante a Canadá (10 %), República Checa (10 %), Holanda (10 %) y EE.UU. (40 %).

En cuanto a las economías en desarrollo, China obtiene la mayoría de sus compuestos e instrumentos internamente (56.86 %), mientras que sus vínculos comerciales restantes son con Estados Unidos (35.29 %), Japón (5.88 %) y Corea del Sur (1.96 %). Corea del Sur consume el 20 % de las empresas ubicadas dentro del país, y el resto en EE. UU. (40 %), Japón (24 %), República Checa (4 %), Alemania (4 %) e Italia (4 %). Finalmente, India adquiere el 33.33 % del país, mientras que la mayoría de productos y tecnologías se obtienen de empresas alemanas (66.66 %). Según los resultados, la viabilidad de adquirir desarrollo tecnológico es fundamental para el progreso científico en este campo debido a los requisitos metodológicos precisos para desarrollar y caracterizar materiales avanzados.

Figura 29

Conexiones comerciales entre los países investigadores y países proveedores de insumos



2.4. Técnicas de caracterización

2.4.1. Espectrofotometría de reflectancia difusa

La espectrofotometría es una técnica de medición cuantitativa la cual permite el análisis de las propiedades ópticas de un material en una amplia gama de longitudes de onda, desde el espectro ultravioleta hasta las regiones de los espectros visible e infrarrojo, este tipo de técnica funciona mediante la medición de la relación de dos cantidades radiométricas en función de la longitud de onda (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología [por sus siglas en inglés NIST], 2021).

Las muestras prototipo desarrolladas en esta investigación consisten en distintos recubrimientos de pintura, por lo que estas se consideran superficies no homogéneas, de acuerdo con los conceptos descritos en la sección 2.1, el tipo de reflectancia que este tipo de materiales presentan es de tipo difusa, porque esta será la propiedad óptica analizada mediante el análisis de espectrofotometría. La medición de la reflectancia difusa requiere de un instrumento llamado espectrofotómetro en conjunto con un accesorio denominado esfera de integración, el cual se construye con materiales que generan superficies Lambertianas (Mora, 2009), es decir, superficies que reflejan la luz de manera difusa y cuya distribución de intensidad de la luz reflejada obedece a la ley del coseno de Lambert:

Ecuación 16

Ley del coseno de Lambert

$$I_r(\theta) = I_0 \cos\theta$$

En donde I_r es la intensidad reflejada, I_0 es la intensidad incidente y θ es el ángulo medido desde la normal. Una esfera integradora ideal refleja en su totalidad la radiación del haz incidente, para esto el interior de la esfera es recubierto de materiales altamente reflectivos como el óxido de magnesio (MgO) (KortUm, 1969) o sulfato de bario (BaSO₄) (Shimadzu Scientific Instruments, 2023). Así, la irradiancia sobre cualquier elemento diferencial de superficie en la esfera será homogénea, logrando una difusión isotrópica sobre la superficie.

2.4.2. Termografía infrarroja

La termografía infrarroja (IR) es la ciencia de la adquisición y análisis de información térmica mediante dispositivos de imágenes térmicas sin contacto, los cuales detectan la radiación emitida en el rango espectral infrarrojo (700 nm a 1 mm) del espectro electromagnético (Kim, 2014). Por medio de la termografía IR es posible calcular el valor de emisividad de los materiales, en la literatura uno de los métodos comúnmente utilizados es el propuesto en el estándar internacional ASTM E 1933 99a: Métodos de prueba estándar para medir y compensar la emisividad usando radiómetros de imágenes infrarrojas.

El funcionamiento de un cámara de infrarrojo consiste en capturar energía infrarroja para crear imágenes a través de salidas de video digitales o análogas. Para el uso de este tipo de dispositivos es importante considerar la temperatura reflejada por los objetos, si la cámara está enfocando un objeto con baja emisividad, como es el caso de metales pulidos, esa superficie actuará como un espejo, por lo que, en lugar de medir la temperatura del objeto en sí, la cámara detectará la temperatura reflejada. La temperatura reflejada (T-reflejada) es cualquier radiación térmica cuyo origen está en otros objetos, los cuales se reflejen en el objetivo que se pretende medir. Para objetos de alta emisividad, la T-reflejada tiene menos influencia, para medir la temperatura aparente de estos objetos se recomienda ajustar el valor de la emisividad y asignar un valor de T-reflejada en función de la temperatura del ambiente (Teledyne FLIR LLC, 2023).

2.4.3. Análisis mecano-óptico de topografía

La Microscopía de Fuerza Atómica (AFM²⁴) es una técnica de medición que investiga las propiedades superficiales y la estructura de los materiales a escala nanométrica, esta requiere de un instrumento denominado microscopio de fuerza atómica, un dispositivo que permite la determinación de materiales conductores o aislantes, blandos o duros, en bulto o en polvo, orgánicos o inorgánicos (Aliofkhazraei y Ali, 2014). Los microscopios AFM se basan en el microscopio de efecto túnel, solo que a diferencia de este, un microscopio de fuerza atómica no solamente se limita a condiciones de alto vacío sino que también es posible utilizarlo en medios como el aire, en un medio líquido o en vacío (Vilaso, 2020).

²⁴ Atomic Force Microscopy

2.5. Marco normativo

Investigaciones recientes emplean una combinación de estudios de laboratorio, de campo y de simulación para la obtención de resultados, en la mayoría de los manuscritos consultados se identificó como una de las técnicas principales la preparación en laboratorio de muestras prototipo, utilizando instrumentos como agitadores magnéticos e instrumentos de recubrimiento por rotación para la producción y deposición de recubrimientos fríos y películas delgadas. Las propiedades ópticas, térmicas y superficiales de esas muestras también se caracterizan en el laboratorio, lo cual es un paso crucial.

La caracterización óptica implica medir la reflectancia, la absorbancia y la emitancia del material utilizando técnicas de espectrofotometría e instrumentos de medición como espectrofotómetros UV/VIS y esferas integradoras de acuerdo con la norma ASTM E903, y cámaras termográficas de acuerdo con la norma ASTM E1933. Además de lo anterior, se aplican algunas técnicas para la evaluación del color como el método CIE L^*a^*b mediante colorímetros. La reflectancia solar también se puede medir en condiciones de campo utilizando instrumentos como albedómetros y piranómetros de acuerdo con la norma ASTM E1918.

En cuanto a la reflectancia solar en estudios de campo, también se realizan campañas de seguimiento de la exposición de muestras. La temperatura ambiente, la humedad, la radiación solar y la velocidad del viento se registran mediante estaciones meteorológicas, piranómetros y anemómetros. La temperatura superficial de las muestras se registra con termopares tipo K, termopares tipo T y cámaras termográficas.

Para la caracterización térmica de las muestras se utilizan instrumentos como discos calientes para medir la conductividad térmica, la difusividad térmica y la capacidad calorífica específica; los materiales de cambio de fase exhiben un predominio en este sentido. Mientras que la caracterización superficial de materiales utiliza técnicas como el análisis SEM y FESEM para la observación de sus propiedades microestructurales, para ello se utilizan microscopios electrónicos de barrido, así como análisis TEM y microscopios electrónicos de transmisión. Otras técnicas utilizadas en condiciones de laboratorio son los ensayos de envejecimiento acelerado QUV utilizando instrumentos como cámaras climáticas para la simulación de ciclos solares, de temperatura, humedad y niebla salina de acuerdo con las normas ASTM B1117 y

ASTM G154. Las normas más recurrentes en la literatura, así como las técnicas que hacen uso de ellas y los instrumentos requeridos se enlistan en la Tabla 6.

Tabla 6

Marco normativo, técnicas e instrumentos

Tipo de material	Normas/estándares	Técnicas predominantes	Instrumentos/herramientas
LC	ASTM E903-96, G173-03-08, C1371-2015. ASHRAE Standard 55.	Producción de muestras, espectrofotometría, análisis colorimétrico ¹ , simulación de escenarios.	Espectrofotómetro, espectrómetro, instrumentos meteorológicos
CC	ASTM B117/18, C1371, C1371-15, D523/14, D3359, D3363-05, D7334/08, D7897/18, E408-71, E903, E1980-11, E1918, E1980-11, E1918, G154-06, G173-03. ISO 788, 11507, 25178:2012, 9060, 1164-4, 22197-1, 18434-1, 22007-2. EN 13755, 772-21, 15802, 2390, 12371, 1934, 12697-08. JTG E20-2011.	FESEM, TEM, SEM, FTIR, QUV, Producción de muestras, análisis de escenarios, análisis térmico, espectrofotometría, análisis colorimétrico ¹ , prueba de durabilidad, monitoreo de variables climáticas.	Dispensador ultrasónico, espectrofotómetro, espectrómetro (FT-IR), colorímetro, analizador de quimioluminiscencia, fuente de luz, radiómetro, bajo vacío, difractorómetro de rayos X, microscopio (3D digital, SEM, TEM, Raman), goniómetro, perfilómetro, analizador de propiedades térmicas, Instrumentos meteorológicos, Cámara climática, Sensor de temperatura, mezclador.
DRC	ASTM E903, G173-03, D4060, D4541. ASHRAE Standard. JSCE K571-2004.	FDTD, MGM, SEM, FIT, ALD, HR-TEM, XRD Test, EDS, FTIR, CVD, TG, TGA, FESEM, producción de muestras, espectrofotometría, evaporación de haz de electrones, análisis de escenarios, método de ensamblaje por fricción unidireccional fácil, método de diferencias finitas, análisis de sensibilidad, monitoreo del clima, análisis colorimétrico ¹ , método de Stöber, pruebas de abrasión, método de conversión de fase, porosimetría de intrusión de mercurio, autodeposición, Proceso de inversión de fase, Monte Carlo, Método de Energía Dispersa o Reflejada.	Espectrofotómetro, analizador de propiedades térmicas, probador de adherencia, micrómetro, analizador TGA, instrumentos meteorológicos, difractorómetro de rayos X, sensor de temperatura, espectrómetro (FT-IR), instrumento mezclador, probador de abrasión, analizador de tamaño de partículas, calentador de retroalimentación, cámara de vacío, microscopio SEM
RR	ASTM C137, D4956-17, E903, E1918-06, G173-03. ASHRAE Standard. ISO 9050, 9845-1. JIS K5602.	Análisis colorimétrico ¹ , espectrofotometría, análisis CDF, simulación de escenarios, análisis térmico, producción de muestras, medición de retroreflexión.	Fuente de luz, espectrofotómetro, goniómetro, fresadora CNC, instrumentos meteorológicos, fotodiodos.
TC	ASTM C518-17, C926-18b, D1754, D2565, E490-00, E903, E1933-14, E1980-11, G159-98. ASHRAE Standard. 14-2002, US climate zones, Standard 55, 14 Guidelines. ISO 13790, 7730, 13032-2. EN 196-1, 196-3, 410. LEED 4.1 Standard.	SEM, FTIR, Análisis colorimétrico ¹ , Producción de muestras, Monitoreo del clima, Simulación de escenarios, Espectrofotometría, Análisis térmico, QUV, Recubrimiento por rotación, CBD.	Difractorómetro de rayos X, Monocromador, Fuente de luz, Espectrofotómetro, mezclador, Espectrocalorímetro, Cámara climática, Instrumentos meteorológicos, Microscopio ESEM, Proliforómetro, Reflectómetro.
PCM	ASTM C1371, D2240, D4329-99, E903, G154-06. ISO 1518:2000, 22007-2, 6946:2017. UNI/TR 11552. UNITS 11300-2, 11300-1. AEEGSI. T 0503e2005, 0505e2005, 0506e2005, 0734-2000, 0713e2000, AASHTO T 324-2014 Standard Method, ASHRAE-140 case-600, IS:383-2016.	TES, SEM, FTIR, XRD Test, TG, DSC, FEM, AFM, FESEM, LCCA, método CondFD, producción de especímenes, QUV, ANOVA, análisis CFD, simulaciones de escenarios, espectrofotometría, análisis colorimétrico ¹ , prueba de dureza y rayado, polimerización en emulsión, análisis de optimización multiobjetivo, frente de Pareto, monitoreo del clima, método sol-gel, prueba de estabilidad del agua, prueba de pérdida de Cantabro, prueba de estabilidad de volumen, prueba de arranque, impregnación al vacío, método de diseño Marshall, método de máscara libre, prueba de rueda de Hamburgo	Fuente de luz, Espectrofotómetro, Difractorómetro de rayos X, Emisómetro, Sputter, Calorímetro, Analizador de propiedades térmicas, Ensayo de dureza (durómetro, lápiz), Microscopio metalúrgico, Cámara climática, Pirheliómetro, Sensor de temperatura, Módulo de termopar.
FL	ASTM C1371, E903, E1918-06. EN 15,976	Análisis colorimétrico ¹ , Producción de muestras, Espectrofotometría, Análisis térmico	Espectrofotómetro, Emisómetro, Cámara CCD, Espectrómetro (Fluorescencia, FT-MIR/NIR), Fuente de luz, Sensor de temperatura, Monocromador, Tubo fotomultiplicador, Detector de semiconductores PbS, Analizador de propiedades térmicas, Microscopio (SEM, TEM, Raman).

Nota.¹ CIE L*a*b

En la presente investigación, las normativas utilizadas serán el estándar ASTM E-903: Método de prueba estándar para absorción, reflectancia y transmitancia solar de materiales mediante esferas integradoras, y el estándar ASTM E1933: Práctica estándar para medir y compensar la emisividad utilizando radiómetros de imágenes infrarroja.

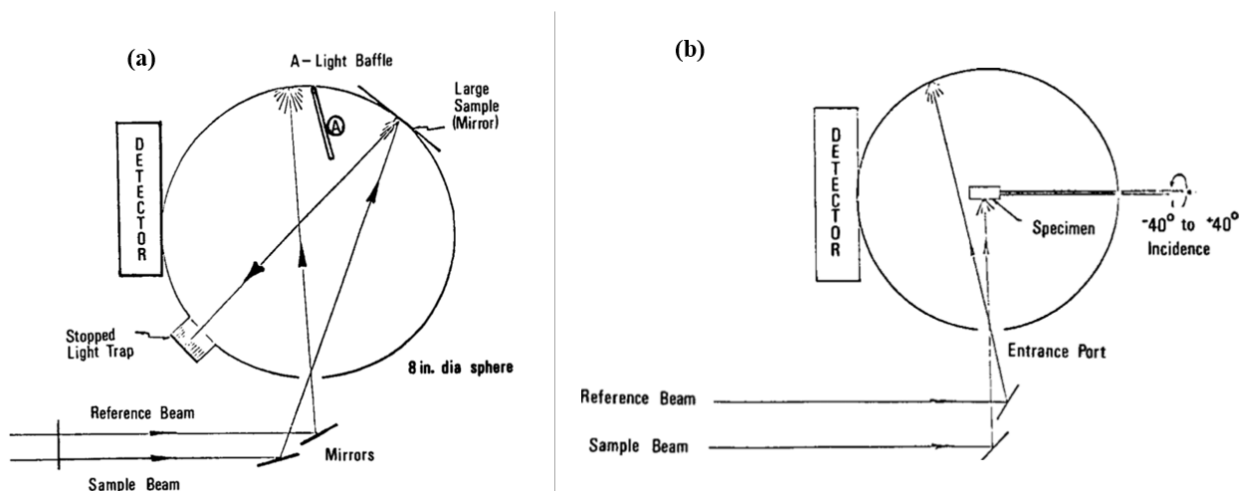
2.5.1. ASTM E903

Estudios efectuados en laboratorio recurren al estándar internacional ASTM E903 para cuantificar el porcentaje de reflectancia, absorbancia y transmitancia espectral (300 a 2500 nm) de superficies homogéneas, para esto se requiere de espectrofotómetros con esferas integradoras las cuales reflejan, transmiten e irradian el flujo radiante de una muestra a un hemisferio o viceversa (ASTM International, 2020). En este método el tamaño de la muestra se define por los siguientes criterios:

- Esferas de tipo muestra montada en pared: Esta posición se emplea cuando se requiere medir el valor de la reflectancia y la transmitancia, en este caso la muestra se coloca asegurando un contacto directo con el borde de apertura de la esfera, por lo que el tamaño de la muestra debe ser lo suficientemente largo para cubrir el área de apertura (vease Figura 30a).
- Esferas de tipo Edwards: Esta posición se utiliza para la medición de la reflectancia y absorbancia, colocando la muestra en la parte central de la esfera, el área de la muestra debe ser equivalente a 0.01 el área de la esfera integradora (vease Figura 30b).

Figura 30

Tipos de esfera de integración



Nota. a) esfera tipo muestra montada en pared, b) esfera tipo Edwards. Tomado de ASTM International, 2020.

2.5.2. ASTM E1933

Este método está diseñado para estimar la emisividad en condiciones de laboratorio o de campo, para esto se proponen dos técnicas: a) método del termómetro de contacto, b) método de termómetro sin contacto. Dada la naturaleza de la presente investigación se seleccionó el método de termómetro sin contacto, para el cual se requieren de tres herramientas, en primer lugar, un radiómetro de imágenes infrarrojas calibrado, en segundo lugar, un tripie de soporte para el radiómetro y en tercer lugar un material modificador de superficie con emisividad conocida. El método para la medición de la emisividad de muestras o especímenes consta de los siguientes pasos:

1. Colocar el radiómetro de imágenes infrarrojas en el tripie o dispositivo de soporte en la ubicación deseada y a la distancia de la muestra.
2. Enfocar el radiómetro hacia la muestra cuya emisividad se requiere medir.
3. Ingresar el valor de emisividad conocido del material que modifica la superficie en la computadora del radiómetro.
4. Colocar el material modificador de superficie sobre o adyacente a la muestra a medir.
5. Registrar la temperatura del material modificador de superficie.
6. Enfoque el radiómetro de imágenes infrarrojas en la parte de la muestra inmediatamente adyacente al material que modifica la superficie o bien retirar el modificador de superficie.
7. Sin mover la cámara, ajuste el control de emisividad de su computadora hasta que la computadora de la cámara indique la misma temperatura registrada en el modificador de superficie previamente.
8. El valor de emisividad indicado será la emisividad medida del espécimen, a esta temperatura y banda de onda espectral.

Es recomendable que tanto la muestra como el modificador de superficie posean una temperatura 10 °C mayor a la temperatura del ambiente, asimismo se sugiere repetir el procedimiento al menos tres veces.

CAPÍTULO III. MÉTODO

3.1. Diseño de la investigación

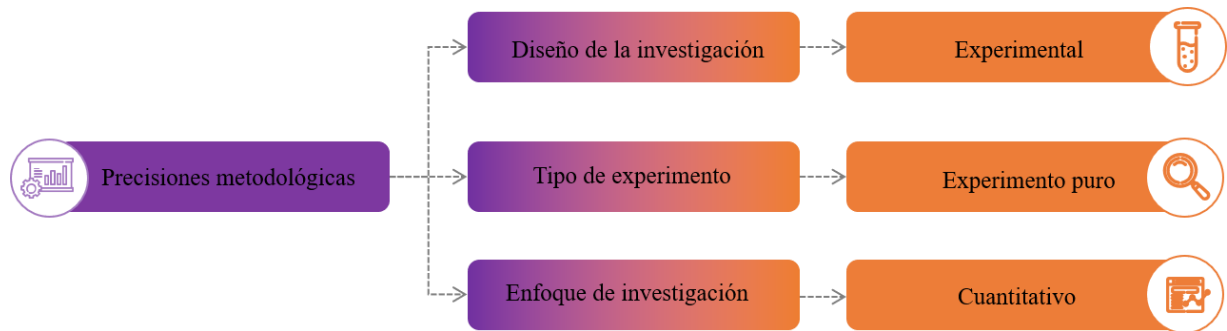
El diseño de la investigación consiste en un plan estratégico mediante el cual el investigador obtiene la información que necesita para responder a sus preguntas de investigación, por lo que la selección de un diseño de investigación pertinente tiene un gran peso para la precisión, amplitud y veracidad de la información obtenida (Sampieri et al., 2014).

Por lo que se refiere a este estudio, la investigación fue de tipo experimental, con experimentación pura debido a que la comprobación de la hipótesis requirió de la manipulación de variables mediante el incremento y decremento de la temperatura superficial de una serie de muestras prototipo, lo cual cumple con las características de las investigaciones experimentales.

Con relación al enfoque de la investigación, se determinó que el enfoque cuantitativo fue el que presentó mayor compatibilidad con esta investigación, dada la naturaleza de los resultados esperados, los cuales debían reportarse mediante una fracción de la irradiancia reflejada (%) y como un valor de temperatura (°C). Lo anterior se ejemplifica en la Figura 31.

Figura 31

Precisiones metodológicas para el diseño de la investigación



3.2. Variables del objeto de estudio

En una investigación experimental es necesario la presencia de tres principios esenciales: 1) la manipulación de variables, 2) medir el efecto de la variable independiente sobre la variable dependiente, 3) control de la validez interna del experimento (Sampieri et al., 2014). El objeto de estudio de la presente investigación fue la reflectancia espectral de las superficies urbano/arquitectónicas y su influencia sobre el efecto de la ICU.

Por consiguiente, tras realizar la revisión de la literatura pertinente se identificó el predominio por el análisis de las propiedades ópticas de los materiales fríos: reflectancia solar/espectral y emitancia térmica, asimismo, diversos estudios han correlacionado los valores de temperatura superficial con las variables climáticas del ambiente en que los materiales fríos se ponen a prueba.

A partir de lo anterior se plantearon las variables de la investigación por medio del proceso de operacionalización de variables, tal cual se aprecia en la Tabla 7, las variables independientes corresponden a factores climáticos, siendo estos la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa, así como también se considera como variable independiente a la temperatura superficial de las muestras prototipo y su temperatura de transición. En cuanto a las variables dependientes, estas corresponden a los parámetros ópticos de las muestras prototipo: reflectancia espectral y emitancia térmica.

Tabla 7

Operacionalización de variables

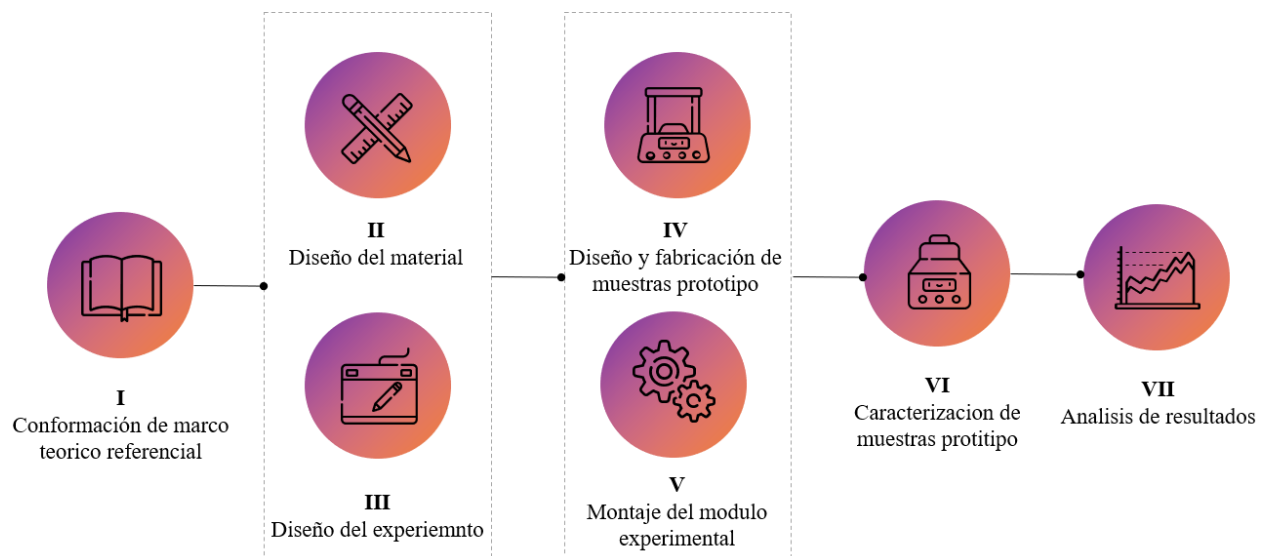
Variable-Indicador	Tipo de variable	Unidad de medición	Instrumento de medición
Temperatura de bulbo seco	Independiente	°C	Sensor de temperatura de bulbo seco
Temperatura superficial	Independiente	°C	Sensor de temperatura superficial
Temperatura de transición	Independiente	°C	Sensor de temperatura superficial
Humedad relativa	Independiente	%	Sensor de humedad relativa
Reflectancia espectral	Dependiente	%	Espectrofotómetro UV-VIS-NIR
Emitancia térmica	Dependiente	%	Cámara termográfica

3.3. Proceso metodológico

El proceso metodológico de esta investigación se integró por siete etapas principales. La secuencia cronológica para la ejecución de cada una de las etapas consistió en primer lugar de la revisión de la literatura (etapa I), el diseño de las muestras prototipo (etapa II), el diseño del experimento (etapa III), el diseño y fabricación de muestras prototipo (etapa IV), el montaje del módulo experimental (etapa V), la caracterización de muestras prototipo (VI) y, finalmente el análisis de los resultados (etapa VII). Lo anterior se presenta a manera de síntesis en la Figura 32.

Figura 32

Secuencia cronológica del proceso metodológico



Cada una de estas siete etapas se integró por una serie de procesos requeridos para el cumplimiento de los objetivos de investigación. En la etapa I se realizó: a) la exploración de bases de datos, b) la selección de manuscritos originales relevantes para el campo de estudio, c) la revisión sistemática de la literatura, d) el análisis de tendencias, e) el reconocimiento de las disciplinas que describen la ciencia de materiales: estructura, propiedades y procesos, composición y desempeño. Todos estos procesos cumplieron con el propósito de construir un marco de referencia sólido, el cual permitió la correcta toma de decisiones en las etapas posteriores.

En la etapa II se llevó a cabo lo siguiente: f) el mapeo de zonas climáticas locales, g) la definición del elemento urbano arquitectónico, h) el análisis de flujos de relación entre las

clasificaciones climáticas Köppen Geiger y los materiales fríos evaluados en la literatura y, por último, i) el cálculo de la temperatura sol aire. Lo anterior permitió la obtención de la información requerida para definir las características de un material prototipo.

En la etapa III fueron efectuadas las siguientes actividades referentes al diseño del experimento: j) la composición del recubrimiento termocrómico, k) la configuración de un sistema termoeléctrico para la regulación de la temperatura, l) el diseño y la fabricación de un porta muestras, m) protocolo para el diseño y fabricación de muestras prototipo, n) protocolo para análisis de espectrofotometría, o) protocolo para análisis de termografía, y por último, p) protocolo para el análisis mecano-óptico de topografía.

Durante la etapa IV se ejecutaron los las actividades planteadas en el diseño del experimento, primeramente, la preparación de los sustratos (q), seguido de la deposición de los recubrimientos (r). Esta etapa fue sumamente importante ya que en ella se obtuvieron las muestras prototipo para su posterior caracterización. En la etapa V se realizó la fabricación del porta muestras (s) y el ensamble del sistema termoeléctrico (t), obteniéndose el módulo experimental para el proceso de caracterización.

Una vez concretada la fabricación de muestras y el ensamble del módulo experimental se procedió a la etapa VI, la cual consistió en la caracterización de las muestras prototipo mediante tres técnicas, un análisis de espectrofotometría (u), un análisis de termografía (v) y un análisis mecano óptico de topografía (w). Finalmente, en la etapa VII se llevó a cabo el análisis de los resultados obtenidos de las técnicas de caracterización antes mencionadas.

En la Tabla 8 se describen todos los procesos involucrados con cada una de las siete etapas de la investigación anteriormente mencionadas, así como los instrumentos y herramientas necesarios para su ejecución.

Tabla 8

Proceso metodológico de la investigación

Etapa	Procesos	Instrumentos-Herramientas
I. Conformación de marco teórico referencial	a) Exploración de bases de datos	• Base de datos Scopus
	b) Selección de manuscritos originales	• Base de datos Web Of Science
	c) Revisión sistemática de la literatura	• ①
	d) Análisis de tendencias	
	e) Ciencia de materiales: estructura, propiedades, procesos, composición y desempeño	
II. Diseño del material	f) Mapeo de zonas climáticas locales	• ①
	g) Definición de elemento urbano arquitectónico	• ②
	h) Análisis de flujo entre zona climática y material.	• ③
	i) Cálculo de la temperatura sol aire	• Archivo EPW
		• Plantilla WUDAPT
III. Diseño del experimento		• Google earth
	j) Composición de recubrimiento termocrómico	• CNC
	k) Configuración de sistema termoelectrico	• Balanza de precisión
	l) Diseño y fabricación de porta-muestras	• Sonificador
	m) Protocolo para el diseño y fabricación de muestras prototipo	• Instrumento de recubrimiento por centrifugado
	n) Protocolo para el análisis de espectrofotometría	• Plato caliente digital
	o) Protocolo para el análisis de termografía	• Impresora 3D
p) Protocolo para el análisis mecano-óptico de topografía	• ④	
IV. Diseño y fabricación de muestras prototipo	q) Preparación de sustratos	• CNC
	r) Deposición de recubrimientos	• Balanza de precisión
V. Montaje de modulo experimental		• Sonificador
		• Instrumento de recubrimiento por centrifugado
		• Plato caliente digital
	s) Fabricación de porta muestras	• Impresora 3D
	t) Ensamblaje de sistema termoelectrico	• Fuente de poder
		• Control PID
		• Bomba sumergible
		• Agua desionizada
		• Termopares
		• Registrador de datos
VI. Caracterización de muestras	u) Análisis de espectrofotometría	• Modulo experimental
	v) Análisis de termografía infrarroja	• Espectrofotómetro
	w) Análisis mecano-óptico de topografía	• Esfera de integración
VII. Análisis de resultados		• Cámara termográfica
		• Tripie
		• ④
	x) Fabricación de muestras prototipo	• ⑤
	y) Análisis de espectrofotometría	• ⑥
	• ⑦	
	z) Análisis de termografía	
	aa) Análisis mecano-óptico de topografía	

Nota.

- ① Software de análisis y visualización de datos Power Bi
- ② Software de simulación de flujo térmico en régimen estacionario OPAQUE
- ③ Software para el cálculo e interpolación de datos climáticos Meteonorm
- ④ Microscopio de fuerza atómica
- ⑤ Software de análisis de imágenes radiométricas FLIR tools
- ⑥ Software de análisis mecano-óptico Nano surf Easyscan 2
- ⑦ Software de análisis y visualización de datos Origin

3.4. Diseño del material

Para el diseño del recubrimiento multicapa, fueron atendidos tres procesos clave; primeramente, se analizaron los flujos de relación entre los materiales fríos y las zonas climáticas (clasificación Köppen Geiger) en donde se han evaluado dichos materiales en la literatura contemporánea, en segundo lugar, se realizó el mapeo de zonas climáticas locales para la ciudad de Ensenada, B.C. y en tercer lugar se calculó la temperatura sol aire para el sistema constructivo en donde se pretende aplicar el material prototipo.

3.4.1. Mapeo de zonas climáticas locales

Una zona climática local (LCZ²⁵) hace referencia a un conjunto de calles o manzanas que comparten similitudes respecto de su entorno construido, a diferencia de los microclimas urbanos, una zona climática comprende dimensiones mayores a 200 m en el menor de sus extremos. La clasificación LCZ se conforma por 17 tipos de zonas climáticas, en donde las zonas de la letra A a la letra G se caracterizan de acuerdo a los tipos de superficie, y los grupos del número 1 al 9 se caracterizan por la morfología urbana (véase Figura 33). El sistema de clasificación LCZ considerará también ciertas propiedades efímeras de la cobertura del suelo, las cuales cambian de acuerdo a determinados patrones climáticos, prácticas agrícolas o ciclos estacionales como es el caso del cambio de índice foliar en las distintas estaciones, cubiertas de nieve durante el invierno y la humedad del suelo (Steward y Oke, 2012).

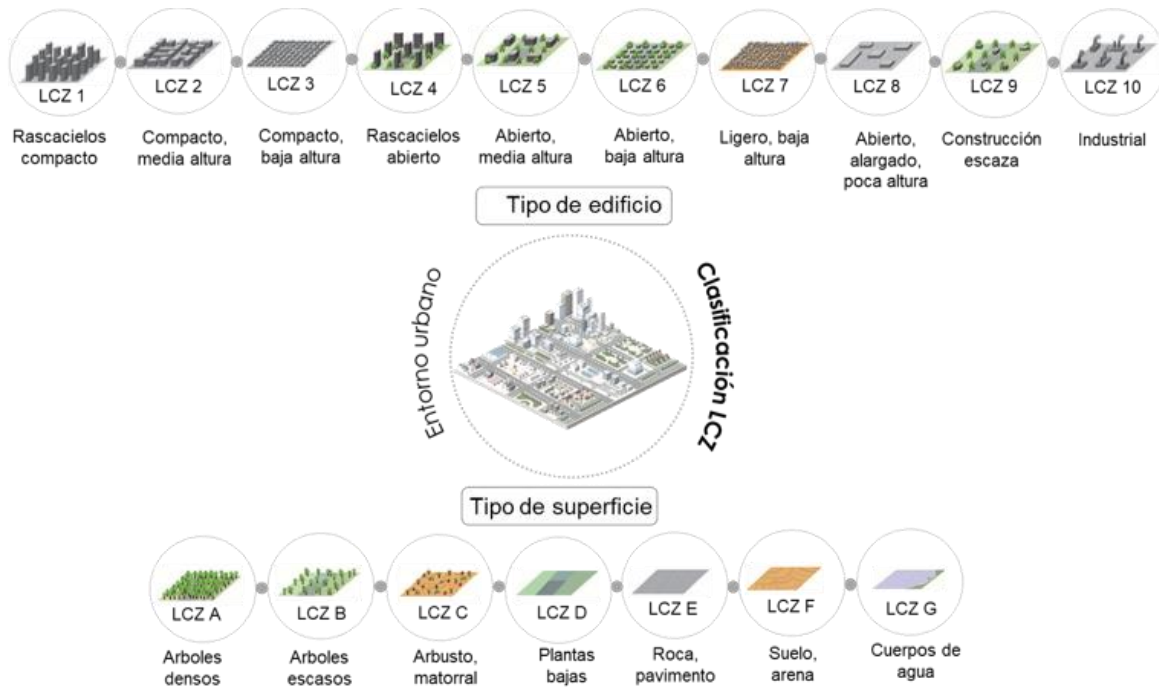
El trazo de las LCZ para la ciudad se Ensenada fue realizado a partir de una plantilla proporcionada por la base de datos urbanos WUDAPT²⁶, plataforma oficial para la realización de este tipo de elementos gráficos. Esta plantilla consiste en un archivo KMZ en donde se proporcionan carpetas para cada una de las 17 zonas climáticas. Los criterios para delimitar las distintas zonas de la ciudad fueron en primer lugar, la densidad urbana, seguido de la altura de los edificios y finalmente el tipo de cobertura del suelo, asimismo, de acuerdo con las recomendaciones de WUDAPT se identificaron como zonas climáticas aquellas áreas de la ciudad con características homogéneas no menores a 200 m en su lado más corto.

²⁵ Local climate zones

²⁶ World Urban Database and Access Portal Tools

Figura 33

Clasificación de zonas climáticas locales

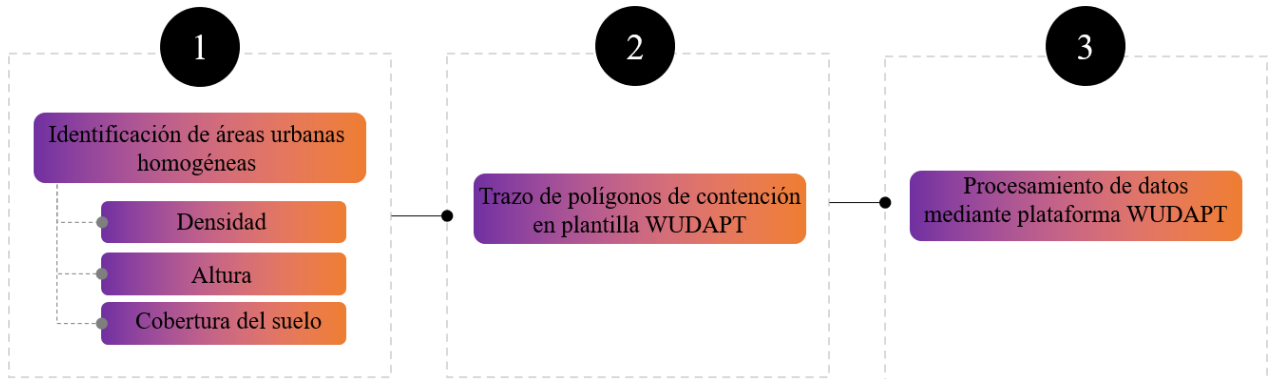


Nota. Elaborada a partir de Stewart y Oke, 2012.

El proceso de trazado para la delimitación de las zonas climáticas consistió en dibujar polígonos de contención en la plantilla de trabajo por medio del software Google Earth, asignando cada uno de estos polígonos en su carpeta correspondiente. Durante este procedimiento fue importante también omitir la delimitación de áreas de la ciudad mediante polígonos complejos, ya que esto podría llegar a dar resultados erróneos al momento de generar el mapa. Finalmente, con el mismo propósito de evitar resultados incorrectos en la visualización final, se aseguró una distancia de amortiguamiento entre los polígonos de 100 m. Una vez concluido el trazo de los polígonos se cargó el archivo KMZ a la plataforma WUDAPT en donde este fue procesado. Los pasos previamente mencionados se muestran en la Figura 34.

Figura 34

Método para la delimitación geográfica de zonas climáticas locales

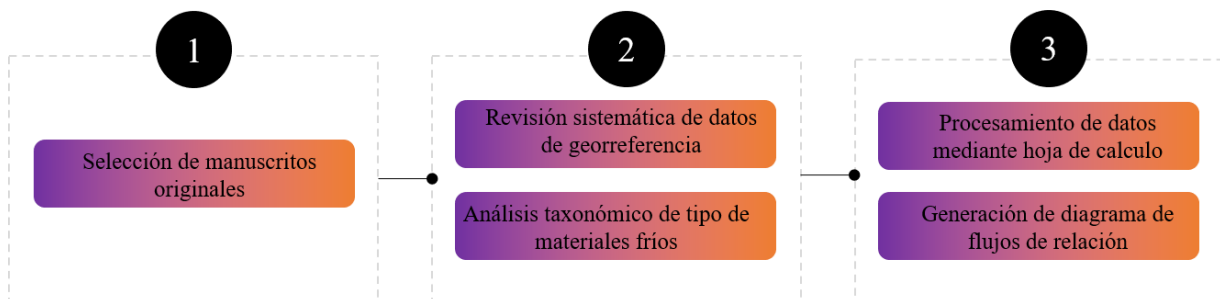


3.4.2. Análisis de flujo entre zona climática y materiales fríos

La presente investigación fue realizada en la ciudad de Ensenada, B.C. caracterizada por un clima tipo semiárido frío o templado (BSk) de acuerdo con la clasificación climática de Köppen Geiger (Kottek et al., 2006); con el propósito de seleccionar el tipo de material frío con mayor potencial para estas condiciones climáticas se condujo un análisis de flujos entre los materiales fríos estudiados en otras investigaciones con respecto a la zona climática. Para esto 95 manuscritos originales fueron revisados sistemáticamente identificando los datos de georreferencia de las ciudades o sitios de estudio y la clasificación climática a la que pertenecen (véase apéndice A). Para lograr un mayor entendimiento de estas relaciones fue generado un diagrama de flujos desarrollado mediante el software de visualización y análisis de datos Power BI. Los pasos anteriores se muestran en la Figura 35.

Figura 35

Procedimiento para el análisis de flujos entre tipos de materiales y zonas climáticas



3.4.3. Cálculo de la temperatura sol aire

La temperatura sol aire ($T_{sol\ aire}$) se define como una temperatura ficticia, la cual representa la temperatura del aire exterior que, en la ausencia de todos los cambios de radiación, da la misma tasa de entrada de calor en la superficie como sería la combinación de radiación solar incidente, el intercambio de energía radiante con el cielo así como otros alrededores exteriores, y el intercambio de calor convectivo con el aire exterior (Al-Saud, 2009).

Como parte del diseño del material termocrómico, en esta investigación se realizó el cálculo de la $T_{sol\ aire}$ por medio del software de simulación de flujo térmico en régimen estacionario OPAQUE, en donde fueron ingresados los elementos del sistema constructivo de una cubierta arquitectónica. De acuerdo con el manual de usuario del programa OPAQUE, la $T_{sol\ aire}$ se determina a partir de la siguiente formula:

Ecuación 17

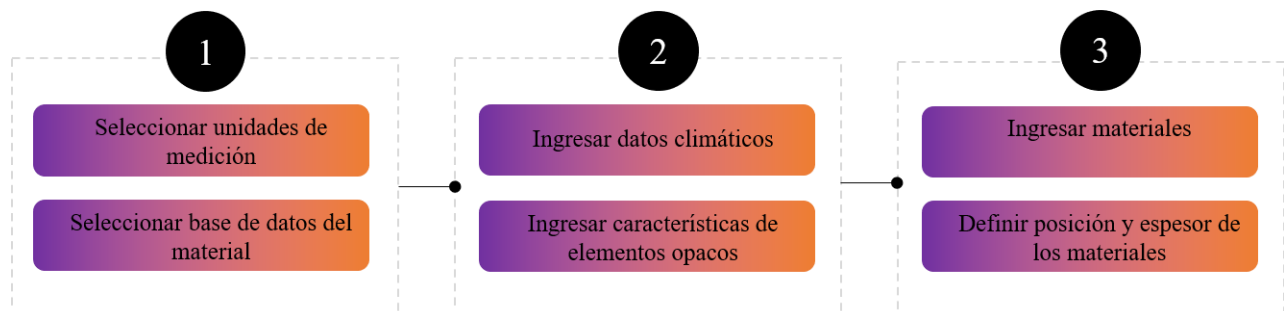
Cálculo de la temperatura sol aire

$$T_{sol\ aire} = \frac{\text{Temperatura exterior} + \text{Absortividad de la superficie} \cdot \text{Radiacion total de la superficie}}{\text{Coeficiente de transferencia de calor}}$$

El procedimiento para calcular la $T_{sol\ aire}$ consistió en seleccionar el tipo de unidades de medición y el tipo de base de datos del material, seguido de los datos climáticos y las características de los elementos opacos. Finalmente, se ingresaron las capas correspondientes a cada uno de los materiales del sistema constructivo, especificando su posición y espesor. Lo anterior se presenta en la Figura 36.

Figura 36

Cálculo de la temperatura sol aire



3.5. Diseño del experimento

En esta sección se describen los procesos metodológicos en relación a los criterios y toma de decisiones atendidas al momento de plantear y diseñar el experimento de la presente investigación. En este sentido el diseño del experimento fue conformado por las siguientes fases: i) composición del recubrimiento termocrómico, ii) diseño y fabricación de muestras, iii) configuración de sistema termoelectrico, iv) diseño y fabricación de porta muestras, v) protocolo para el análisis de espectrofometría, vi) protocolo para el análisis de termografía IR, vii) protocolo para el análisis mecano-óptico de topografía, lo anterior se sintetiza en la Figura 37.

Figura 37

Diseño del experimento



3.5.1. Composición de recubrimiento termocrómico


La composición del recubrimiento con propiedades termocrómicas, referido en este documento como recubrimiento termocrómico consistió en una pintura elaborada mediante un aglutinante y pigmentos termocrómicos; durante la revisión de la literatura se identificó que dentro de la categoría de materiales termocrómicos existen dos subcategorías denominadas como sistemas con colorante leuco y sistemas sin colorante leuco, referidos en la literatura internacional como *leuco dye-based* y *non leuco dye-based*. Dicho lo anterior, el primer paso en la composición de este recubrimiento fue la selección del tipo de material termocrómico. El segundo punto atendido fue la selección del tipo de compuesto termocrómico, mediante el análisis de manuscritos originales y la identificación de los componentes más utilizados, sus características térmicas y cromáticas.

Una vez seleccionado el tipo de compuesto termocrómico se tomó en consideración el resultado del cálculo de la temperatura sol aire con el fin de utilizar este valor como una referencia para la temperatura de transición, posteriormente se hizo una exploración de productos en el mercado con estas características. Como compuesto aglutinante, se tomó también como referencia lo sugerido en la literatura, principalmente en aquellas investigaciones en donde se utilizaron compuestos termocrómicos similares al seleccionado en la presente investigación. Otro criterio de selección para el aglutinante fueron las recomendaciones del fabricante, con la finalidad de asegurar la correcta dispersión de los componentes termocrómicos.

Una vez definidos los productos más adecuados se procedió a la producción del recubrimiento termocrómico, definiendo inicialmente las concentraciones de cada producto, para asegurar la precisión de los gramos añadidos se utilizó una balanza de precisión de la marca OHAUS, de la línea Pioneer, modelo PA163, las especificaciones del instrumento se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9

Especificaciones técnicas de la balanza de precisión PA163, OHAUS

Especificaciones técnicas	Imagen de referencia
Capacidad máxima 162 g	
Sensibilidad 1 mg	
Tiempo de estabilización 2 s	
Entorno de trabajo 10 °C – 30 °C, 80 % HR, sin condensación	

El procedimiento para la elaboración del recubrimiento consistió en primer lugar en estimar la masa (gramos) de ambos productos mediante una balanza de precisión (Figura 38), primeramente, se vertió en un vaso de precipitados la cantidad de 40 ml, una vez conocido su peso en gramos se calculó el 10 % y el 15 % correspondiente para posteriormente agregar dicho porcentaje de pigmentos al aglutinante. La proporción de aglutinante y pigmentos TC se muestra en la Tabla 10.

Figura 38

Medición de masa de los componentes



Tabla 10

Concentración de pigmentos TC propuesta para el diseño del recubrimiento TC

Nomenclatura	Aglutinante (g)	Pigmentos TC microencapsulados (g)
TC-10 %	43.86	4.38
TC-15 %	43.86	6.57

Posteriormente se llevó a cabo la incorporación de ambos compuestos con una varilla de vidrio, este paso se realizó de manera manual y con movimientos constantes para evitar la formación de grumos.

3.5.2. *Diseño y fabricación de muestras*

3.5.2.1. *Definición de sustratos*

En el presente estudio se entiende por sustrato al material sobre el cual serán aplicados los recubrimientos correspondientes a cada muestra prototipo; los recubrimientos que serán depositados sobre los sustratos fueron de tres tipos: un recubrimiento altamente reflectivo, un recubrimiento termocrómico y un recubrimiento de protección UV. En la sección 4.1. se podrán apreciar de forma detallada las características de cada uno de estos recubrimientos. Para definir las dimensiones y el tipo de sustrato se tomaron en cuenta los siguientes puntos:

- Las dimensiones no debían ser menores al área de apertura de la esfera de integración del espectrofotómetro ($\phi 3/4''$), lo anterior se explica con mayor detalle en la sección 3.5.5: Protocolo para el análisis de espectrofotometría.
- Las dimensiones no debían ser menores a la plataforma giratoria del dispositivo de recubrimiento por centrifugado ($\phi 45$ mm).
- El material debía caracterizarse por un alto valor de conductividad térmica con el fin de garantizar una distribución homogénea de la temperatura en la muestra prototipo una vez colocada sobre el sistema termoeléctrico (véase sección 3.5.4).

El material seleccionado como sustrato fue el aluminio 5052, el cual es un tipo de aluminio que contiene además del aluminio (97.20 %) componentes como el magnesio (2.5 %) y el cromo (0.25 %), este se caracteriza por una alta conductividad térmica, con un valor de 137 W/mK (Teknika4, 2022), el cual facilitó el intercambio de calor durante la ejecución del experimento.

Una vez seleccionado el tipo de material para el sustrato, se llevó a cabo el corte del mismo en función de las dimensiones requeridas, esto por medio de una máquina de corte de tipo control numérico por computadora (CNC), posteriormente y previo la deposición de los recubrimientos los sustratos fueron desinfectados con un instrumento de limpieza ultrasónica,

también llamado sonicador ultrasónico, el equipo utilizado fue de la marca Branson, modelo 1510 (véase Tabla 11).

Tabla 11

Especificaciones técnicas del sonicador ultrasónico 1510, Branson

Especificaciones técnicas	Imagen de referencia
Capacidad del tanque	1.89 L
Tamaño del tanque	9.2 cm x 15.2 cm x 15.2 cm
Precisión de temperatura	±4 °C
Rango de temperatura	Ambiente a 69 °C



3.5.2.2. Técnicas de deposición

La etapa de fabricación de muestras consistió en la deposición de los recubrimientos sobre los sustratos seleccionados mediante la técnica de recubrimiento por centrifugado también conocida como *spin coating*, la cual consiste en la dispersión de soluciones sobre un sustrato por medio del impulso de la fuerza centrífuga (Tyona, 2013). El instrumento requerido para la deposición de los recubrimientos fue un dispositivo de recubrimiento por centrifugado, también denominado *Spin coater*. Para esta investigación se utilizó el instrumento WS-650MZ-23NPPB, de la marca Laurell Technologies (véase Tabla 12), asimismo fue requerida una bomba de vacío y el suministro de aire comprimido (CDA²⁷) para asegurar la operación del equipo, ya que estos permiten la sujeción de la muestra en la plataforma giratoria y son un requerimiento para la operación del instrumento. La deposición de los productos correspondientes a cada capa fue mediante el uso de agujas graduadas.

Tabla 12

Especificaciones técnicas del instrumento Spin Coater, WS-650MZ-23NPPB

Especificaciones técnicas	Imagen de referencia
Máxima velocidad de rotación	12000 rpm (para obleas de $\varnothing 100\text{mm}$)
Vacío requerido	25–28"
CDA requerido	60-70 PSI



²⁷ Compress Dry Air

Durante esta etapa fue también considerada la preparación de muestras por medio de la aplicación en aerosol de la capa protectora UV, como parámetros para la aplicación homogénea del producto se establecen los siguientes puntos:


- Distancia entre el aplicador y la muestra prototipo
- Número de capas aplicadas
- Dirección de la aplicación: dirección lineal, dirección en zigzag.

Por último, una vez obtenidas las muestras prototipo se caracterizó su espesor mediante un vernier digital IP54 de la marca Proster (véase Tabla 13).

Tabla 13

Especificaciones técnicas del vernier digital IP54

Especificaciones técnicas	Imagen de referencia
Rango de medición	0-150 mm/0-6", 0-200 mm/0-8"
Resolución	0.01 mm/0.0005"
Precisión	± 0.002 mm/0.001"



3.5.3. *Diseño y fabricación de porta muestras*

Con la finalidad de asegurar el soporte de las muestras prototipo durante la etapa de caracterización, se propuso el diseño de un portamuestras, el cual consistió en una pieza de determinadas dimensiones sobre la cual fueron colocadas las muestras prototipo para posteriormente ser colocadas dentro de un espectrofotómetro para la medición de la reflectancia difusa. Similarmente, el uso de un portamuestras permite también la colocación de las muestras prototipo para la medición de la emitancia. Dado que ambas técnicas de caracterización requieren de equipos de medición específicos, la geometría del portamuestras debe responder a los siguientes requerimientos técnicos:

- El área total la de pieza no debe sobrepasar el espacio disponible dentro de la esfera de integración del espectrofotómetro

- La pieza debe contar con el espacio suficiente para la colocación de las muestras prototipo
- La pieza debe contar con una abertura cuyas dimensiones permitan el contacto entre la muestra prototipo y la apertura de la esfera de integración
- Deben integrarse dos imanes de $\varnothing 15$ mm para el montaje del portamuestras en el sistema termoeléctrico (véase sección 3.5.4).
- Debe considerarse la preparación de aberturas en puntos estratégicos para permitir el ensamblaje de los sensores de temperatura del sistema termoeléctrico (véase sección 3.5.4).

La fabricación del porta muestras fue efectuada mediante la técnica de manufactura por adición, también conocida como impresión 3D, la cual consiste en la deposición de capas sucesivas, para esto se utilizó la impresora Prusa i3 MK3S (véase Tabla 14).

Tabla 14

Especificaciones técnicas de la impresora 3D Prusa i3 MK3S

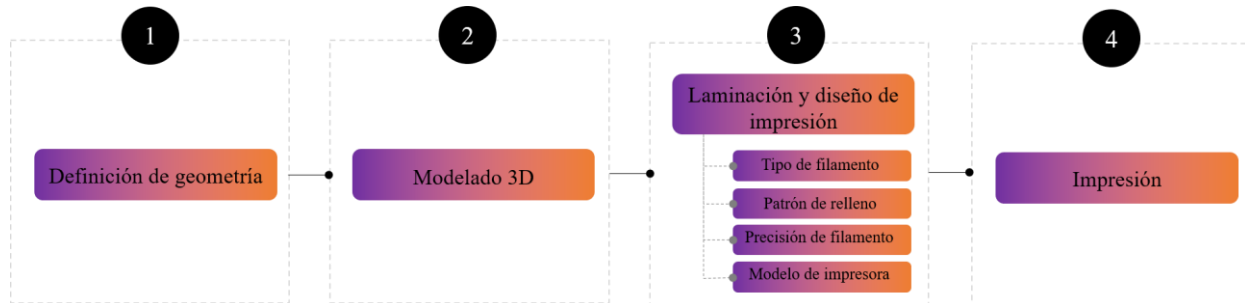
Especificaciones técnicas	Imagen de referencia
Volumen de construcción	25×21×21 cm
Altura de la capa	0.05 - 0.35 mm
Boquilla	0.4 mm por defecto
Diámetro de filamento	1.75 mm
Materiales compatibles	Amplia gama de termoplásticos, incluidos PLA, PETG, ASA, ABS, PC (policarbonato), CPE, PVA/BVOH, PVB, HIPS, PP (polipropileno), Flex, nGen, nailon, relleno de carbono, relleno de madera y otros materiales rellenos.



El procedimiento para la impresión aditiva del porta muestras consistió primeramente en dibujar su geometría por medio del software de modelado 3D Sketchup, posteriormente el modelo 3D de la pieza fue trasladado al software Prusa para su laminado y configuración de los parámetros de impresión, especificando el tipo de filamento, el patrón de relleno, la precisión del filamento y el modelo de la impresora utilizada. La secuencia de los pasos requeridos para el diseño y fabricación del portamuestras se ejemplifican la Figura 39.

Figura 39

Procedimiento para la impresión 3D del porta muestras



3.5.4. Configuración de sistema termoeléctrico para el control de la temperatura

Para la medición de la reflectancia espectral y emitancia térmica de las muestras prototipo se propuso el uso de un sistema termoeléctrico para la caracterización de las mismas en distintos intervalos de temperatura.

Dada la naturaleza de la investigación, fue fundamental conocer el comportamiento de las muestras prototipo en condiciones de temperatura superficial controladas, así como también fue importante que dicho sistema logrará adaptarse al funcionamiento de los instrumentos utilizados para la caracterización, por lo que al momento de seleccionar los componentes del sistema termoeléctrico se tomaron en consideración los siguientes puntos:

- Las dimensiones del sistema no debían sobrepasar las dimensiones del área de medición del espectrofotómetro UV-VIS-NIR.
- El sistema debía permitir la fácil maniobra de las muestras al momento de tomar las mediciones.
- Debía asegurarse la distribución homogénea del calor desde el sistema hacia la muestra.
- Debía evitarse el sobrecalentamiento del sistema para el funcionamiento eficiente del mismo.
- Debía permitirse la manipulación y el control de la temperatura de la muestra.
- Debía facilitarse el registro de la temperatura de bulbo seco, la temperatura superficial y la humedad relativa al momento de la medición.

- Debía permitirse el contacto entre la muestra y la apertura de la esfera de integración.

Una vez establecidos los puntos anteriores, se determinó el diseño del sistema termoeléctrico, los resultados se muestran con mayor detalle en la sección 4.5: Montaje del módulo experimental.

3.5.5. Protocolo para el análisis de espectrofotometría

Para efectos de la presente investigación, la normativa de referencia atendida para el diseño del experimento fue el ASTM E-903: Método de prueba estándar para absorción, reflectancia y transmitancia solar de materiales mediante esferas integradoras, en el cual, y como su nombre lo indica, se establecen los lineamientos para el uso de espectrofotómetros y esferas de integración.

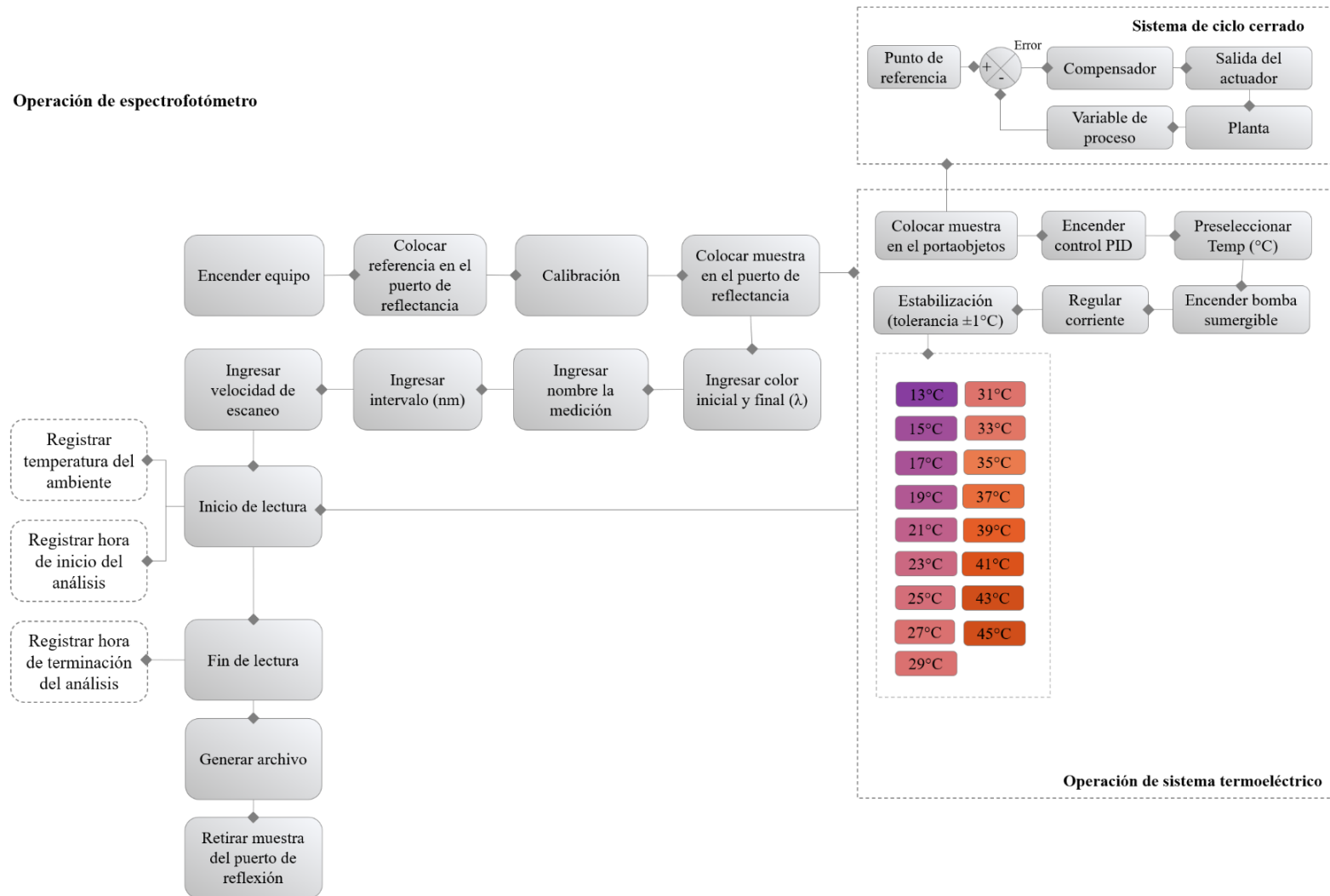
El procedimiento para la medición de la reflectancia difusa consistió en, primeramente, el encendido y la calibración automática del espectrofotómetro, para esto se utilizó una muestra de referencia con un alta reflectividad ya conocida; una vez calibrado el equipo de forma automática se tomó una primera medición con la muestra de referencia, esta medición cumple con el propósito de mantener un registro de la calibración del instrumento durante el tiempo de la medición, para esto se programó manualmente el equipo seleccionando el color inicial y final de la medición, en otras palabras el rango de longitud de onda, así como también se seleccionaron los intervalos de medición, y la velocidad de la medición.

Sin embargo, debido los intereses del presente estudio, fueron necesarias una serie de adecuaciones para la medición de la reflectancia difusa en distintos intervalos de temperatura, de manera que el método propuesto constó de además de la calibración automática y manual del equipo, de la adición de un sistema termoeléctrico para la regulación de la temperatura de las muestras prototipo, dicho sistema permitió medir la reflectancia de las muestras antes, durante y después de la temperatura de transición. En la Figura 40 se muestran los pasos atendidos para la medición de la reflectancia difusa en intervalos de temperatura controlada.

Figura 40

Protocolo para el análisis de espectrofotometría





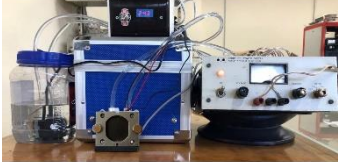
Operación de espectrofotómetro



Los instrumentos y herramientas requeridos para la medición de la reflectancia fueron un espectrofotómetro UV-VIS-NIR de la marca Perkin Elmer, modelo 330 (véase Tabla 15), una esfera de integración de $\varnothing 10$ cm de la marca Hitachi, modelo 4001541, una muestra de referencia compuesta por carbonato de magnesio ($MgCO_3$) compactado, las muestras prototipo, el sistema termoeléctrico desarrollados en esta investigación.

Tabla 15

Instrumentos y herramientas requeridas para análisis de espectrofotometría

Instrumento/herramienta	Imagen de referencia
Espectrofotómetro UV-VIS-NIR Perkin Elmer 330	
Esfera de integración $\varnothing 10$ cm, Hitachi, modelo 4001541	
Muestra de $MgCO_3$	
Muestras prototipo	
Sistema termoeléctrico	

3.5.6. Protocolo para el análisis de termografía infrarroja

Como parte de la etapa de caracterización de las propiedades ópticas de las muestras desarrolladas en esta investigación, se realizó un análisis de termografía IR para estimar los valores de emitancia correspondientes a cada una de las muestras: AR-04, AR-TC-01, y AR-TC-UV-04. De acuerdo con el ASTM E 1933 99a, primeramente, se seleccionó un material modificador de superficie, el cual cumplió con la función de cambiar la emitancia de la muestra a medir. El material modificador de superficie sugerido por las prácticas de Teledyne FLIR es la cinta aislante de la marca 3M modelo 88, este material ha sido caracterizado por dispositivos de la marca FLIR con un valor ϵ de 0.96 para longitudes de onda de 8 a 14 μm y para valores de temperatura menores a 105 °C (véase apéndice B), además de también ser comúnmente utilizado en la literatura como material modificador de superficie (Soudian et al., 2020), Para llevar a cabo el cálculo de la emisividad se recubrió el sustrato con la cinta aislante. En la Figura 41 se muestra el producto y la muestra previamente descritos.

Figura 41

Material seleccionado como modificador de superficie




Nota. a) material modificador de superficie: cinta aislante marca 3M modelo 88, b) muestra del material modificador de superficie.

El método empleado fue el de termómetro sin contacto; en el que el primer paso para calcular la emitancia térmica es colocar el termómetro sobre un tripie, asegurando su soporte, el termómetro utilizado fue una cámara termográfica de la marca FLIR modelo C5, en la Tabla 16 se describen las especificaciones del instrumento. La cámara y el tripie se colocaron a una distancia de 1 m de la muestra asegurando el mayor acercamiento posible respecto a los parámetros del instrumento, asimismo se aseguró que el lente de la cámara se encontrara en línea recta y a la misma altura que la muestra a medir, una vez que la altura de ambos elementos fue la misma se enfocó el punto de medición.

Tabla 16

Especificaciones técnicas del equipo FLIR C5

Especificaciones técnicas		Imagen de referencia
Precisión	A temperatura ambiente, de 15 a 35 °C (de 59 a 95 °F) y temperatura del objeto superior a 0 °C (32 °F), de 0 a 100 °C (de 32 a 212 °F): ±3 °C (±5,5 °F), de 100 a 400 °C (de 212 a 752 °F): ±3 %	
Distancia focal mínima	Térmico: 0,1 m (3,94"), MSX: 0,3 m (11,8")	
Frecuencia de la imagen	8.7 Hz	
Rango espectral	8 a 14 μm	

El siguiente paso fue colocar la muestra modificadora de superficie en el portaobjetos conectado al sistema termoelectrico, para esto se aplicó una capa de pasta térmica en la parte posterior de la muestra, asegurando el máximo contacto para asegurar la precisión de la medición. Una vez posicionada la muestra sobre el portaobjetos se colocó una superficie con un acabado mate sobre los elementos reflectivos del portaobjetos.

Como siguiente paso se seleccionó la temperatura superficial deseada en el control PID, y se dio un tiempo de 15 minutos para que las superficies en contacto alcanzarán el equilibrio térmico. Posteriormente se configuraron los parámetros de medición de la cámara con respecto a la muestra modificadora de superficie, asignando el valor de emitancia ya conocido, la temperatura del ambiente, la humedad relativa y la temperatura reflejada la cual se definió en función de la temperatura del ambiente, para esto se tomaron mediciones en sitio mediante un dispositivo data logger de la marca Onset modelo U12-012. Una vez que la temperatura aparente de la cámara termográfica y la temperatura del control PID alcanzaron valores equivalentes se tomó el registro de la temperatura aparente de la muestra modificadora de superficie con la cámara termográfica.

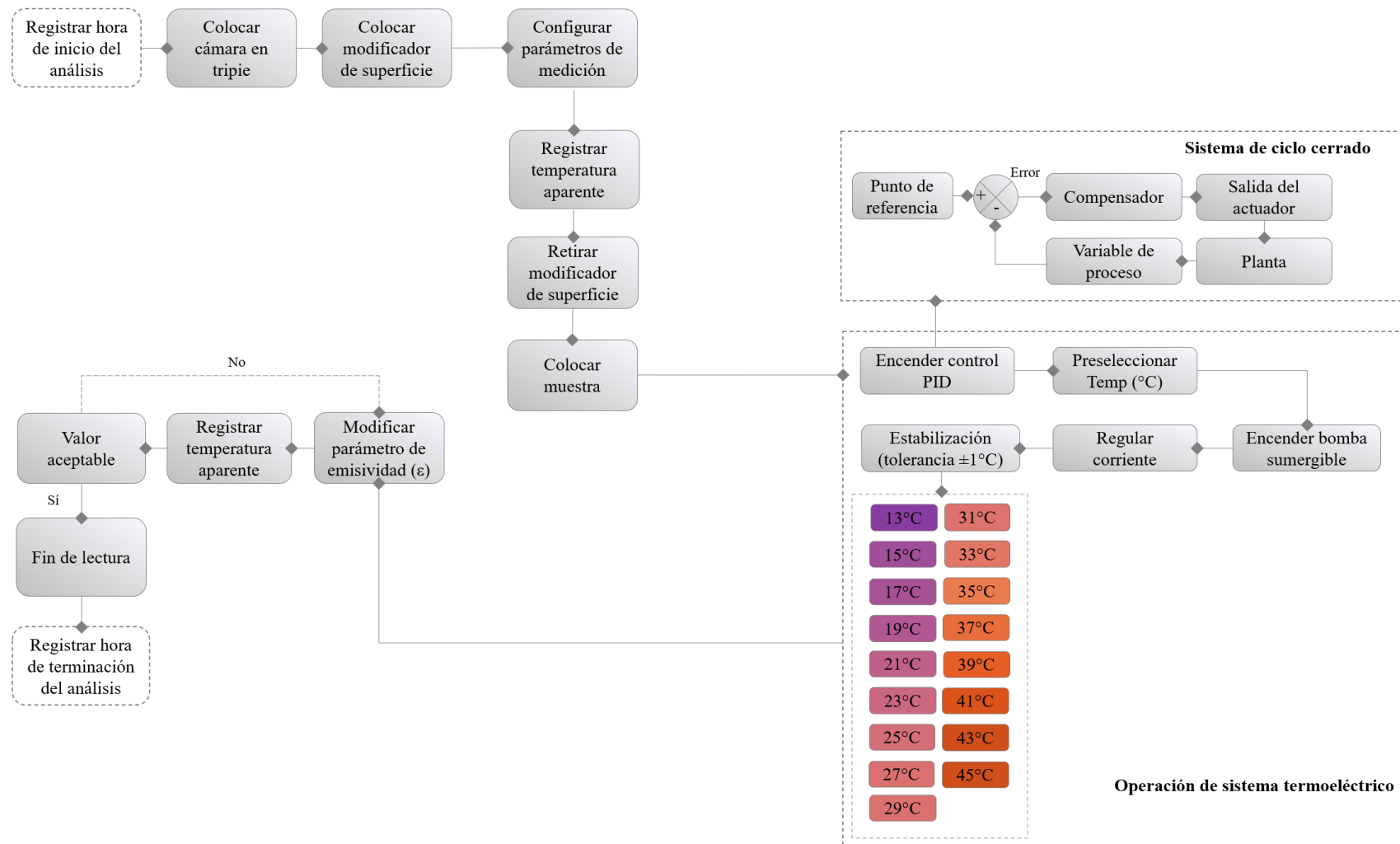
El siguiente paso fue la sustitución de la muestra modificadora de superficie por las muestras prototipo (AR-04, AR-TC-01, AR, TC-UV-04) y esperar 15 minutos para que la muestra y la placa de aluminio alcanzaran el equilibrio térmico. Para conocer el valor de emisividad de cada una de las muestras se ingresaron valores hipotéticos de emitancia hasta que la temperatura de la muestra alcanzó la temperatura registrada en la muestra modificadora de

superficie y en el control PID. Lo anterior se realizó un total de tres veces por muestra para seleccionar como correcto el valor de emitancia cuya temperatura aparente se aproximará más a la registrada en la muestra modificadora de superficie y al control PID, esto de acuerdo con lo sugerido por el ASTM E 1933. En la Figura 42 se ilustra la secuencia de los pasos requeridos para la medición del valor ϵ . Finalmente, una vez registrada la temperatura aparente del material modificador de superficie y las muestras, se procesaron los datos mediante el software *FLIR Tools* para el análisis de imágenes radiométricas y la realización de reportes de inspección por medio de la selección de ventanas de temperatura y puntos de medición. Los resultados de este análisis se encuentran en la sección 4.7. Análisis de termografía infrarroja.

Figura 42

Protocolo para el análisis de termografía infrarroja

Operación de cámara termográfica



3.5.7. Protocolo para el análisis mecano-óptico de la topografía


En la presente investigación, la técnica AFM fue utilizada para el análisis mecano-óptico de la topografía de las muestras prototipo. Para esto se utilizó el microscopio Nanosurf *Easyscan 2 Controller*, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 17, así como el software Nanosurf *Easyscan 2* para la configuración del equipo y el análisis de los resultados.

Los pasos para el análisis de la topografía de las muestras fueron en un principio encender el controlador *Easyscan 2*, conectarlo a un equipo de cómputo con el software *Easyscan 2* y esperar a que todas las luces de estado fueran activadas; como tercer paso se seleccionó el modo de funcionamiento del equipo; posteriormente se instaló el cantiléver por medio de pinzas de precisión.

Para la preparación de las muestras prototipo se retiraron las partículas de polvo de la misma o cualquier otro tipo de impureza. Una vez preparada la muestra prototipo se colocó sobre el porta muestras del microscopio y se dio inicio a la medición utilizando los comandos *Approach* y *Finishing*, una vez concluida la lectura se hizo el respaldo de los documentos y se analizaron mediante el mismo software Nanosurf *Easyscan 2*.

Tabla 17

Especificaciones técnicas del instrumento de medición Nanosurf *Easyscan 2*

Especificaciones técnicas		Imagen de referencia
Tamaño/peso del controlador	470x120x80 mm / 2.4 kg	
Fuente de alimentación	90 - 240 V~/ 30 W 50/60 Hz	
Generador de escaneo	Convertidor D/A de 16 bits para todos los ejes	
Velocidad de escaneo	Hasta 60 ms/línea a 128 puntos de datos/línea	

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

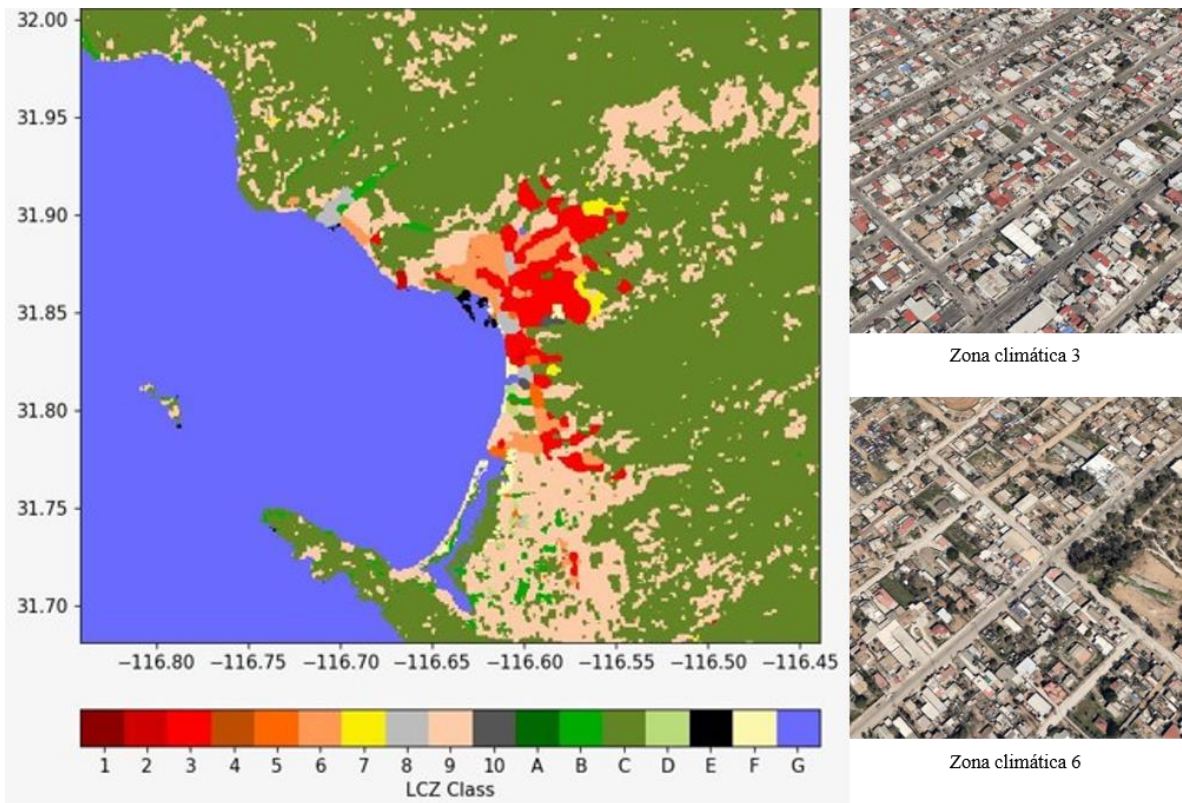
4.1. Diseño del material: Obtención de prueba de concepto (PoC)

4.1.1. Mapeo de zonas climáticas locales

Los resultados del proceso de mapeo de zonas climáticas locales se muestran en Figura 43, en la cual las zonas climáticas se presentan en un mapa y se identifican entre sí por un código de color localizado en la parte inferior del mapa. De acuerdo con este análisis, en la ciudad de Ensenada predominan dos tipos de zonas climáticas locales, primeramente, la zona climática 3 caracterizada por edificios de baja altura (1 a 3 niveles), en configuración compacta y con mayor presencia de materiales constructivos como el concreto, el ladrillo y la piedra, por lo anterior es correcto concluir que en este tipo de zona las mayores ganancias solares se dan a través de las cubiertas arquitectónicas debido a la baja altura de los edificios y la alta compacidad entre muros colindantes. En segundo lugar, se identificó la predominancia de la zona climática 6, caracterizada también por edificios de baja altura, aunque en estas zonas, la configuración se considera abierta y con la presencia de vegetación, ejemplos de estas dos zonas predominantes se muestran también en la Figura 43 en el extremo derecho de mapa.

Figura 43

Zonas climáticas locales de la ciudad de Ensenada, B.C.

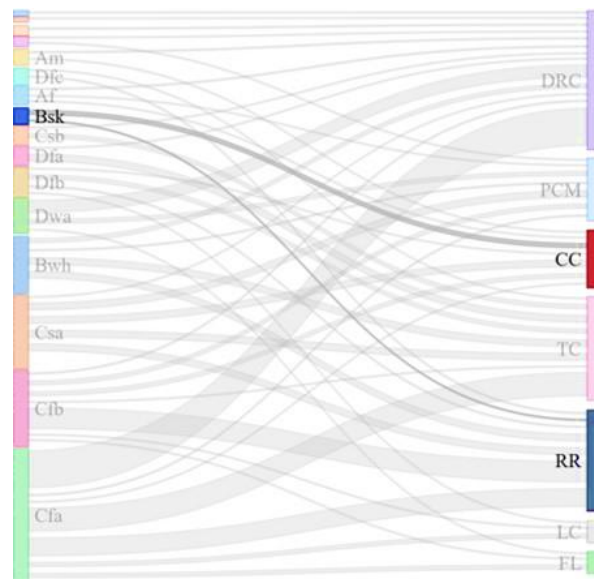


4.1.2. Análisis de flujo entre zona climática y materiales fríos

Para analizar la relación entre los siete tipos de materiales fríos y las zonas climáticas correspondientes a la clasificación Köppen Geiger se realizó un gráfico de flujos el cual se muestra en la Figura 44, al lado izquierdo se encuentran las zonas climáticas de Köppen Geiger, y en el lado derecho los siete tipos de materiales fríos estudiados como parte del estado del arte, ambos conectados por líneas de flujo cuyo espesor corresponde a la proporción de manuscritos revisados. De acuerdo con los resultados de este análisis en la zona climática BSk²⁸, la cual es la correspondiente a la ciudad de Ensenada, los tipos de materiales más evaluados son los materiales de colores fríos, caracterizados por compuestos altamente reflectivos en el espectro IR, seguidos de los materiales retroreflectivos, caracterizados por componentes de reflectividad retroreflectiva.

Figura 44

Análisis de flujos entre zonas climáticas y tipo de material



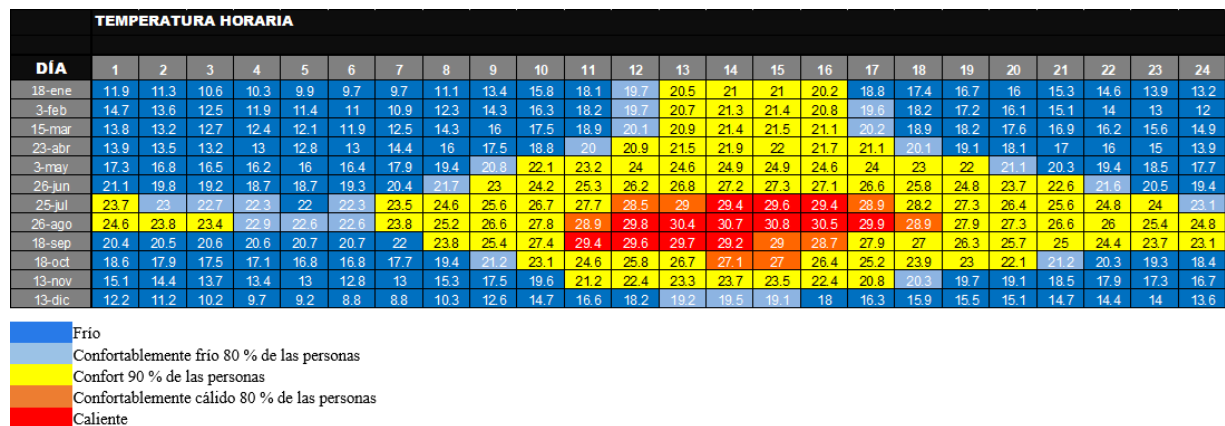
De estos dos materiales fríos, se seleccionó el de tipo color frío, ya que durante la revisión de la literatura se reconoció la efectividad de los materiales retroreflectivos en edificios de gran altura, los cuales no predominan en la ciudad de Ensenada dados los resultados del mapeo de zonas climáticas locales. Sumado a lo anterior, la revisión de la literatura también señaló el impacto negativo de los materiales altamente reflectivos durante los periodos de

²⁸ Clima semiárido templado y frío

invierno, los cuales son característicos de la zona climática BSk y de la ciudad de Ensenada, lo cual se demuestra mediante la Figura 45, en donde se muestran la isotermas de temperatura de los días típicos mensuales y las temperaturas horarias con respecto a los siguientes parámetros de confort térmico: frío, confortablemente frío, confort, confortablemente cálido, caliente. Tal cual se muestra esta figura, en Ensenada predominan el periodo frío y el confortablemente frío la mayor parte del año, mientras que los puntos críticos de temperatura máxima se dan en los meses julio, agosto y septiembre.

Figura 45

Isotermas de temperatura de los días típicos mensuales



Por lo anterior, sumado a la incorporación de materiales de tipo colores fríos, se propuso también el uso de materiales de colores claros para potencializar la mitigación del sobrecalentamiento en el verano y los materiales termocrómicos para contribuir al efecto de calentamiento pasivo durante los periodos fríos y confortablemente fríos.

4.1.3. Cálculo de la temperatura sol aire

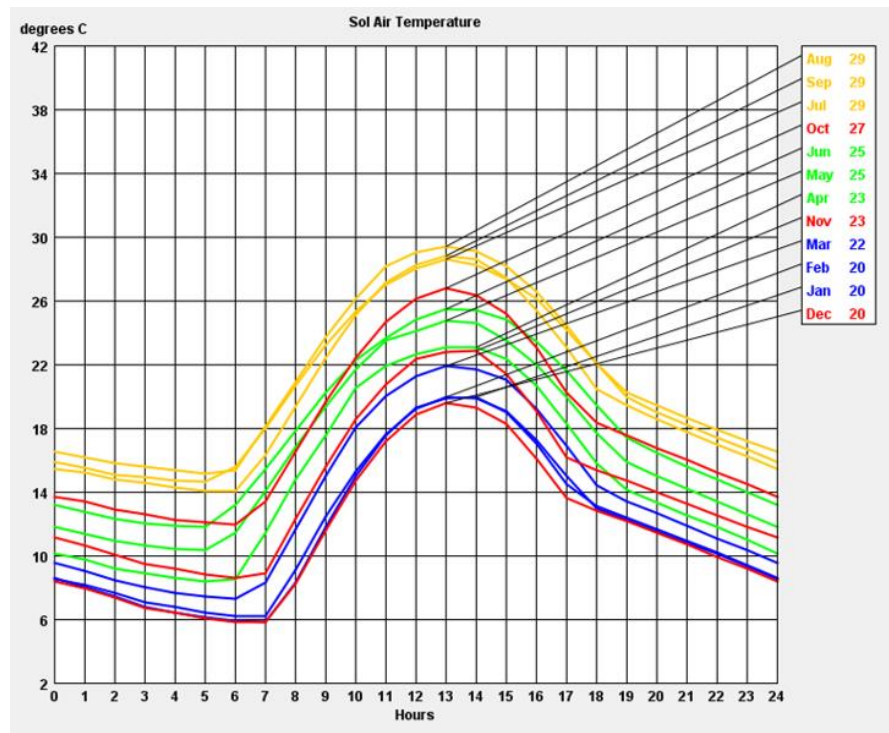
Un material termocrómico se caracteriza por una determinada temperatura de transición (TT), en esta investigación la TT se seleccionó mediante el cálculo de la temperatura sol aire ($T_{sol\ aire}$) por medio del software OPAQUE™, los parámetros ingresados al programa fueron una temperatura de confort interior de 20°C, una temperatura de 6.9 °C para el día de invierno y una temperatura de 30.3 °C para el día de verano, dichos parámetros fueron asignados automáticamente a por el programa OPAQUE en función de los datos climáticos asignados en el archivo EPW. El tipo de elemento constructivo fue una cubierta plana, conformada por las siguientes capas: una primera capa de aire exterior, una segunda capa de estuco al interior de la

cubierta, una tercera capa de concreto aligerado como material de la cubierta, una cuarta capa de aire exterior.

La absorbancia del elemento en su cara exterior fue 0.20, este fue asignado tomando en consideración que los materiales altamente reflectivos estudiados en el estado del arte se encuentran por arriba del 80 %, por lo que, restando este valor a la irradiancia solar, la absorbancia de un material opaco altamente reflectivo sería igual al 20 %. Con respecto a la reflectancia del suelo se ingresó un valor de 18 %, el cual corresponde una superficie de asfalto de acuerdo con los valores del programa OPAQUE. La $T_{sol\ aire}$ resultante para los meses de verano, julio, agosto y septiembre, fue de 29 °C, tal cual se muestra en la Figura 46.

Figura 46

Cálculo de la temperatura sol aire

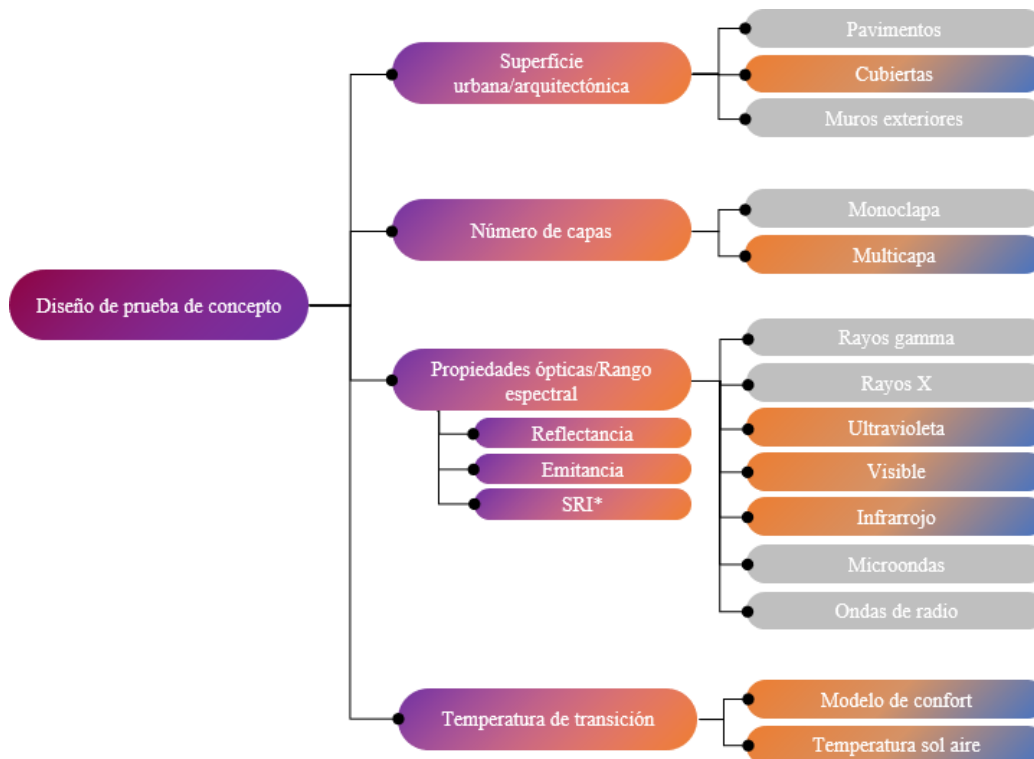


4.1.4. Obtención de la prueba de concepto

Los criterios de diseño considerados en la obtención de la prueba de concepto se ilustran en la Figura 47. El tipo de superficie urbana seleccionada fue una cubierta arquitectónica, el recubrimiento se definió como multicapa debido a la intención de combinar las características de tres materiales fríos: color claro, color frío y termocrómico. Los rangos del espectro electromagnético en los cuales el recubrimiento multicapa presentaría idealmente los mayores o menores porcentajes de reflectancia y absorbancia fueron los espectros UV, VIS y e IR. Finalmente, para el diseño del material fue también relevante la definición de la TT basada en las condiciones climáticas de la ciudad de Ensenada, B.C.

Figura 47

Criterios de diseño para la elaboración de la prueba de concepto



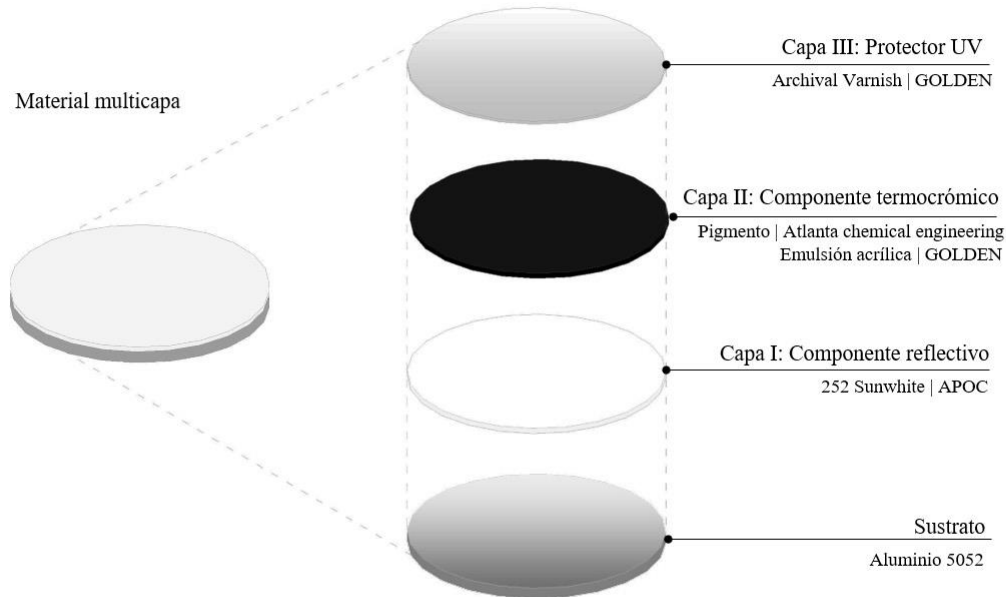
Como resultado, se llegó a una PoC la cual se muestra en la Figura 48a, esta consiste en un sustrato base de aluminio 5052, una segunda capa de un componente de color claro y color frío, denominado a partir de este momento como componente altamente reflectivo en los espectros VIS/NIR, una segunda capa de un componente termocrómico con un estado de coloración con una alta absorbancia en el espectro VIS y un estado de decoloración translucido que permita el efecto de enfriamiento de la capa inferior. Finalmente se propuso una tercera capa de un componente altamente absorbente en el espectro UV-A que proteja al componente termocrómico del efecto de fotoblanqueo al ser expuesto a las condiciones exteriores.

El propósito de esta configuración fue que en el periodo de invierno (con un límite inferior de confort de 20 °C) el recubrimiento multicapa mostrara su estado de coloración, absorbiendo la mayor parte de la radiación incidente y permitiendo así el calentamiento pasivo de los edificios, mientras que en el periodo de verano (con un límite superior de confort de 23.9 °C) y una vez superada la TT el recubrimiento multicapa dadas sus propiedades termocrómicas mostrara su estado de decoloración, dejando a la vista al componente altamente reflectivo en los espectros VIS/NIR localizado en la capa inferior. De esta forma, el recubrimiento multicapa promovería el enfriamiento pasivo de los edificios únicamente cuando fuera requerido en función de las características del ambiente térmico.

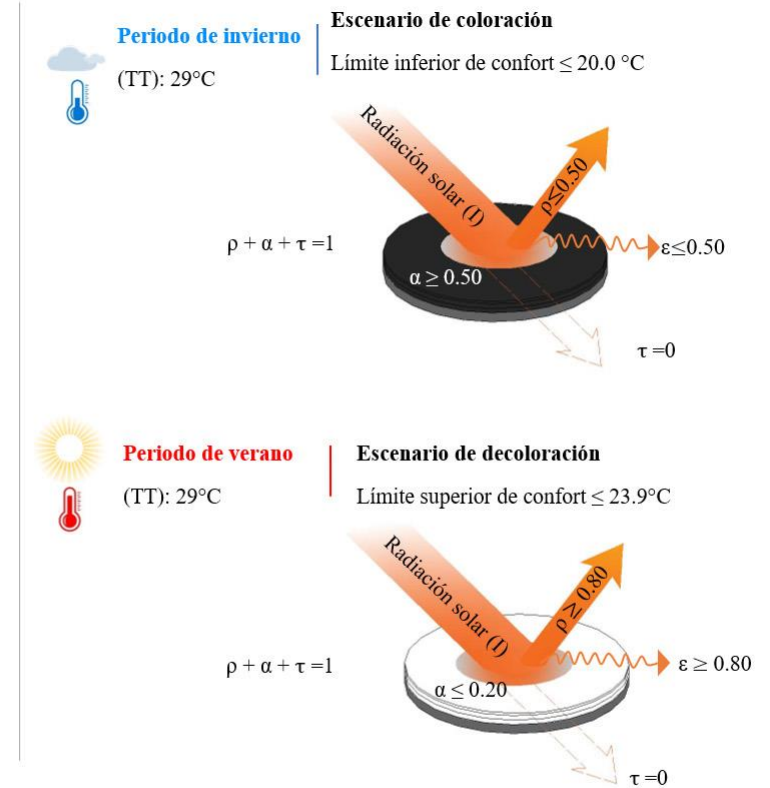
En adición al comportamiento dinámico del recubrimiento multicapa, el componente altamente absorbente del espectro UV-A se propuso con la finalidad de proteger al componente termocrómico inferior, asimismo este tercer componente habría de ser un recubrimiento translucido con el fin de no afectar a las cualidades cromáticas del componente termocrómico. Lo anterior se ejemplifica en la Figura 48b.

Figura 48

Prueba de concepto (PoC) para el diseño del material prototipo



(a)



(b)

Nota. Los límites de confort se definieron con base al modelo de confort del código energético del estado de California.

4.1.5. Selección de productos para muestra prototipo

En primer lugar, para la selección de la capa altamente reflectiva se realizó una investigación de los productos disponibles en el mercado por medio del directorio de cubiertas frías del CRRC²⁹, en el cual se enlistan los materiales fríos con mayores valores de reflectancia solar, emitancia térmica e índice de reflectancia solar (SRI³⁰), estos a su vez clasificados por color y tipo de aplicación (véase Figura 50). El material frío seleccionado tras la revisión del directorio fue el APOC 252 Sunwhite (véase Figura 49), el cual consiste en un recubrimiento elastomérico acrílico para uso en cubiertas y muros, la reflectancia del material es de 0.90, su emitancia térmica de 0.87 y su SRI es de 93, entre los componentes presentes en la formulación de este producto están el TiO₂ y el CaCO₃ (véase Tabla 18) ambos reconocidos en la literatura por su alta reflectancia en los espectros VIS e IR.

Figura 49

Recubrimiento elastomérico acrílico APOC 252 Sunwhite

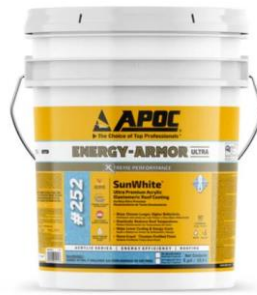


Tabla 18

Ingredientes del recubrimiento elastomérico acrílico APOC 252 Sunwhite

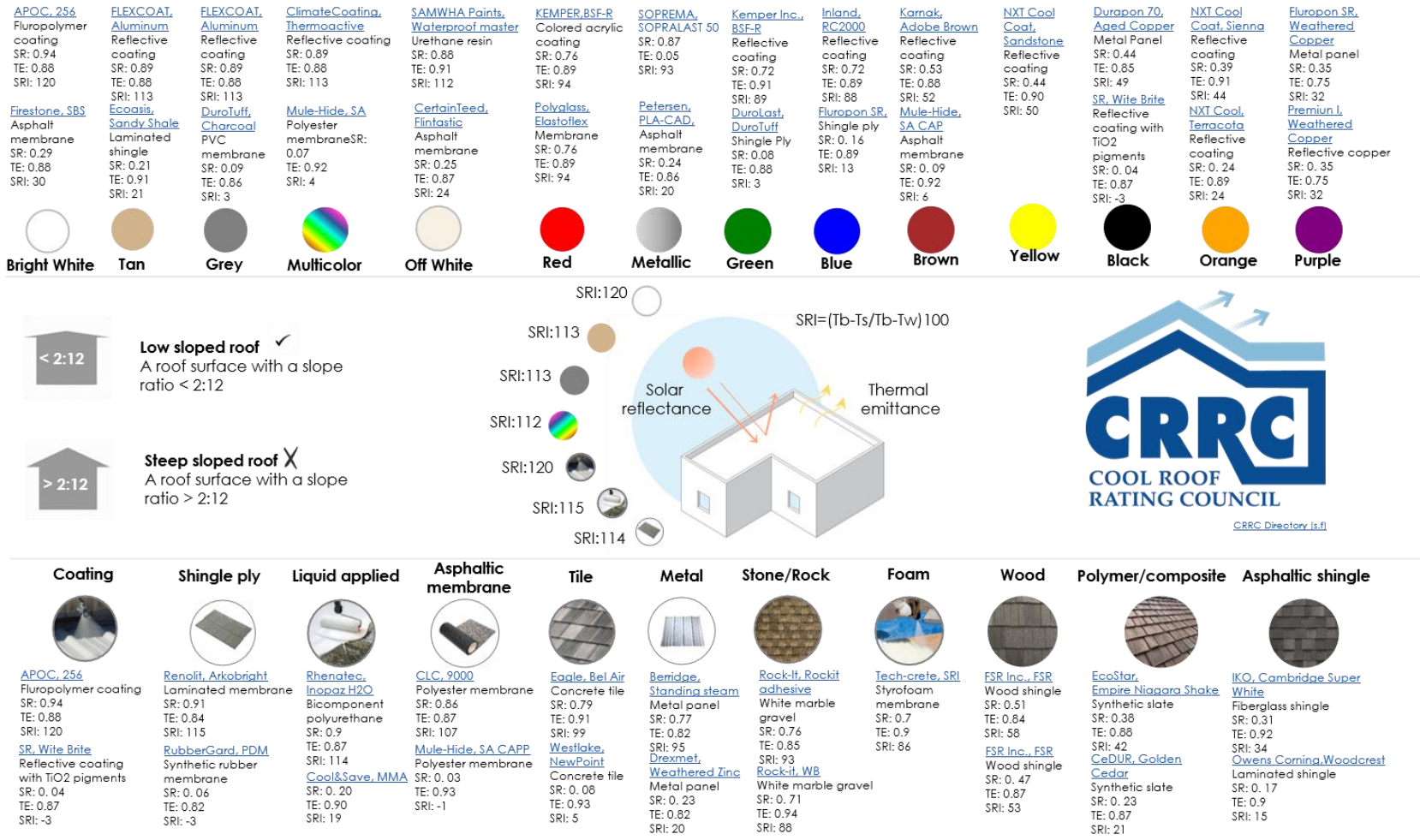
Nombre químico	Peso (%)	Nombre químico	Peso (%)
Solución de polímero acrílico	35 a 45 %	Propilenglicol	0.25 a 1 %
Carbonato de calcio (CaCO ₃)	25 a 35 %	Surfactante/Aditivo	0.25 a 1 %
Dióxido de titanio (TiO ₂)	15 a 25 %	Éster de texanol	0.1 a 1 %
Sílice, cuarzo	1 a 2 %	Agua	25 a 45 %
Hidroxietilcelulosa	0.1 a 0.5 %		

²⁹ Cool Roof Council

³⁰ Solar Reflectance Index

Figura 50

Clasificación de materiales fríos en el CRRC.



Nota. Elaborada a partir de CRRC, 2022.

En segundo lugar, la determinación del componente termocrómico se realizó con base a los resultados de la revisión sistemática de la literatura, con especial atención a los compuestos termocrómicos y los aglutinantes correspondientes (Tabla 19), seleccionándose finamente un pigmento microencapsulado con colorante de leuco y como aglutinante una emulsión acrílica polimérica.

Tabla 19

Revisión de la literatura para la selección de componentes para la fabricación de muestras

Año y autor	Componentes clave	Tipo de compuesto TC	TT (°C)	Estado de coloración (<TT)	Estado de decoloración (>TT)
Sharma (2017)	Emulsión acrílica, TiO ₂ , compuesto TC, absorbedor UV	Pasta termocrómica	31 °C	Negro	Traslúcido
Fabiani (2019)	Tolueno-Xileno, Compuesto TC	Microencapsulado	20 °C	Negro	Traslúcido
Berardi (2020)	Pintura acrílica a base de agua, TiO ₂ , compuesto TC	Microencapsulado	31 °C	Rojo Negro Magenta	Blanco (cercano)
Fabiani (2020)	Tolueno-Xileno (solvente), resinas derivadas de petróleo, compuesto TC	Microencapsulado	30 °C	Negro	Traslúcido
Chen (2020)	Mezcla de asfalto, aditivo sasol cera, compuesto TC	Microencapsulado	31 °C	Rojo	Blanco (cercano)
Xuxuan (2020)	Emulsión acrílica, etilenglicol, TiO ₂ , compuesto TC	Microencapsulado	31 °C	Rojo Azul Amarillo Verde Negro	Blanco (cercano)

La selección del producto correspondiente al pigmento termocrómico microencapsulado tomó en consideración tres aspectos principales:

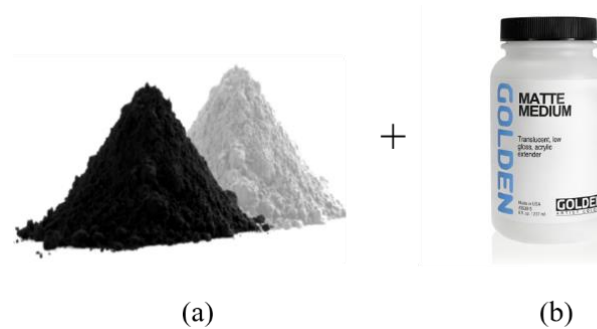
- i. *Temperatura de transición (TT) cercana a 29 °C.*
- ii. *Tonalidad oscura en el estado de coloración (<TT) y un estado de decoloración traslucido(>TT).*
- iii. *Comportamiento reversible.*

Para la selección del producto termocrómico se hizo una búsqueda de pigmentos en el mercado que cumplieran con estas características y se encontró el producto de la marca Atlanta Chemical Engineering, con estado de coloración negro y con estado de decoloración traslúcido,

y con temperatura de transición de 31 °C, este producto se muestra en la Figura 51a. Subsecuentemente, para la selección del producto aglutinante se realizó una búsqueda de productos compatibles con el pigmento termocrómico previamente seleccionado, considerando que este se caracterizara por una apariencia traslúcida, de acabado mate y con un pH neutral de 7. El aglutinante seleccionado fue una emulsión acrílica polimérica de la marca GOLDEN (Figura 51b).

Figura 51

Productos seleccionados para el componente termocrómico



Nota. a) Pigmentos termocrómicos de la marca Atlanta Chemical Engineering, b) emulsión acrílica polimérica traslúcida de la marca GOLDEN

El criterio de selección de la tercera capa, que funciona como barniz de protección a la radiación UV, fue basado en los productos disponibles en el mercado de acabado mate y apariencia traslúcida. Es importante señalar que durante el tiempo que en se realizó esta investigación, el uso de polímeros para la protección de recubrimientos termocrómicos era considerado un tema de investigación escasamente evaluado, por lo que fue necesario implementar una revisión interdisciplinaria de manuscritos enfocados en la conservación de obras artísticas exteriores (Pozo-Antonio et al., 2023). Finalmente, se seleccionó el producto *Archival varnish*TM de la marca GOLDEN® (Figura 52), ya que protege de la radiación UV sin afectar a las propiedades cromáticas del componente termocrómico inferior.

Figura 52

Barniz protector a la radiación UV de la marca GOLDEN

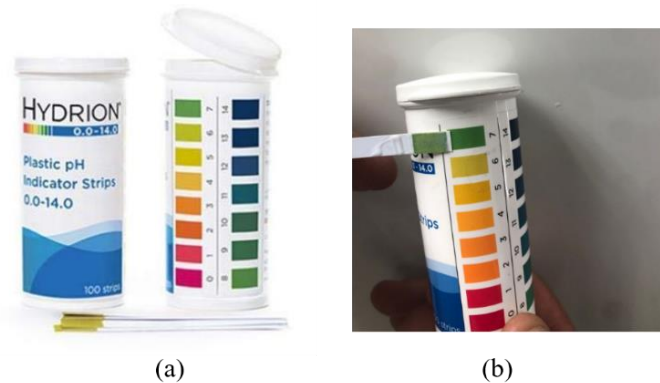


4.2. Composición de recubrimiento termocrómico

En este apartado se presenta la ejecución de los pasos para la elaboración del recubrimiento de tipo termocrómico (capa II de la PoC). Para esto, se realizó en primer lugar la medición del pH del producto aglutinante por medio de tiras plásticas reactivas Hydrión® Ph-14 para pruebas de pH en el rango de 0.0 – 14.0, con intervalos de 1.0. La prueba arrojó un valor de pH de 7, tal cual se ilustra en la Figura 53.

Figura 53

Medición de pH del compuesto aglutinante



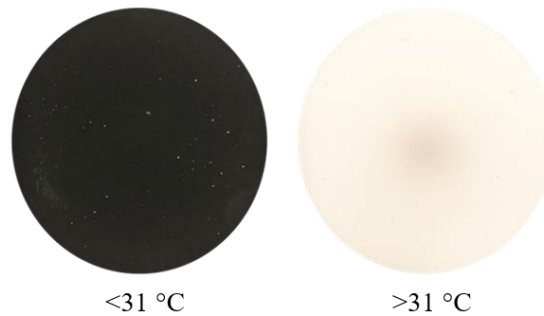
Nota. a) producto utilizado, b) resultado de la medición del pH.

Para la elaboración de este recubrimiento se realizaron dos tipos de concentraciones: 10 % y 15 %. Los resultados de ambas mezclas demostraron que ambas concentraciones presentan buenos resultados con respecto a la saturación del pigmento en su estado de coloración, por lo que la concentración de pigmentos de 10 % fue la seleccionada en función del uso eficiente del producto. Posteriormente, para evaluar el comportamiento dinámico del recubrimiento se

realizó una prueba mediante el uso de una celda peltier y un control PID, en la Figura 54 se muestra el recubrimiento sobre un sustrato de aluminio 5052 por debajo y por arriba de la temperatura de transición (31 °C).

Figura 54

Evaluación de termocromismo

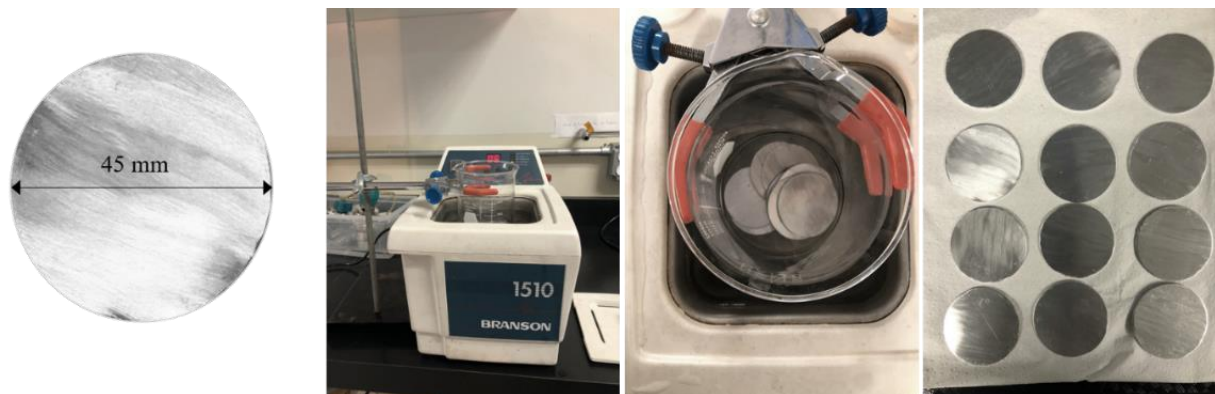


4.3. Diseño y fabricación de muestras

En esta sección se describen los resultados de la fabricación de muestras prototipo generadas a partir sustratos de aluminio 5052 y mediante las técnicas de deposición de recubrimiento por centrifugado y en aerosol. El diámetro seleccionado para los sustratos fue de 45 mm y el espesor de los mismos fue de 1.55 mm. Una vez que los sustratos fueron cortados mediante una máquina de corte CNC, estos fueron pulidos para disminuir la rugosidad de la superficie. Previo a la deposición de los recubrimientos todos los sustratos fueron depurados mediante el uso de un sonicador ultrasónico, los resultados del proceso de corte y limpieza se muestran en la Figura 55.

Figura 55

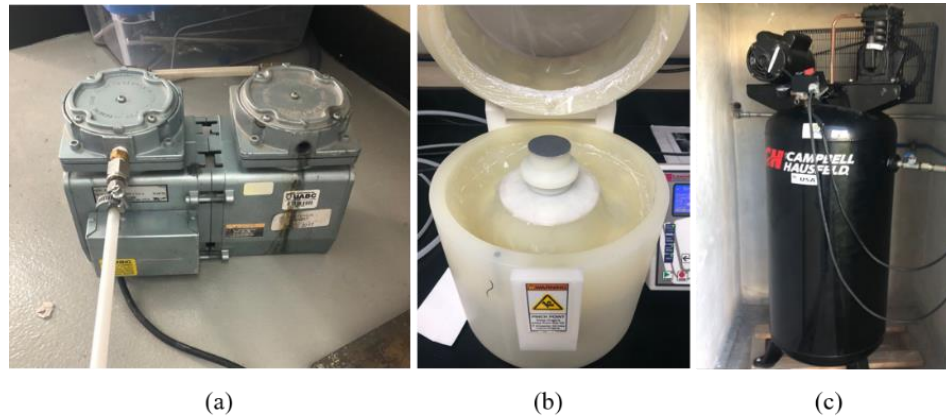
Preparación de sustratos



Para la deposición por medio del dispositivo de recubrimiento por centrifugado se aseguró previamente una presión de 65 libras por pulgada cuadrada (PSI³¹) en la bomba de vacío, así como una presión de 65 PSI en la conexión de aire comprimido (CDA), esto se ejemplifica en la Figura 56.

Figura 56

Arreglo experimental para la fabricación de muestras



Nota. a) Conexión de bomba de vacío a dispositivo de recubrimiento por centrifugado, b) colocación de sustrato sobre plataforma giratoria del dispositivo de recubrimiento por centrifugado, c) conexión a compresor de CDA.

4.3.1. Muestras del recubrimiento altamente reflectivo

Este tipo de muestras consistieron en el sustrato de aluminio 5052 y una capa del recubrimiento altamente reflectivo en los espectros VIS/NIR de la marca APOC modelo 252 Sunwhite. La primera muestra realizada (AR-01), consistió en la deposición de 1 ml de pintura al centro del sustrato de aluminio, se asignó una velocidad angular de 800 rpm, 300 rpm de aceleración y un tiempo de 30 segundos, como resultado se obtuvo una muestra con una cobertura limitada (véase Figura 57a) con un espesor de 1.78 mm.

Para la muestra AR-02 se depositó 1 ml de la pintura, se seleccionaron 1000 rpm de velocidad angular, 300 rpm de aceleración y un tiempo de giro de 30s en tres series, obteniéndose un espesor de 1.58 mm, en esta muestra el recubrimiento fue distribuido homogéneamente en la superficie del sustrato, sin embargo, presentó irregularidades en el punto central (véase Figura 57b).

³¹ Pound per Square Inch

La muestra AR-03 también fue fabricada con una deposición de 1 ml de pintura al centro, una velocidad angular de 1200 rpm, una aceleración de 300 rpm, y un tiempo de giro de 30 segundos en tres series, como se muestra en la Figura 57c, los resultados fueron homogéneos salvo por una mayor concentración del producto en la parte central de la muestra, el espesor de la muestra fue de 1.66 mm.

Finalmente, la muestra AR-04 fue fabricada mediante la deposición de 1 ml de pintura, una velocidad de giro inicial de 500 rpm por 30 segundos, una velocidad intermedia de 800 rpm por 30 segundos y una velocidad final de 1200 rpm por 30 segundos, en los tres tiempos se seleccionó una aceleración de 300 rpm, los resultados de esta muestra fueron favorables con respecto a la distribución homogénea del recubrimiento en el sustrato, tal cual se ilustra en la Figura 57d. A manera de síntesis, en la Tabla 20 se muestran los espesores resultantes con relación a los parámetros de deposición.

Tabla 20

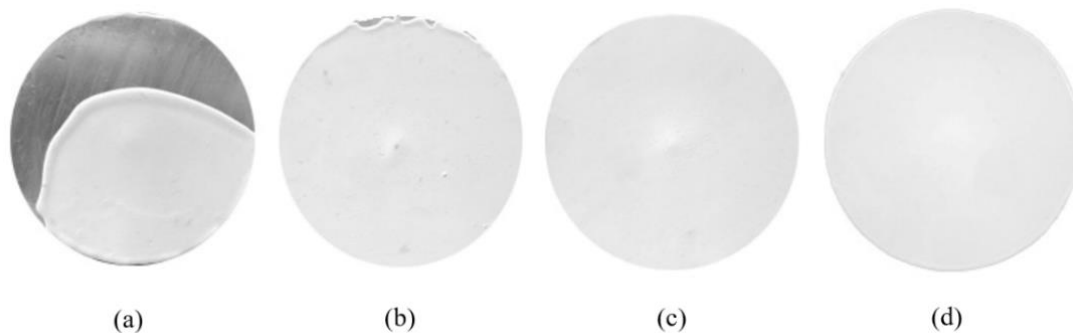
Espesores resultantes de la aplicación del recubrimiento altamente reflectivo

Nomenclatura	Deposito (ml)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad de aceleración (rpm) ³	Tiempo (s)	Espesor (mm)
AR-01	1 ml	800	300	30s (una serie)	1.78 mm
AR-02	1 ml	1000	300	30s (tres series)	1.58 mm
AR-03	1 ml	1200	300	30s (tres series)	1.66 mm
AR-04	1ml	500, 800, 1200	300	30s (tres series)	1.66 mm

Nota. Revoluciones por minuto (rpm).

Figura 57

Muestras resultantes de la deposición de recubrimiento altamente reflectivo



Nota. a) muestra AR-01, b) muestra AR-02, c) muestra AR-03, d) muestra AR-04.

4.3.2. Muestras del recubrimiento termocrómico

Este tipo de muestras constan del sustrato de aluminio 5052 y una capa del recubrimiento termocrómico. La muestra TC-01 consistió en la deposición de 1 ml de la pintura termocrómica, la velocidad de giro asignada fue de 800 rpm, con una aceleración de 300 rpm y por dos series de tiempo de 30 segundos cada una, el espesor final de la muestra fue de 1.8 mm, en este caso la muestra resultante presentó resultados desfavorables con respecto a la distribución del producto sobre el sustrato (véase Figura 58a).

Para la muestra TC-02 se asignaron los mismos parámetros que en la muestra TC-01, a excepción de la velocidad de giro, la cual fue de 1000 rpm. En esta ocasión la distribución de la pintura abarcó la superficie total del sustrato, con un espesor final de 1.71 mm, sin embargo y como puede verse en la Figura 58b la pintura termocrómica presentó bastantes irregularidades.

En el caso de la muestra TC-03, se repitieron los parámetros mencionados para las muestras TC-01 y TC-02 salvo por la velocidad de giro, la cual fue de 1200 rpm, la muestra obtenida alzó un espesor final de 1.66 mm, sin embargo, presentó irregularidades en su distribución, lo anterior puede apreciarse en la Figura 58c. En la Tabla 21 se muestra el resumen de los espesores resultantes con respecto a los parámetros asignados en el dispositivo de recubrimiento por centrifugado.

Tabla 21

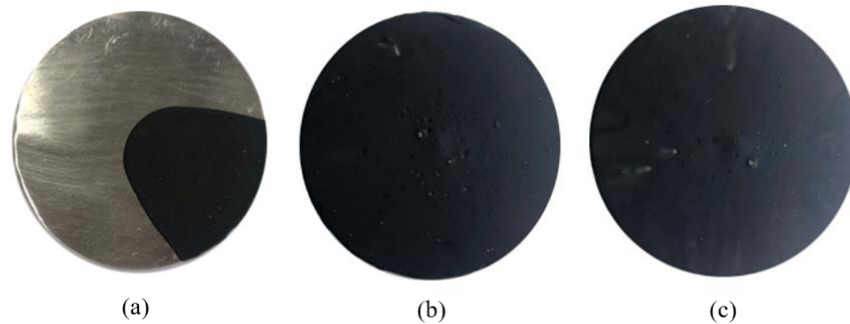
Espesores resultantes de la aplicación del recubrimiento termocrómico

Nomenclatura	Deposito (ml)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad de aceleración (rpm) ³	Tiempo (s)	Espesor (mm)
TC-01	1 ml	800	300	30s (dos series)	1.80 mm
TC-02	1 ml	1000	300	30s (dos series)	1.71 mm
TC-03	1 ml	1200	300	30s (dos series)	1.66 mm

Nota. Revoluciones por minuto (rpm).

Figura 58

Muestras resultantes de la deposición de recubrimiento termocrómico



Nota. a) muestra TC-01, b) muestra TC-02, c) muestra TC-03.

4.3.3. Muestras del recubrimiento protector UV mediante técnica de recubrimiento por centrifugado

Para la aplicación del recubrimiento protector a la radiación ultravioleta en el sustrato de aluminio 5052 se realizaron 3 muestras. La primera de estas muestras fue la muestra UV-01, en la cual se depositó 1 ml del producto sobre el sustrato, se asignó una velocidad de giro de 800 rpm, una aceleración de 300 rpm, y un tiempo de 30 segundos, la muestra resultante tuvo un espesor final de 1.56 mm, de acuerdo con lo que se demuestra en la Figura 59a, se presentó una ligera concentración en la parte central de la muestra.

Para la muestra UV-02 se emplearon las mismas precisiones que en la muestra UV-01 excepto por la velocidad de giro, la cual fue de 1000 rpm. El espesor final fue de 1.59 mm, al igual que la muestra A-UV-01 se presentaron irregularidades en el centro de la muestra (Figura 59b). Finalmente, en la muestra UV-03 se retomaron las mismas precisiones que en las muestras UV-01 y UV-02, exceptuando la velocidad de giro, que fue de 1200 rpm. En este caso el espesor final fue de 1.58 mm, y al igual que las muestras UV-01 y UV-02, esta muestra se caracterizó por irregularidades en la parte central (Figura 59c). Los espesores finales de estas tres muestras se muestran brevemente la Tabla 22 con respecto a los parámetros de fabricación.

Tabla 22

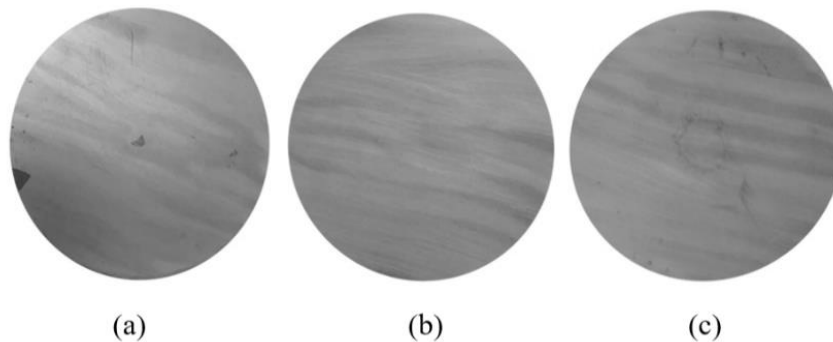
Espesores resultantes de la aplicación del recubrimiento protector UV mediante técnica de recubrimiento por centrifugado

Nomenclatura	Deposito (ml)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad de aceleración (rpm) ³	Tiempo (s)	Espesor (mm)
UV-01	1 ml	800	300	30s (una serie)	1.56 mm
UV-02	1 ml	1000	300	30s (una serie)	1.59 mm
UV-03	1 ml	1200	300	30s (una serie)	1.58 mm

Nota. Revoluciones por minuto (rpm).

Figura 59

Muestras resultantes de la aplicación de protector a la radiación UV



Nota. a) muestra UV-01, b) muestra UV-02, c) muestra UV-03.

4.3.4. Muestras del recubrimiento protector UV por medio de aerosol

Este tipo de muestra consta de un sustrato de aluminio 5052 de 45 x 50 mm y una capa del recubrimiento protector UV aplicado en aerosol conforme a las recomendaciones de uso del fabricante. Las pruebas de aplicación consideraron 3 diferentes alturas (15 cm, 35 cm, 38 cm) así como 2 tipos de distribución, en dirección lineal y en dirección en zigzag. La muestra UV-04 fue realizada a una distancia de 38 cm entre el aplicador y la muestra, la dirección de aplicación fue de tipo lineal, en total fueron aplicadas 2 capas del producto alcanzando un espesor de 1.60 mm; en la Figura 60a se muestra la textura final del recubrimiento, el cual presenta una distribución irregular sobre el sustrato. Para la muestra UV-05, se consideró una distancia de 35 cm entre el aplicador y el sustrato, la aplicación fue también en dirección lineal y fueron aplicadas 2 capas, el espesor resultante fue de 1.63 mm, como se muestra en la Figura 60b, esta muestra presentó también una textura irregular.

En la muestra UV-06 la distancia entre el aplicador y la muestra fue de 15 cm, la dirección de aplicación fue de tipo lineal, en total fueron aplicadas 2 capas, el espesor resultante

fue de 1.63 mm, en este caso la textura del recubrimiento, esta presentó ciertas irregularidades, aunque con mejores resultados a las muestras UV-04 y UV-05 (véase Figura 60c) . Para mejorar la textura de la superficie, en la muestra UV-07 se replicaron las precisiones tomadas en la muestra UV-06 pero incrementando el número de capas de 2 a 4, el espesor final fue de 1.66 mm, en esta ocasión la textura de la muestra presentó resultados favorables en la parte central y ciertas irregularidades en los extremos (véase Figura 60d). Finalmente, en la muestra A-UV-08, fueron retomadas las precisiones de la aplicación en la muestra A-UV-07, excepto por la dirección de la aplicación, la cual fue realizada en sentido zigzag, el espesor resultante fue de 1.62 mm, y como se aprecia en la Figura 60e, la superficie de la muestra fue mayormente homogénea. Las precisiones previamente descritas en este apartado se enlistan en la Tabla 23.

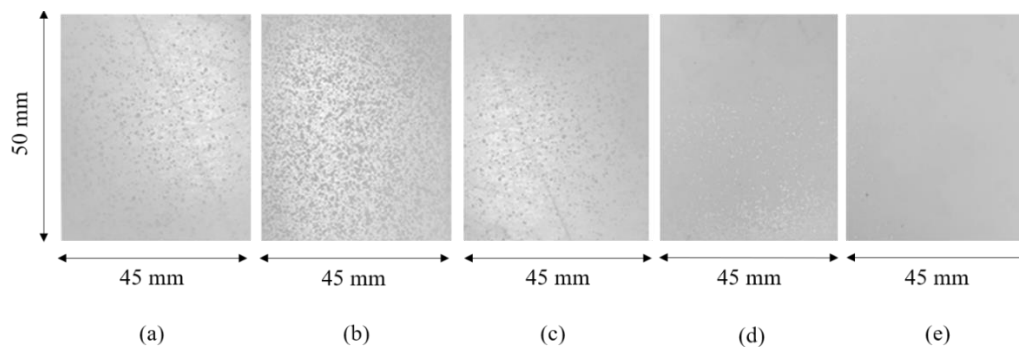
Tabla 23

Espesores resultantes de la aplicación de protector UV por la técnica de aerosol

Nomenclatura	Deposito (ml)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad de aceleración (rpm) ³	Espesor (mm)
UV-04	38	2	Lineal	1.60
UV-05	35	2	Lineal	1.63
UV-06	15	2	Lineal	1.63
UV-07	15	4	Lineal	1.66
UV-08	15	4	Zigzag	1.62

Figura 60

Muestras resultantes de la aplicación de protector UV por la técnica de aerosol



Nota 1. a) muestra UV-04, b) muestra UV-05, c) muestra UV-06, d) muestra UV-07, e) muestra UV-08.

Nota 2. Las fotografías fueron tomadas mediante una cámara de dispositivo móvil en un ángulo similar en todas las muestras que permitiera apreciar el reflejo de la luz sobre la superficie irregular.

4.3.5. *Muestras multicapa mediante deposición mixta*

La muestra multicapa representa el propósito fundamental de esta investigación, el cual es aprovechar los beneficios de distintos componentes, por lo que este tipo de muestras consistió en la deposición de más de una capa de los tres diferentes recubrimientos sobre un sustrato de aluminio 5052; en esta ocasión se probaron las velocidades con los mejores resultados obtenidos para cada recubrimiento individualmente.

En la muestra AR-TC-UV-01 se depositó primeramente 1 ml del recubrimiento altamente reflectivo, asignándose una velocidad angular de 1200 rpm, una aceleración de 300 rpm y una serie de tiempo de 30 segundos, ya que estos parámetros fueron los que facilitaron la distribución homogénea del producto en pruebas anteriores. Una vez que la capa se encontró completamente seca se depositaron 1.5 ml del recubrimiento termocrómico y se asignaron los parámetros con mejores resultados los cuales fueron una velocidad angular de 1200 rpm, una aceleración de 300 rpm y dos series de tiempos de 60 segundos; cuando el recubrimiento termocrómico secó por completo se depositó 1 ml del protector UV, se seleccionó una velocidad angular de 500 rpm, una aceleración de 300 rpm por una serie de tiempo de 30 segundos. El espesor resultante de esta muestra multicapa fue de 1.89 mm, cabe mencionar que la deposición del recubrimiento altamente reflectivo presentó buenos resultados ya que este se distribuyó de manera homogénea sobre el sustrato, sin embargo el recubrimiento termocrómico demostró resultados desfavorables debido a su cobertura limitada, lo cual puede atribuirse al cambio de la textura del sustrato una vez que se depositó la capa del recubrimiento altamente reflectivo o bien al tiempo de espera entre la deposición del recubrimiento y el inicio de la rotación del instrumento. Asimismo, el recubrimiento UV se vio obstruido por el recubrimiento termocrómico inferior, ya que este creó una superficie irregular que obstaculizó la distribución de esta tercera capa. La muestra resultante se aprecia con mayor detalle en la Figura 61a.

Para la muestra AR-TC-UV-02 se repitieron los parámetros asignados en la muestra AR-TC-UV-01, solo que en esta ocasión se inició la rotación del instrumento en un tiempo menor, logrando la distribución de la capa del recubrimiento termocrómico de una manera más uniforme y en un menor tiempo (30 s) que en la muestra anterior. Una vez seca esta segunda capa se depositó 1 ml del recubrimiento protector UV a una velocidad de 500 rpm, una aceleración de 300 rpm y en una serie de tiempo de 30 segundos. El espesor resultante de esta muestra multicapa fue de 1.85 mm. Tal cual se ejemplifica en la Figura 61b, tanto el

recubrimiento altamente reflectivo como el recubrimiento termocrómico fueron distribuidos correctamente, logrando una superficie homogénea salvo por pequeños espacios de aire en la capa termocrómica, lo cual indica que el inicio del dispositivo de rotación en un menor tiempo respecto a la deposición del recubrimiento favorece la distribución del mismo, sin embargo, el recubrimiento protector UV no logró una distribución homogénea, lo cual puede atribuirse al tiempo de secado del producto, es el cual es menor al tiempo que toma al instrumento concretar un ciclo de rotación (30 s).

Dados los resultados anteriormente mencionados, la fabricación de la muestra AR-TC-UV-03 recreó los parámetros ingresados para el recubrimiento altamente reflectivo y el recubrimiento termocrómico de la muestra AR-TC-UV-02, solo que en esta ocasión la deposición del recubrimiento protector UV omitió el uso de la ajuga, en su lugar se aplicó el producto a manera de aerosol a una distancia de 15 cm, lo anterior se realizó por fuera del instrumento para después colocar el sustrato sobre la plataforma giratoria; una vez colocada la muestra, se asignó una velocidad de 1200 rpm, una aceleración de 300 rpm y un tiempo de 30 segundos. El espesor total de la muestra fue de 1.70 mm. En esta muestra, las capas reflectiva y termocrómica fueron distribuidas con éxito. La capa del recubrimiento protector UV mostró una cobertura más homogénea en comparación con las muestras anteriores, no obstante, tal cual se ilustra en la Figura 61c, dicho producto secó antes de que lograra distribuirse por completo.

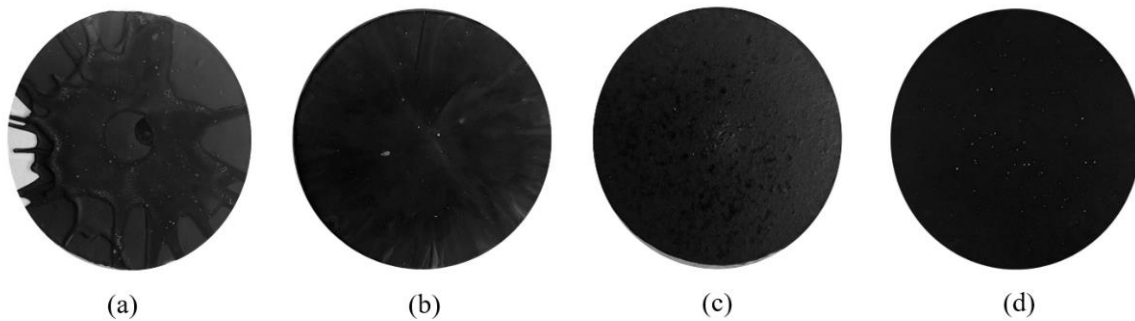
Para la muestra AR-TC-UV-04 se probaron distintas velocidades de giro para el recubrimiento altamente reflectivo y el recubrimiento termocrómico, dando una velocidad inicial de 500 rpm, posteriormente una velocidad de 800 rpm y finalmente una velocidad de 1200 rpm, en los tres tiempos se dio una aceleración de 300 rpm y una duración de 30 segundos. Esto permitió la distribución gradual de los recubrimientos y una superficie más homogénea. En cuanto al recubrimiento de protección UV, en esta muestra se omitió el uso del instrumento de recubrimiento por centrifugado, empleando en su lugar la aplicación en aerosol, a una distancia de 15 cm, en dirección de tipo zigzag y aplicando un total de cuatro capas, ya que esta fue la que demostró mejores resultados. El espesor resultante fue de 1.73 mm, los resultados pueden observarse en la Figura 61d.

Por último y con la finalidad de analizar el efecto del recubrimiento protector UV sobre las propiedades ópticas de las muestras prototipo, se fabricó una última muestra multicapa con

los mismos parámetros aplicados en las muestras AR-TC-UV-04 pero con la omisión de la capa protectora UV, a esta última muestra se le denominó AR-TC-01, y se caracterizó por un espesor final de 1.70 mm. Los espesores resultantes de las muestras multicapa se resumen en la Tabla 24. Como complemento a esta sección, en el apéndice A se muestran más imágenes del proceso de diseño y fabricación de las muestras.

Figura 61

Resultados de la fabricación de muestras multicapa



Nota. a) muestra AR-TC-UV-01, b) muestra AR-TC-UV-02, c) muestra AR-TC-UV-03, d) muestra AR-TC-UV-04

Tabla 24

Resultados de la fabricación de muestras multicapa

Muestra	Mililitros depositados	RPM ¹	V _{ace} ²	Tiempo	Espesor
AR-TC-UV-01	1 ml (fría)	1200 (fría)	300	Fría, 30s (una serie)	1.89 mm
	1.5 ml (TC)	1200 (TC)		TC, 60s (una serie)	
	1 ml (UV)	500 (UV)		UV, 30s (una serie)	
AR-TC-UV-02	1 ml (fría)	1200 (fría)	300	Fría, 30s (una serie)	1.85 mm
	1.5 ml (TC)	1200 (TC)		TC, 30s (una serie)	
	1 ml (UV)	500 (UV)		UV, 30s (una serie)	
AR-TC-UV-03	1 ml (fría)	1200 (fría)	300	Fría, 30s (una serie)	1.70 mm
	1.5 ml (TC)	1200 (TC)		TC, 60s (una serie)	
	1 ml (UV)	1200 (UV)		UV, 30s (una serie)	
AR-TC-UV-04 ³	1 ml (fría)	500, 800, 1200 (fría)	300	Fría, 30s (tres tiempos)	1.73 mm
	1.5 ml (TC)	500, 800, 1200 (TC)		TC, 30s (tres tiempos)	
AR-TC-01	1 ml (fría)	500, 800, 1200 (fría)	300	Fría, 30s (tres tiempos)	1.70 mm
	1.5 ml (TC)	500, 800, 1200 (TC)		TC, 30s (tres tiempos)	

Nota 1. Revoluciones por minuto (RPM)

Nota 2. Velocidad de aceleración (V_{ace})

Nota 3. En esta muestra la capa del recubrimiento de protección UV se aplicó mediante la técnica de aerosol, a una distancia de 15 cm, en dirección zigzag y en cuatro capas

4.3.6. Selección de muestras prototipo

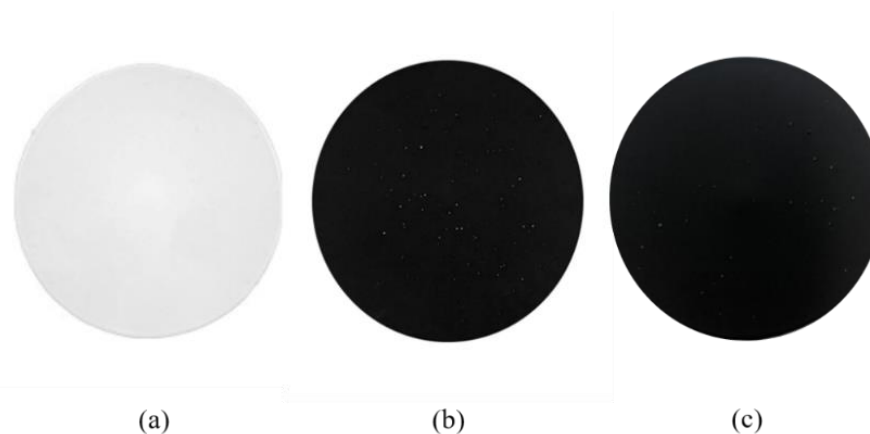
Para la caracterización óptica de las muestras prototipo, se seleccionaron las muestras con mejores resultados en cuando a la homogeneidad del recubrimiento. En primer lugar, se seleccionó la muestra que representa el propósito principal de esta investigación, la cual es la muestra AR-TC-UV-04, ya que cuenta con el total de los tres recubrimientos planteados en la prueba de concepto.

Con el fin de conocer el efecto del recubrimiento protector UV se seleccionó la muestra AR-TC-01, ya que su análisis permitiría comprender de qué forma este recubrimiento afecta a la reflectancia del recubrimiento termocrómico durante su estado de coloración y su estado de decoloración.

En tercer lugar, con el propósito de evaluar los beneficios del comportamiento dinámico del recubrimiento termocrómico se seleccionó la muestra AR-04 como aquella representativa de los materiales altamente reflectivos en los espectros VIS/NIR de comportamiento estático. En la Figura 62 se presentan las muestras prototipo seleccionadas para su caracterización.

Figura 62

Muestras seleccionadas para la etapa de caracterización óptica



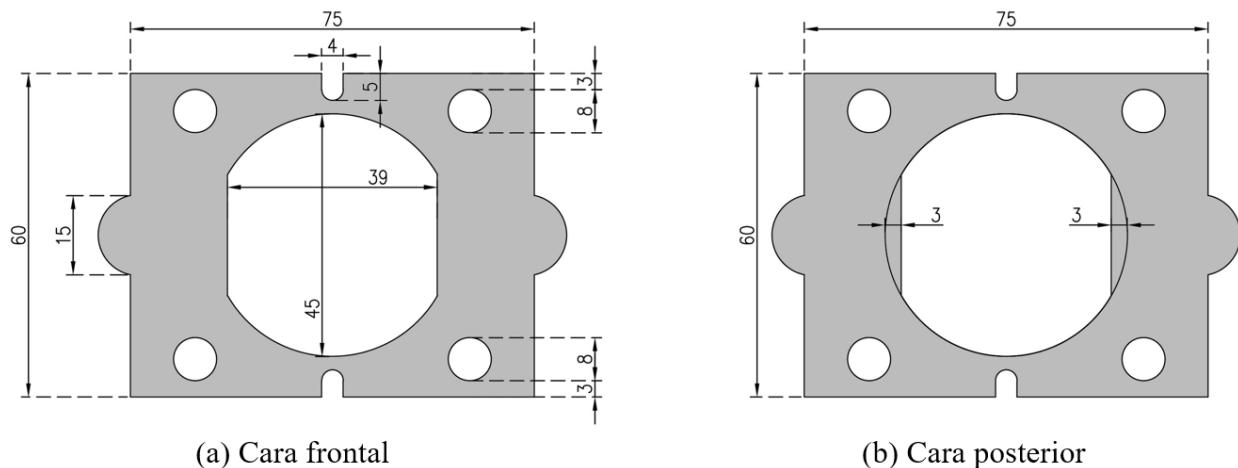
Nota. a) AR-04, b) AR-TC-01, AR-TC-UV-04.

4.4. Diseño y fabricación de porta muestras

En diseño final del porta muestras consistió en una pieza de 75 x 70 mm, con una abertura al centro de 39 mm de diámetro y un soporte posterior de 3 mm para la colocación de las muestras prototipo. En el diseño también se consideró un borde de 15 mm de diámetro para la colocación de los imanes, aberturas de 8 mm y 4 mm de diámetro para la posterior colocación de tornillos y cinchos de plástico respectivamente. Los resultados se presentan en la Figura 63.

Figura 63

Diseño de porta-muestras

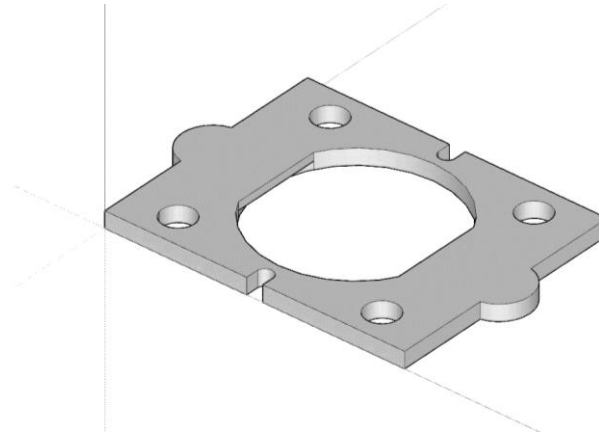


Nota: acotación: milímetros.

La fabricación del porta-muestras fue por medio de la técnica de impresión 3D, para esto, una vez definidas las dimensiones de la pieza se realizó un modelo volumétrico por medio del software *Sketchup* (Figura 64). Posteriormente el modelo volumétrico fue trasladado en el formato 3MF al software *PrusaSlicer*, en donde se configuraron los parámetros de impresión. El filamento seleccionado fue ácido poliláctico, también conocido como PLA, el patrón de relleno fue a base de triángulos y la precisión del filamento de 0.10 mm. La impresora utilizada fue el modelo i3 MK3S de la marca Prusa, en función de los parámetros previamente descritos, el tiempo de impresión fue de 2 h 50 m.

Figura 64

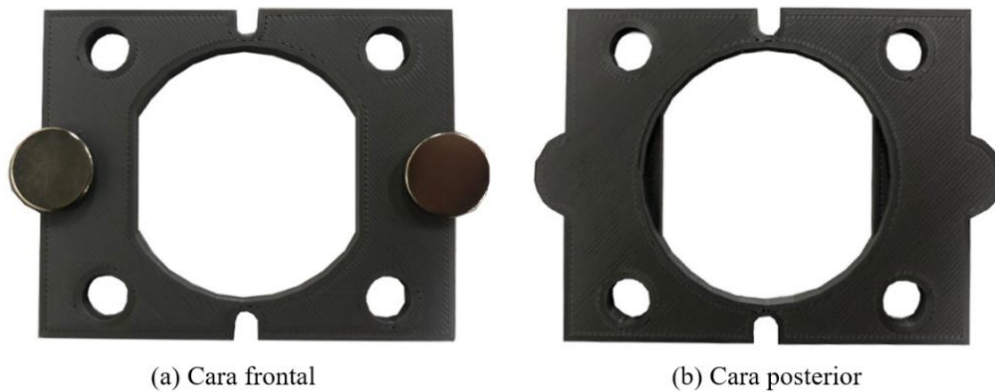
Modelo 3D del porta muestras



El resultado final de la impresión se muestra en la Figura 65a, tal cual se aprecia en la imagen, en la cara frontal se insertaron dos imanes de 15 mm de diámetro para asegurar el ajuste de la pieza al portaobjetos; en la Figura 65b se muestra la cara posterior, en donde se aprecia la diferencia de altura de 2 mm para la colocación de las muestras.

Figura 65

Resultado final a la fabricación del porta-muestras.



4.5. Montaje del módulo experimental

4.5.1. Configuración del módulo experimental

El sistema termoeléctrico permite la manipulación y el control de la temperatura superficial de las muestras prototipo para analizar las características de las muestras en intervalos controlados de temperatura. En esta sección se presentan los resultados de la propuesta de configuración de este sistema.

En términos generales, el sistema se compone por el sistema termoeléctrico y un portaobjetos. En la Figura 66 se presentan los elementos que integran al módulo experimental. El componente principal es una celda peltier (h), un dispositivo que mediante el paso de corriente cambia su temperatura, para este diseño se utilizó una celda peltier de 40 x 40 mm. El funcionamiento del sistema termoeléctrico consiste en lo siguiente: La celda peltier mediante el suministro de corriente desde una fuente de poder (a) suministra calor a una lámina de aluminio (i) la cual por su alta conductividad térmica distribuye de manera homogénea la temperatura a la muestra prototipo (j).

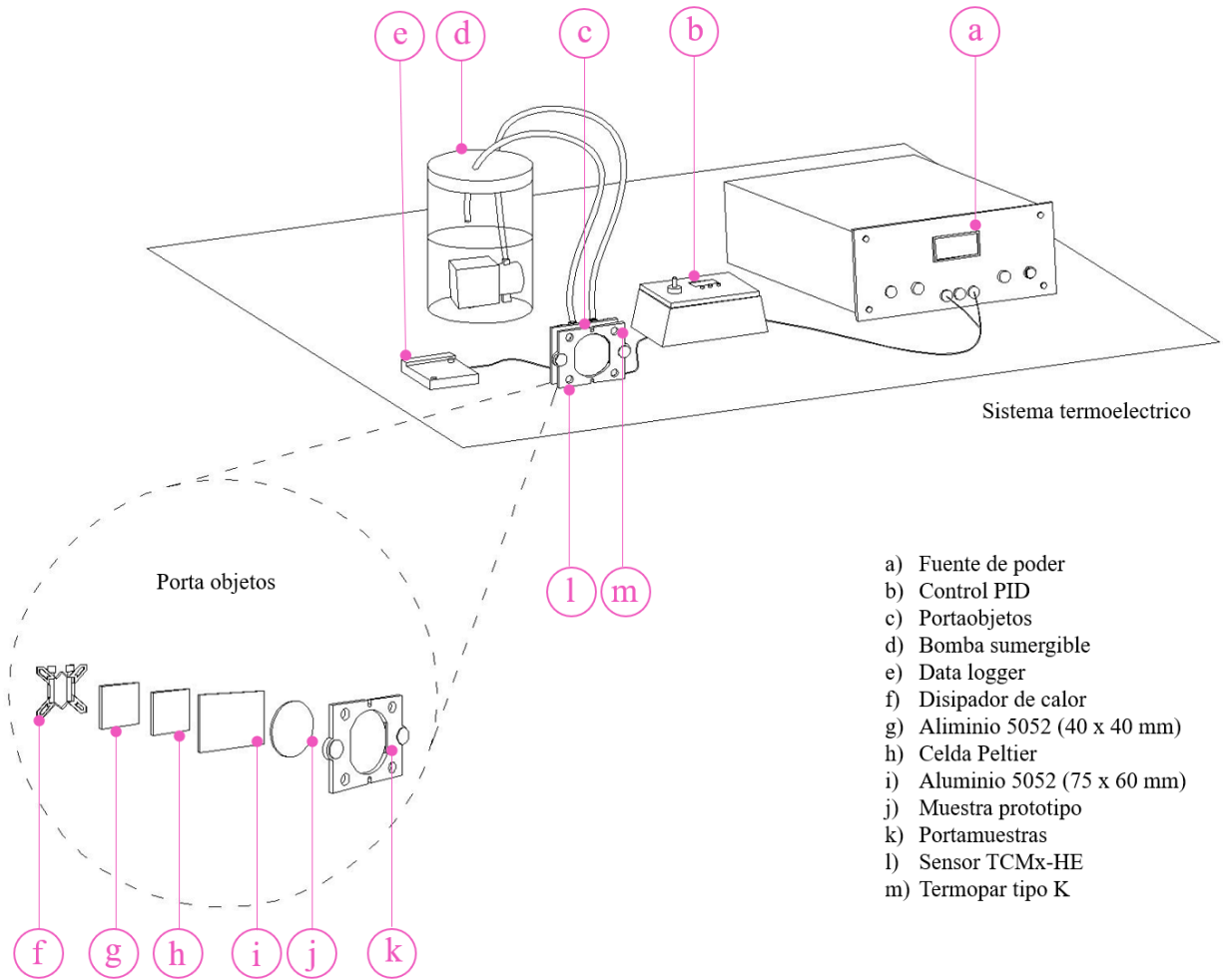
Para el soporte de la muestra se diseñó un porta muestras (k), con el fin de maximizar el contacto entre la muestra (j) y el aluminio (i) se colocaron imanes al frente del porta muestras (k) y al reverso del aluminio (i), asimismo el uso de imanes facilitó la maniobra para el intercambio de las muestras al momento de la medición. El diseño del porta-muestras también consideró una apertura de 45 mm de diámetro para el contacto entre la esfera de integración del espectrofotómetro y la muestra.

La regulación de la temperatura se realizó por medio de un control Proporcional Integral Derivado (PID) (b) y finalmente, para garantizar el funcionamiento eficiente del equipo se integró disipador de calor (f) conectado a una bomba sumergible (d) la cual se colocó dentro de un recipiente con agua desionizada para prevenir el daño al equipo de medición.

El registro de la temperatura del ambiente, la humedad relativa y la temperatura superficial de las muestras prototipo se realizó por medio de un dispositivo data logger y un sensor de temperatura TMCx-HE (l).

Figura 66

Configuración de modulo experimental












4.5.2. Montaje del módulo experimental

Previo a la explicación del ensamblaje de del módulo experimental, en la Tabla 25 se presenta cada uno de los elementos descritos en la Figura 66 con su imagen de referencia correspondiente.

Tabla 25

Elementos que conforman el módulo experimental

Elemento	Imagen de referencia	Elemento	Imagen de referencia
Fuente de poder Hewlett 6201B		Aluminio 5052 (75 x 60 mm)	
Control PID		Muestra prototipo	
Bomba sumergible OC-100		Porta muestras	
Data logger Onset, U12-012		Sensor Onset TMCx-HE	
Disipador de calor		Termopar tipo K	
Aluminio 5052 (40 x 40 mm)			

Para el ensamblaje del porta objetos se cortaron dos láminas de aluminio de 40 x 40 mm (g) y de 75 x 60 mm (i), el corte fue también realizado con una máquina de corte CNC, en el caso de la pieza (g), se prepararon las perforaciones para la colocación de tornillos, cinchos de plástico y se colocaron los imanes de 15 mm de diámetro para la posterior sujeción del porta muestras (Figura 67).

Figura 67

Corte de pieza de aluminio (i) y colocación de imanes



La colocación de la lámina de aluminio (g) sobre el disipador se realizó aplicando pasta térmica entre ambas superficies, similarmente para la colocación de la celda peltier (h) sobre la lámina de aluminio (i) se colocó nuevamente pasta térmica para asegurar el máximo contacto entre estos elementos y así promover la transferencia de calor homogénea (Figura 68). Los resultados del ensamblaje de estos elementos se muestran en la Figura 69.

Figura 68

Colocación de pasta térmica sobre disipador (f) y celda peltier (h)

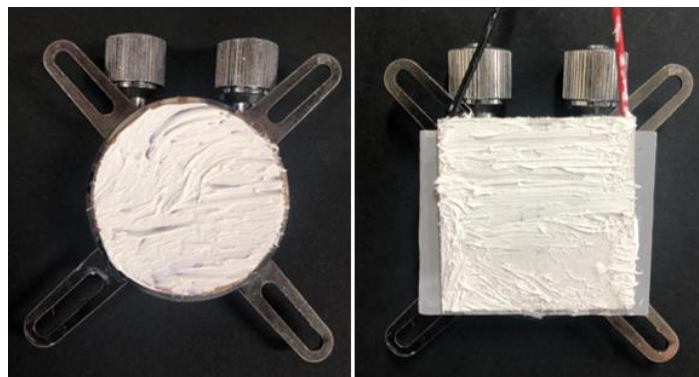


Figura 69

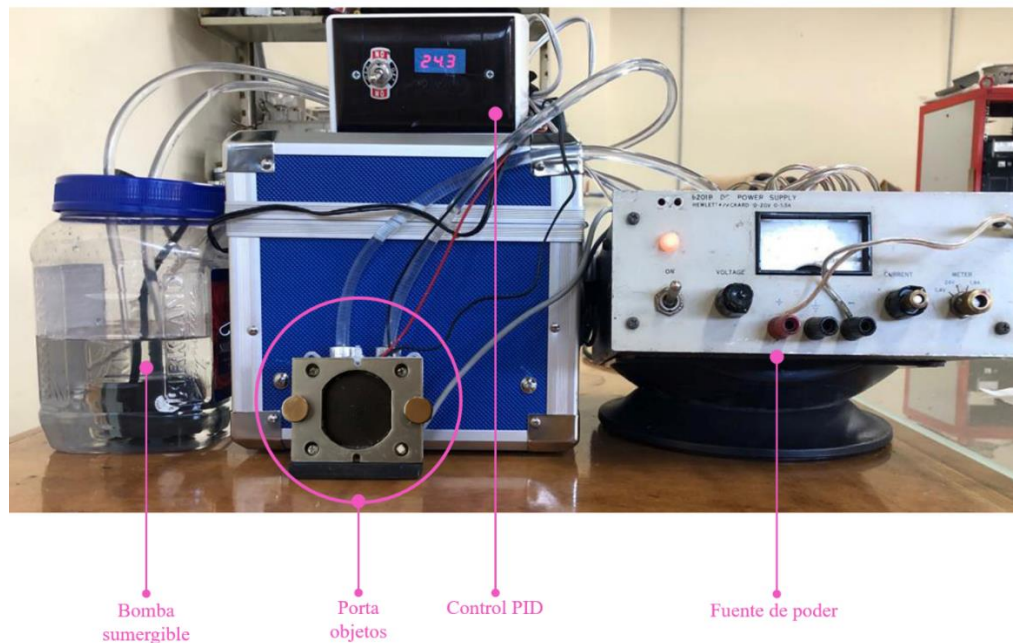
Resultado del ensamblaje del portaobjetos



Para la conexión entre el porta objetos y el sistema termoeléctrico se conectó el control PID al porta objetos mediante un termopar tipo k, posteriormente se conectó el control PID a la fuente de poder (a) y el disipador (f) a la bomba sumergible (d). El resultado del montaje del módulo experimental se muestra en la Figura 70. Una vez que este fue conectado con éxito se realizaron pruebas piloto para verificar la efectividad del control PID así como para llevar el registro del voltaje requerido para decrecer e incrementar la temperatura de las muestras prototipo. El registro fotográfico de este proceso se encuentra en el anexo B.

Figura 70

Resultado del montaje del módulo experimental.







4.6. Análisis de espectrofotometría

En esta sección se describen los resultados de la medición de la reflectancia difusa de las muestras prototipo AR-04, AR-TC-01, y AR-TC-UV-04 (véase Tabla 26). El procedimiento consistió en un análisis de espectrofotometría de reflectancia difusa, en el cual se utilizó un espectrofotómetro UV-VIS-NIR y una esfera de integración con base a lo sugerido en la norma ASTM E-903: Método de prueba estándar para absorción, reflectancia y transmitancia solar de materiales mediante esferas de integración.

Tabla 26

Muestras seleccionadas para el análisis de espectrofotometría

Nomenclatura de la muestra	Descripción	Imagen de referencia
AR-04	Sustrato: Aluminio 5052 Capa I: APOC 252 Sunwhite	
AR-TC-01	Sustrato: Aluminio 5052 Capa I: APOC 252 Sunwhite Capa II: Recubrimiento termocrómico	
AR-TC-UV-04	Sustrato: Aluminio 5052 Capa I: APOC 252 Sunwhite Capa II: Recubrimiento termocrómico Capa III: Recubrimiento protector UV	
REF-MgCO ₃	Muestra elaborada a partir de MgCO ₃ ¹ compactado	

Nota. Carbonato de magnesio (MgCO₃)

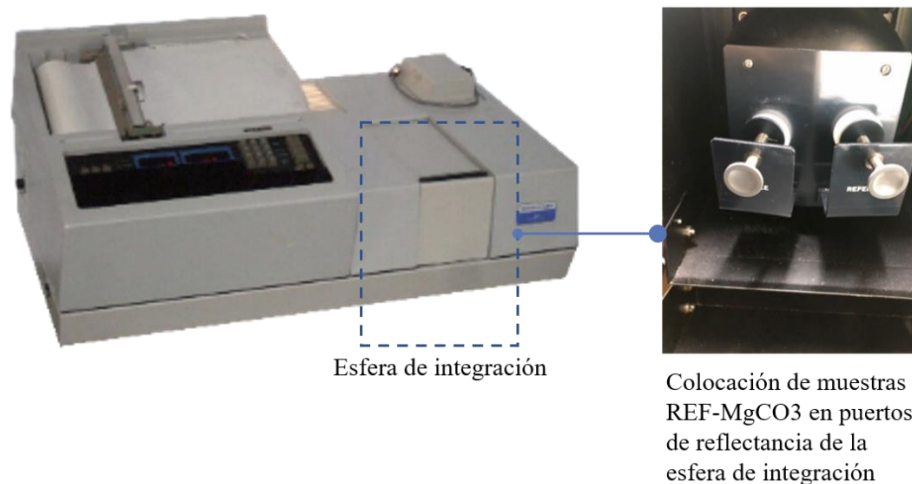
4.6.1. Calibración de espectrofotómetro

Durante cada una de las mediciones se realizó la calibración del espectrofotómetro UV-VIS-NIR, en el mismo día y previo a la medición de las muestras. Primeramente, se calibró el equipo de forma automática, para lo cual se colocaron dos muestras de referencia denominadas REF-MgCO₃ en los puertos de reflectancia del espectrofotómetro y se dio un tiempo de espera

hasta que el equipo concretó el proceso de calibración. Posteriormente se realizó una primera medición de la reflectancia difusa de la muestra REF-MgCO₃, los parámetros de medición ingresados fueron un rango de longitud de onda de 360 nm (color final) y 880 nm (color inicial), el intervalo de medición fue de 5 nm para tener un mayor detalle de los valores de reflectancia lo largo del espectro, por último, la velocidad de medición fue de 180 nm/min con el fin de disminuir la duración del tiempo de análisis. Esta medición cumplió el propósito de tener un registro de la calibración del espectrofotómetro, en la Figura 71 se muestra el proceso de calibración, complementariamente en los apéndices C, D y E se presentan los resultados del monitoreo de variables climáticas y los parámetros de medición de cada intervalo de temperatura analizados, de igual forma, en el anexo C se muestran evidencias fotográficas del análisis de espectrofotometría para todas las muestras prototipo.

Figura 71

Muestras de referencia (MgCO₃), y su colocación en puertos de reflectancia para calibración



4.6.2. *Reflectancia difusa de la muestra AR-04*

Posterior a la calibración del espectrofotometría se ejecutó la medición de la reflectancia difusa de la muestra AR-04, para esto se repitieron los parámetros de medición especificados en el apartado de calibración. La muestra prototipo AR-04 se colocó primeramente en el porta objetos mediante el uso de pasta térmica y posteriormente en el puerto de reflectancia del lado izquierdo de la esfera de integración. En el puerto del lado derecho se mantuvo la muestra REF-MgCO₃. Para la regulación de la temperatura se utilizó el módulo experimental, controlando la corriente desde el sistema termoeléctrico hasta el portaobjetos, en total se realizaron dieciséis

mediciones tal cual lo establece el protocolo de adquisición de datos de la sección 3.5.5. en el capítulo III de este documento.

Los resultados de las mediciones del espectrofotómetro realizadas en los 16 intervalos de temperatura de la muestra prototipo se ilustran en la Figura 72, a partir de la cual fue posible observar una tendencia homogénea entre todos los intervalos a lo largo del rango de longitudes de onda medidos, ya que esta muestra no contuvo compuestos que respondieran a estímulos de temperatura en su composición.

Al analizar los resultados con mayor detenimiento fue posible identificar que en el espectro UV-A (360 a 400 nm) la muestra reflejó entre todos sus intervalos de temperatura un promedio de 19 % de la radiación, absorbiendo el 79 % restante, el valor mínimo de reflectancia correspondió al intervalo de 13 °C (7.2 %) localizado en los 360 nm, el valor máximo de reflectancia correspondió al intervalo de 31 °C (59.6 %) y fue localizado en el límite de los 395 nm. La alta absorbancia de la muestra puede atribuirse a la presencia de TiO₂ en la composición del recubrimiento, ya que este se caracteriza por una alta absorbancia en este rango del espectro de acuerdo con la literatura revisada (Yoon et al., 2018).

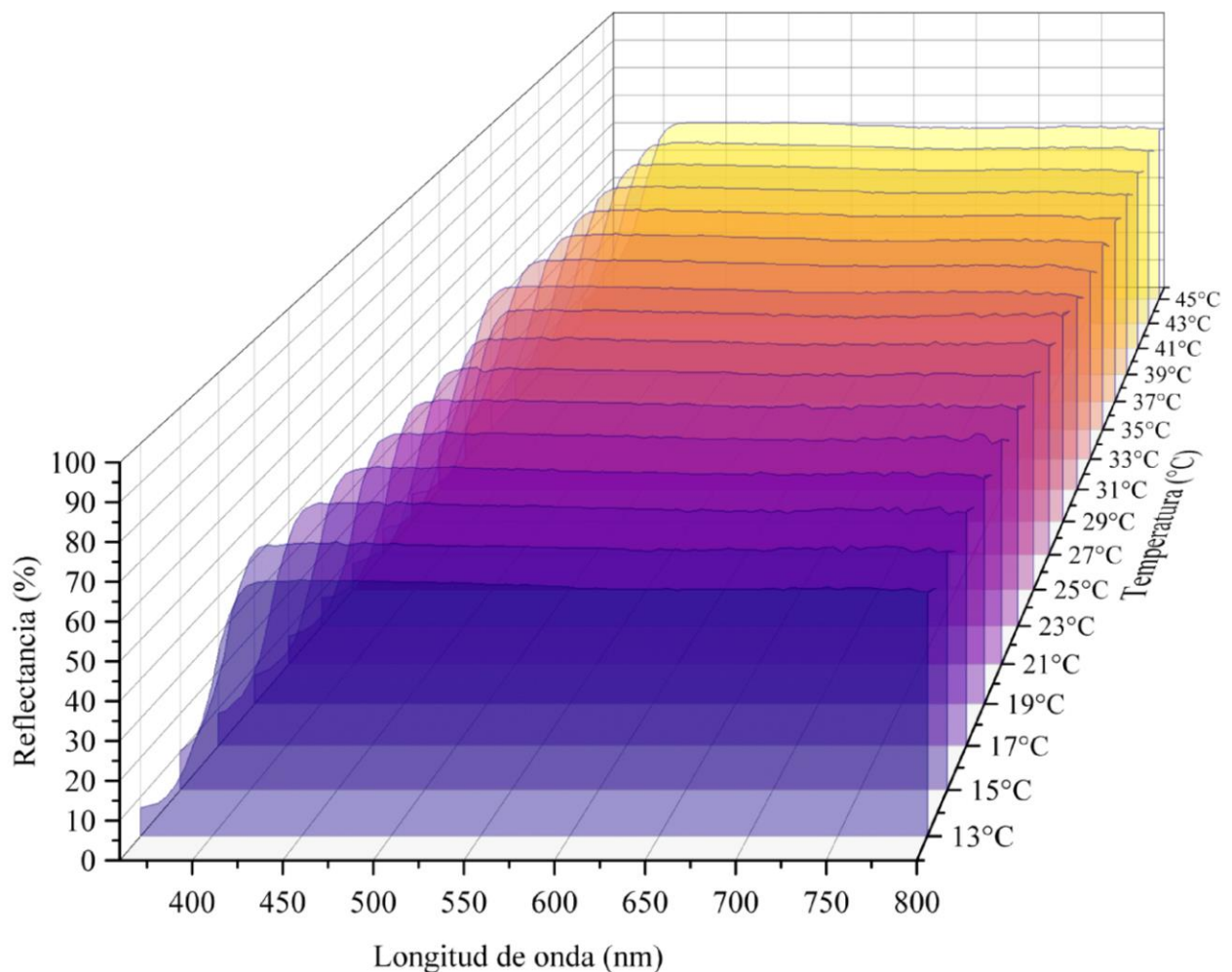
Con relación al espectro VIS (400 a 700 nm) se identificó un incremento importante de la reflectancia a partir de los 400 nm, manteniendo un comportamiento constante hasta los 700 nm, donde la muestra reflejó en promedio el 62.93 % de la radiación en todos los intervalos de temperatura. El valor mínimo de reflectancia registrado fue de 33.1 % para el intervalo de 27 °C en la longitud de 400 nm, mientras que el valor máximo registrado fue de 65.5 % también para el intervalo de 27 °C en la longitud de 465 nm. El hecho de que la muestra presente su mayor porcentaje de reflectancia en el espectro VIS corresponde a lo estimado de acuerdo con la teoría de la luz, en la cual se establece que el reflejo de las longitudes de onda violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo constituye en su conjunto a la luz blanca, por lo que es de esperarse que la muestra AR-04 al estar compuesta por TiO₂ y CaCO₃, ambos de color blanco, esta refleje todos los colores del espectro visible.

Por último, en el rango del espectro NIR (700-800 nm), la reflectancia de los distintos intervalos de temperatura comienza a presentar diferencias notables entre sí, con una reflectancia mínima de 60.3 % en el intervalo de 33 °C para la longitud de 800 nm y una reflectancia máxima de 64.9 % en el intervalo de 21 °C para la longitud de 785 nm. Los

resultados obtenidos indican que la muestra presenta buenos resultados en cuando a su reflectancia en el espectro NIR, atribuido también a la presencia e TiO_2 y CaCO_3 , utilizados en diversas investigaciones para la elaboración de materiales altamente reflectivos en el espectro NIR/IR (véase tabla 5 de la sección 2.3.13), sin embargo de acuerdo con las especificaciones técnicas del recubrimiento APOC 252 Sunwhite, la reflectancia solar de esta muestra debería encontrarse en un valor cercano al 90 %, debido a el rango de medición de la esfera de integración empleada en este experimento, no se contó con suficientes mediciones para conocer el comportamiento de la muestra en lo que resta del rango del espectro IR, aunque a partir de la tendencia de incremento observada en la Figura 72, es posible que la reflectancia de la misma incremente más allá de los 800 nm.

Figura 72

Reflectancia difusa de la muestra AR-04



4.6.3. Reflectancia difusa de la muestra AR-TC-01

Para la caracterización de la muestra AR-TC-01 se repitieron las precisiones metodológicas explicadas en el protocolo para el análisis de espectrofotometría (sección 3.5.5., capítulo III). Los resultados de la medición se presentan en la Figura 73 a partir de la cual es posible apreciar una notable diferencia entre los 16 intervalos de temperatura con respecto a su reflectancia, efecto que fue atribuido a la presencia de pigmentos termocrómicos.

En el espectro UV-A los intervalos de temperatura de 13 °C a 29 °C presentaron un comportamiento similar, con una reflectancia promedio de 4.56 %, con un valor mínimo de 3.7 % en el intervalo de 15 °C localizado en la longitud de 385 nm y un valor máximo de reflectancia de 6.1 % para el intervalo de 13 °C en la longitud de 360 nm. A partir de los 31 °C se apreció un incremento de la reflectancia de la muestra, con un promedio de 13.96 % para el intervalo de 31 °C, lo anterior implicó un incremento de la reflectancia (ΔR) de 9.07 % con respecto al intervalo de temperatura inferior (29 °C). Lo antes descrito corrobora el efecto de la temperatura de transición³² sobre la muestra, lo cual ocasiona la reflectancia dinámica de la misma incluso en longitudes de onda menores a los 400 nm. La máxima temperatura superficial alcanzada en esta medición fue en el intervalo de 45 °C con 16.36 %, sumado a lo anterior y tal como se aprecia en la Figura 73, entre el intervalo de 37 °C y el intervalo de 45 °C se da una disminución de la reflectancia de 18.33 %, lo que implica que a altas temperaturas el recubrimiento termocrómico en su estado de decoloración absorbe un alto porcentaje de la radiación UV-A, lo cual de acuerdo a la literatura consultada puede ocasionar problemas de fotoblanqueo sobre el material.

En el espectro VIS la muestra mantuvo una tendencia similar entre los intervalos de 13 °C y 29 °C, con una reflectancia promedio de 5.73 % entre todos los intervalos, un valor mínimo de 2.5 % para el intervalo de 15 °C en la longitud de 455 nm y un valor máximo de 46.8 % en el intervalo de 29 °C en la longitud de 695 nm. Asimismo, una vez que la muestra alcanzó una temperatura superficial de 31 °C se dio un cambio notable en su reflectancia, con un valor promedio de 21.14 % para esta temperatura, lo cual implicó el ΔR de 11.31 % con respecto a la reflectancia promedio del intervalo de 29 °C. El motivo de este cambio se atribuyó al cambio entre el estado de coloración al estado de decoloración de la muestra, ya que a partir de los 31

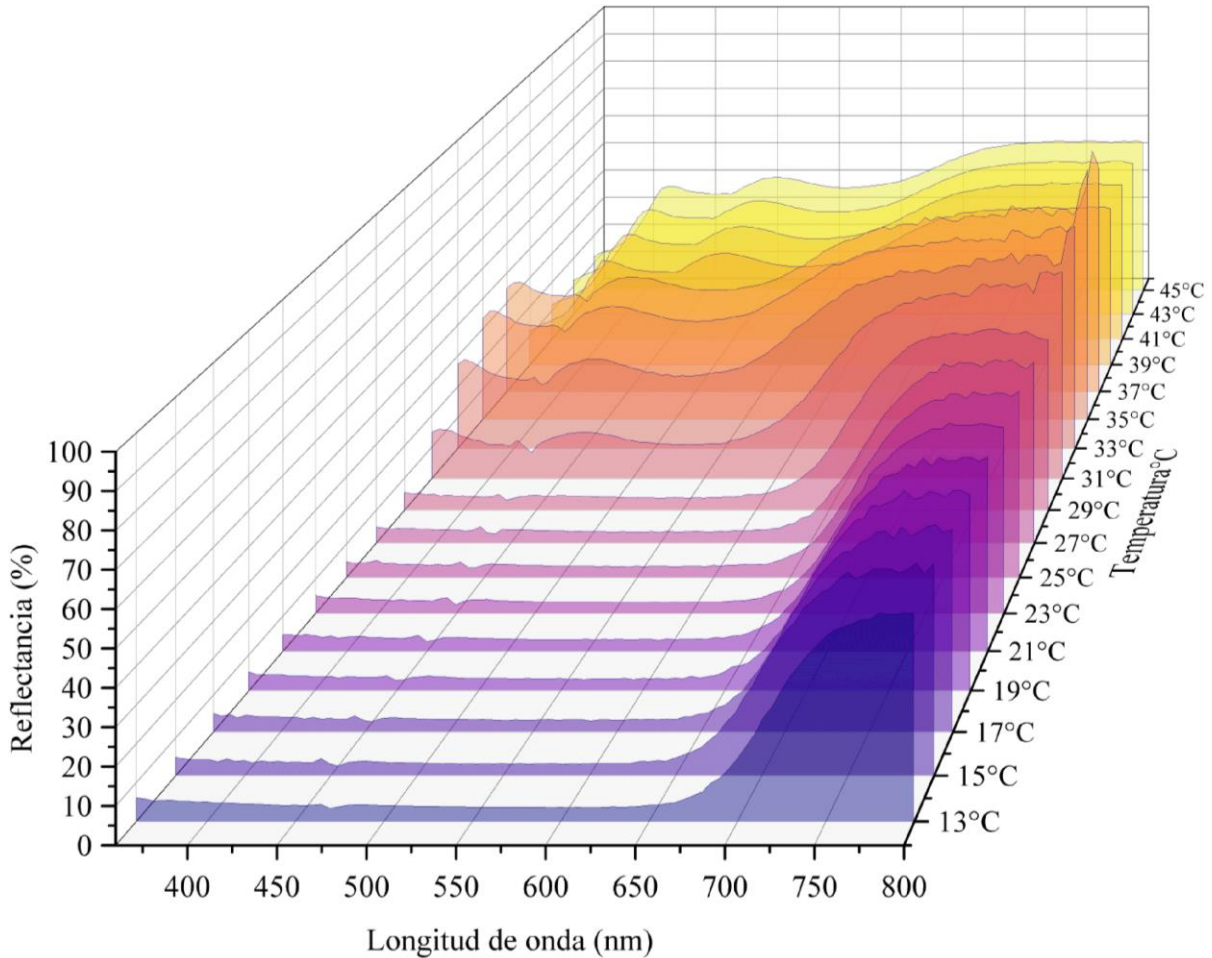
³² La temperatura de transición es igual a 31 °C

°C esta supera su temperatura de transición por lo que pasa de un color negro a un color cercano al blanco. A los 45 °C, es decir el intervalo máximo de temperatura, la muestra registró una reflectancia promedio de 40.53 %, sin embargo, este no fue el valor máximo registrado, ya que en el intervalo de 37 °C el valor de la reflectancia promedio fue de 42.76 %. Dado que existe una diferencia de 8 °C entre ambos intervalos, se descartaron las fluctuaciones de temperatura del sistema termoeléctrico como posible causa de la diferencia de reflectancia, concluyendo que a temperaturas mayores a 37 °C el recubrimiento tiende a disminuir su reflectancia.

En el espectro NIR se mantuvo la misma tendencia entre los intervalos de 13 °C a 29 °C, con una reflectancia promedio de 48.78 % entre todos los intervalos, siendo el intervalo con la menor reflectancia el de 13 °C con un valor 16.2 % en la longitud de 700 nm y el intervalo con la mayor reflectancia el de 29 °C con un valor de 56.2 % en las longitudes de 760 y 765 nm. Nuevamente, al superar la temperatura de transición la muestra incrementa su reflectancia, con un valor promedio de 60.65 % a los 31 °C, resultando en un ΔR de 9.6 % con respecto a la reflectancia promedio del intervalo de 29 °C. Los mayores valores de reflectancia en el espectro NIR fueron obtenidos en los intervalos de 35 °C y 37 °C con valores promedio de 82.4 % y 81.3 % respectivamente, los cuales superan la reflectancia de la muestra AR-04. Dado que la única diferencia entre las muestras AR-04 y AR-TC-01 fue la capa del recubrimiento termocrómico se estima que el incremento de la reflectancia en el espectro NIR se debe a los componentes de este recubrimiento.

Figura 73

Reflectancia difusa de la muestra AR-TC-01



4.6.4. Reflectancia difusa de la muestra AR-TC-UV-04

Al igual que en las dos muestras anteriores, para la caracterización de la muestra AR-TC-UV-04 se repitieron las precisiones metodológicas trazadas en el protocolo para el análisis de espectrofotometría (sección 3.5.5., capítulo III). La Figura 74 proporciona los resultados obtenidos de la reflectancia difusa de esta muestra en los 16 intervalos de temperatura.

En el espectro UV-A los intervalos de temperatura de 13 °C a 31 °C presentaron una reflectancia promedio de 4.92 %, con un valor mínimo de 2.7 % para el intervalo de 13 °C en la longitud de 360 nm y un valor máximo de 6.9 % para el intervalo de 31 °C en la longitud de 395 nm; cuando la muestra alcanzó una temperatura superficial de 33 °C la reflectancia presentó su primer incremento significativo, con un valor promedio de 8.16 % para esta temperatura,

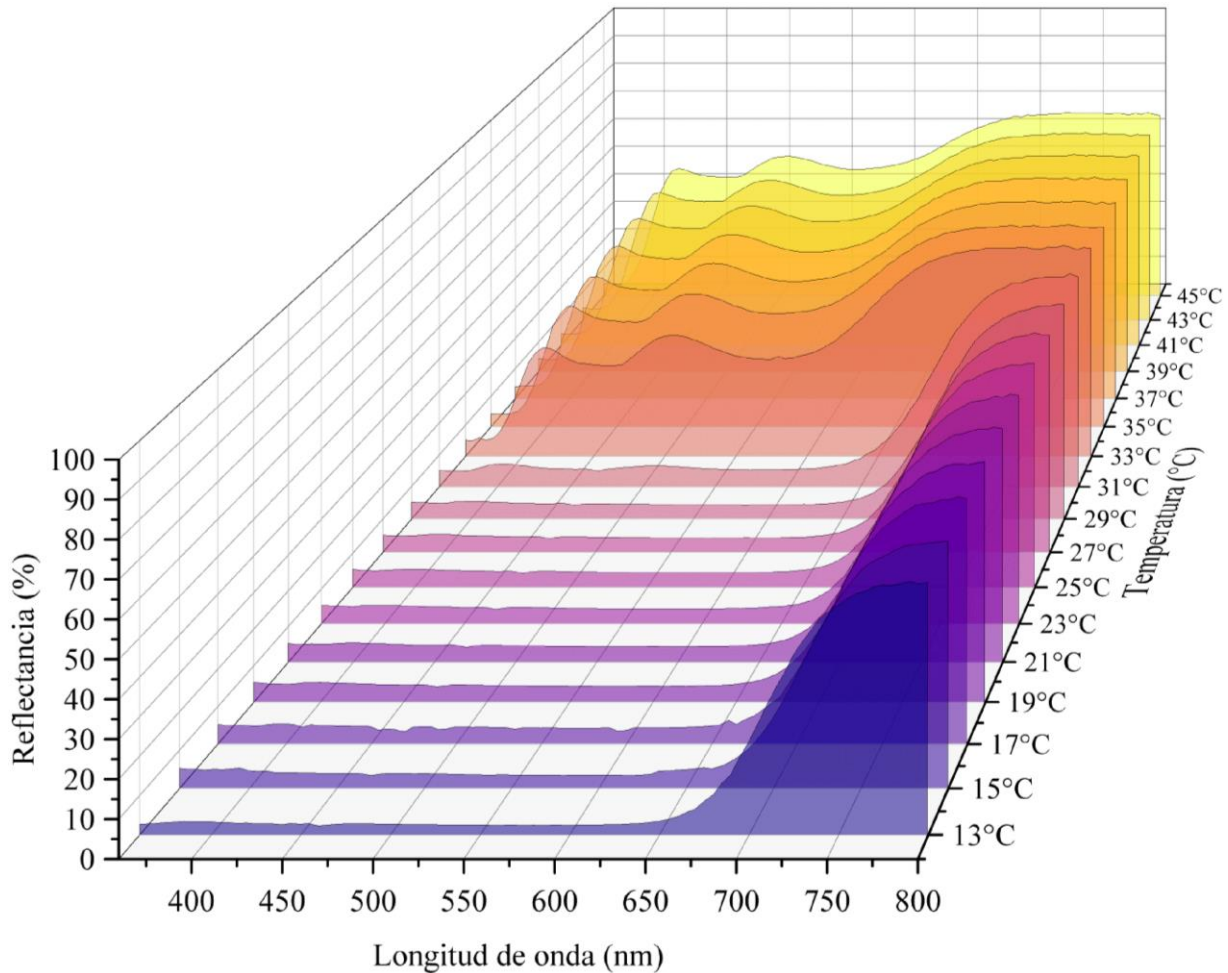
generando el ΔR de 2.7 % con respecto a la reflectancia promedio del intervalo de 31 °C. Lo anterior indica una alta absorbancia en este rango del espectro por la capa del recubrimiento protector UV.

En el espectro VIS los intervalos de 13 °C a 31 °C mantuvieron un comportamiento similar con una reflectancia promedio de 5.32 %, con un valor mínimo de 2.3 % para el intervalo de 13 °C en la longitud de 460 nm y un valor máximo de 31.9 % para el intervalo de 31 °C en la longitud de 695 nm. Al igual que en el espectro UV-A, cuando la muestra alcanzó los 33 °C se dio un aumento significativo de su reflectancia, con un valor promedio de 37.81 %, por lo que entre los 33 °C y 31 °C se dio un ΔR de 29.76 %. El intervalo de temperatura con el mayor valor de reflectancia fue el de 45 °C, con una reflectancia promedio de 49.37 %. Las diferencias de reflectancias previamente descritas fueron ocasionadas por la presencia de los pigmentos termocrómicos, aunque en esta ocasión la presencia de la capa de protección UV afectó a la temperatura de transición de la muestra, ya que a pesar de que la temperatura de transición de los pigmentos fue de 31 °C, los cambios cromáticos de la muestra AR-TC-UV-04 fueron notables a partir de los 33 °C.

En cuanto al espectro NIR, en la Figura 74 se aprecia entre los intervalos de 13 °C a 29 °C la reflectancia promedio se encuentra en un valor de 51.54 %, en este rango del espectro el intervalo de temperatura de 31 °C ya comienza a mostrar una diferencia en su reflectancia con respecto al intervalo de 29 °C, con un ΔR de 5.64 %. Para los intervalos de 33 °C a 45 °C la reflectancia difusa registrada tomó un valor promedio de 65.44 %, con un valor mínimo de 64.2 % para el intervalo de 33 °C en la longitud de 700 nm y un valor máximo de 67.3 % para el intervalo de 33 °C en la longitud de 780 nm. El comportamiento dinámico de la muestra fue un efecto derivado de la incorporación de pigmentos termocrómicos, aunque en el caso del espectro NIR, la muestra presentó una reflectancia similar para la mayoría de los intervalos de temperatura, por lo que se estimó que la muestra AR-TC-UV-04 posee una alta reflectancia en el espectro NIR tanto en su estado de coloración como en su estado de decoloración.

Figura 74

Reflectancia difusa de la muestra AR-TC-UV-04



4.6.5. Diferencias de reflectancia difusa en intervalos críticos de temperatura

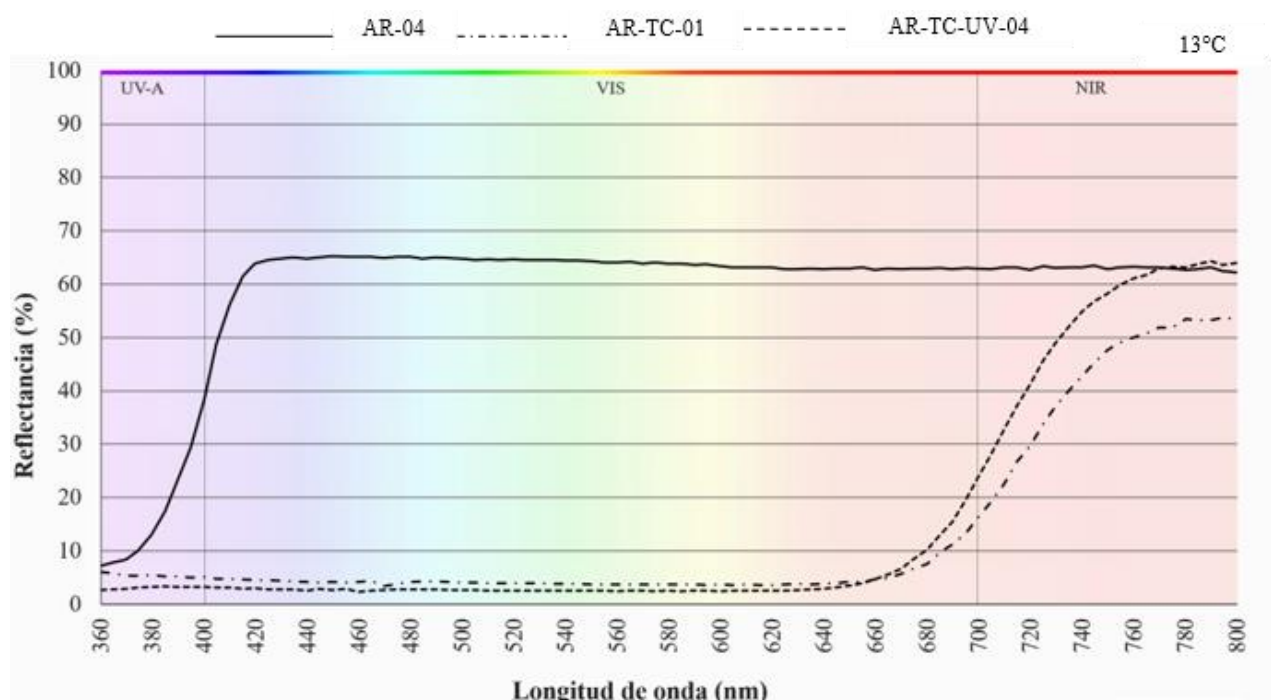
En la Figura 75 se aprecia la reflectancia difusa de las muestras AR-04, AR-TC-01 y AR-TC-UV-04 cuando estas se encuentran a una temperatura de 13 °C entre el intervalo de longitud de onda de 360 a 800 nm. Mediante este gráfico fue posible observar una gran diferencia sobre la reflectancia de las tres muestras prototipo cuando estas se encontraban en el intervalo de temperatura mínima:

- En el espectro UV-A la muestra con la mayor reflectancia fue la AR-04, seguida de la muestra AR-TC-01 y finalmente la muestra AR-TC-UV-04, con valores de 14.53 %, 5.43 % y 3.08 % respectivamente, una posible explicación a estas diferencias es el color de las muestras, ya que la muestra AR-04 al ser de tonalidad blanca mostró un incremento de su reflectancia al acercarse al espectro VIS.

- Con relación al espectro VIS, la mayor reflectancia se dio nuevamente en la muestra AR-04, seguido de la muestra AR-TC-01 y AR-TC-UV-04, con valores de 63.13 %, 4.53 % y 3.73 % respectivamente, nuevamente el motivo de estas diferencia fue correlacionado al color de las muestras, ya que la muestra AR-04 al ser de color blanco tiende a reflejar todos los colores del espectro VIS, mientras que las muestras AR-TC-01 y AR-TC-UV-04 al ser de un color muy cercano al negro tienden a absorber todos los colores del espectro VIS.
- En cuanto al espectro NIR, la mayor reflectancia se da en la muestra AR-04, seguido de la muestra AR-TC-UV-04 y por último la muestra AR-TC-01, con valores de 62.98 %, 52.70 % y 41.98 % respectivamente. Tal cual se observa en la Figura 75, la muestra AR-04 mantiene una reflectancia constante, mientras que las muestras AR-TC-01 y AR-TC-UV-04 comienzan a incrementar su reflectancia a partir de los 700 nm. Lo anterior se debe a que en este rango del espectro el color negro de las muestras termocrómicas no afecta a su reflectancia, a diferencia del espectro VIS, por lo que una vez superado el límite del espectro visible la reflectancia incrementa significativamente.

Figura 75

Reflectancia de muestras prototipo a 13 °C

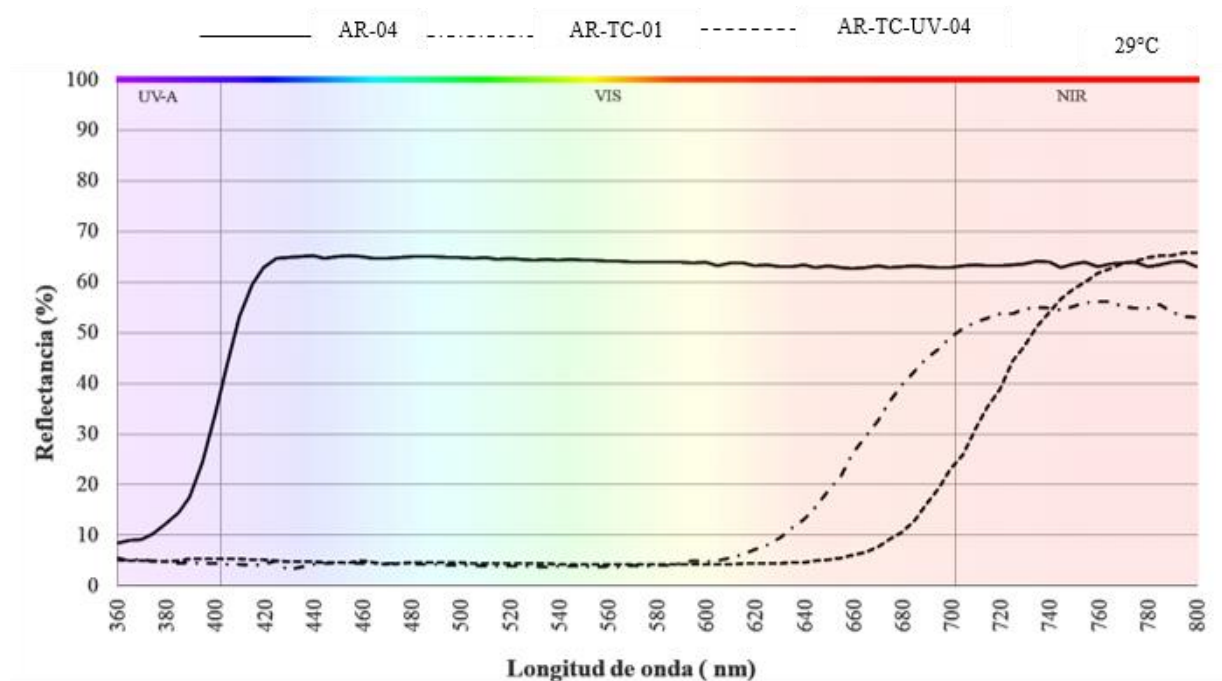


En la Figura 76 se observa la reflectancia de las muestras prototipo cuando están se encuentran a 29 °C, es decir cuando alcanzan el valor de la temperatura sol aire. A partir de los datos presentados en esta figura se determinó lo siguiente:

- En el rango UV-A la muestra con la mayor reflectancia fue nuevamente la AT-04 con un valor de 13.18 %, seguido de la muestra AR-TC-UV-04 con 5.05 % y muestra AR-TC-01 con 4.88 %, dichas diferencias fueron relacionadas al color de las muestras.
- Para el rango del espectro VIS, la muestra con mayor reflectancia fue la AR-04, en segundo lugar, la AR-TC-01 y en tercer lugar la AT-TC-UV-04, con valores de 62.94 %, 9.83 % y 5.46 % respectivamente. Un aspecto destacable de este análisis fue el incremento de la reflectancia de las muestras termocrómicas a partir de los 600 nm, lo cual indicó que a los 29 °C estas muestras tienden a reflejar luz roja, de estas dos muestras, la AR-TC-01 presentó un mayor incremento con respecto a la muestra AR-TC-UV-04, por lo que se estima que la aplicación del barniz protector UV afectó al cambio de transición de la muestra AR-TC-UV-04.
- Por último, en el espectro NIR la mayor reflectancia se presentó en la muestra AR-04 con un valor de 63.48 %, seguida de la muestra AR-TC-01 con 54.10 % y la muestra AR-TC-UV-04 con 52.64 %. Como se observa en la figura, las muestras AR-04 y AR-TC-01 mantienen una reflectancia constante, sin embargo, la muestra AR-TC-UV-04 a partir de los 700 nm comenzó a incrementar, llegando a superar a la muestra AR-04 en el límite de los 800 nm. Debido a que las tres muestras contienen una primera capa del producto APOC 252 y una segunda capa del recubrimiento termocrómico se consideró que la tercera capa, es decir el producto protector UV ocasionó esta diferencia en el comportamiento de las muestras.

Figura 76

Reflectancia de muestras prototipo a 29 °C



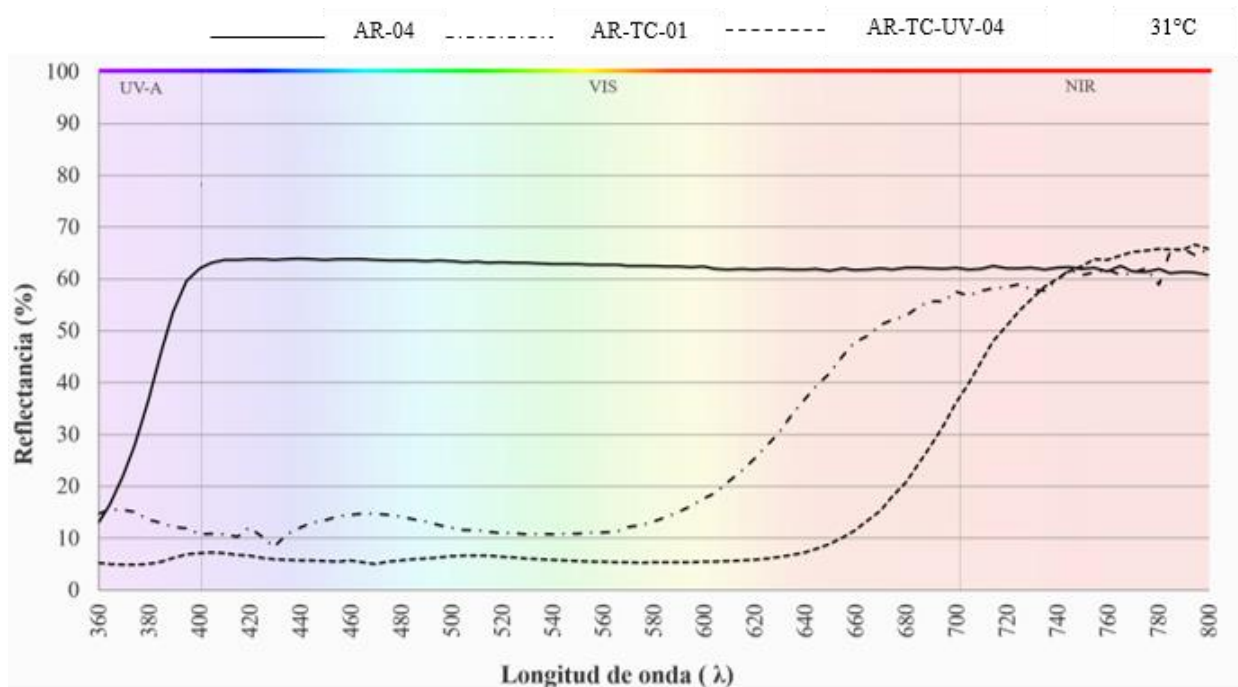
En la Figura 77 se presenta la relación de reflectancia y longitud de onda para las muestras prototipo cuando estas se encuentran a 31 °C, es decir cuando alcanzan la temperatura de transición, a partir de los datos expuestos en la figura se determinaron los siguientes puntos:

- En el espectro UV-A la mayor reflectancia se encuentra en la muestra AR-04, seguida por la muestra AR-TC-01 y la muestra AR-TC-UV-04, con una reflectancia de 34.43 %, 13.96 % y 5.46 % respectivamente.
- En el espectro VIS, la muestra AR-04 tuvo nuevamente la mayor reflectancia, con un valor de 62.83 %, en este intervalo la muestra AR-TC-01 experimentó su primer cambio importante, con una reflectancia de 13.91 %, este incremento se observa claramente a partir de los 600 nm. En cuanto a la muestra AR-TC-UV-04, esta demostró un comportamiento bastante similar al intervalo de temperatura de 29 °C, con una reflectancia de 8.045 %, lo cual puede haber sido ocasionado por la presencia del barniz protector UV.
- Finalmente, en el espectro NIR, las muestras AR-04, AR-TC-01 y AR-TC-UV-04 registraron una reflectancia de 61.86 %, 60.65 % y 58.28 % respectivamente, lo anterior demostró que una vez que las muestras termocrómicas superan la

temperatura de transición la reflectancia en el espectro NIR es bastante cercana a la de la muestra AR-04.

Figura 77

Reflectancia de muestras prototipo a 31 °C



Por último, se analizó la reflectancia de las muestras prototipo en el intervalo de temperatura de 45 °C, la cual fue la temperatura máxima a la cual se llevó a cabo la medición en el espectrofotómetro. De acuerdo con los resultados que se muestran en la Figura 78, el comportamiento de las muestras para los rangos del espectro evaluados fue el siguiente:

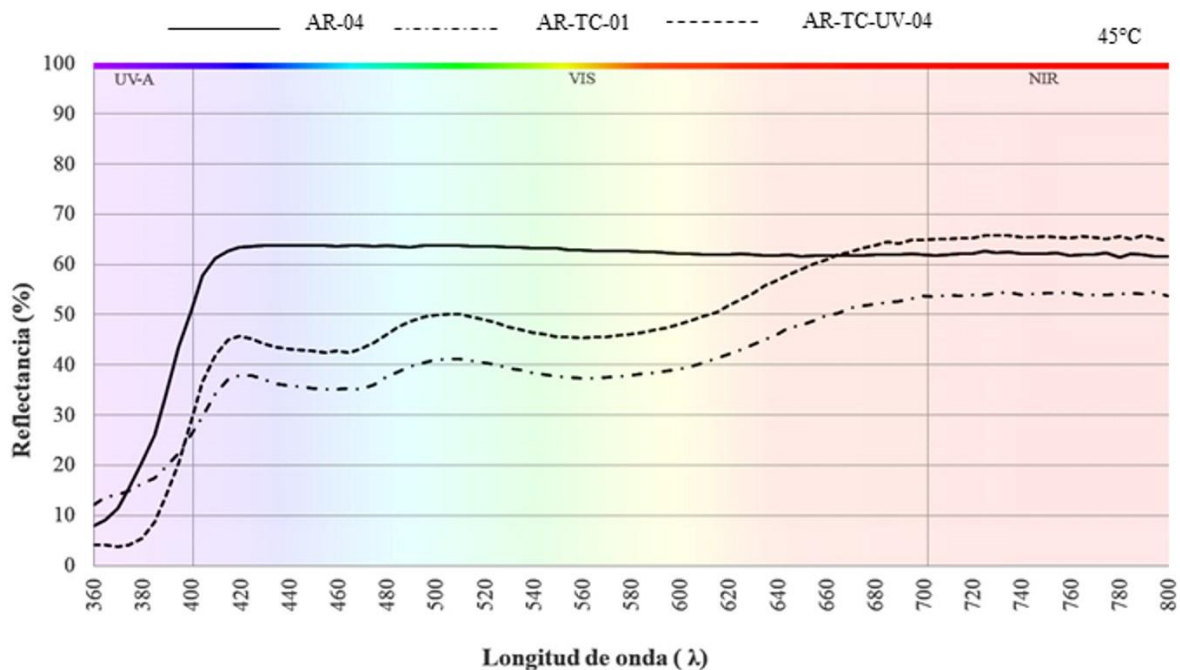
- En el espectro UV-A el mayor porcentaje de reflectancia fue también registrado por la muestra AR-04, con un valor de 21 %, por su parte, la muestra AR-TC-01 presentó una reflectancia de 16.36 % y la muestra AR-TC-UV-04 una reflectancia de 8.03 %.
- Para el espectro VIS, la muestra con la mayor reflectancia difusa fue la AR-04, con 62.52 %, en cuanto a las muestras termocrómicas, estas obtuvieron una reflectancia de 40.53 % para la muestra AR-TC-01 y 49.37 % en la muestra AR-TC-UV-04. Lo anterior indicó que a pesar de que las muestras termocrómicas exhiben su estado de decoloración, su reflectancia en el espectro VIS no supera la de la muestra AR-04, sin embargo, al acercarse al límite de espectro (700 nm) la reflectancia de las

muestras termocrómicas tiende a incrementar significativamente. Cabe destacar que a esta temperatura la muestra AR-TC-UV-04 supera en su reflectancia a la muestra AR-TC-01, retomando los resultados del análisis de las muestras a 31 °C, puede concluirse que a pesar de que el recubrimiento protector UV retrasa el cambio de color del recubrimiento termocrómico, una vez que el pigmento cambia a su estado de decoloración la superficie del protector UV contribuye a un mayor porcentaje de reflectancia visible.

- En cuanto al espectro NIR, la muestra con la mayor reflectancia fue la AR-TC-UV-04 con un valor de 65.35 %, seguida por la muestra AR-04 con un valor de 62.02 % y la muestra AR-TC-01 con un valor de 54.06 %. Esto demuestra que la muestra AR-TC-UV-04 es la que obtuvo el mejor desempeño en este rango del espectro, por lo que a pesar de no superar la reflectancia visible de la muestra AR-04 si puede potencialmente reflejar un mayor porcentaje de radiación infrarroja cuando se expone a altas temperaturas.

Figura 78

Reflectancia de muestras prototipo a 45 °C







4.7. Análisis de termografía infrarroja

La emitancia térmica de las muestras AR-04, AR-TC-01 y AR-TC-UV-04 fue estimada con base al método propuesto por el ASTM E1933, utilizando como instrumento de medición una cámara termográfica de la marca FLIR con rango espectral de 8 a 14 μm y como material modificador de superficie se utilizó una cinta aislante de la marca 3M, referida en esta investigación como muestra REF-3M, las muestras analizadas se observan en la Tabla 27.

Tabla 27

Muestras seleccionadas para el análisis de termografía infrarroja

Nomenclatura de la muestra	Descripción	Imagen de referencia
AR-04	Sustrato: Aluminio 5052 Capa I: APOC 252 Sunwhite	
AR-TC-01	Sustrato: Aluminio 5052 Capa I: APOC 252 Sunwhite Capa II: Recubrimiento termocrómico	
AR-TC-UV-04	Sustrato: Aluminio 5052 Capa I: APOC 252 Sunwhite Capa II: Recubrimiento termocrómico Capa III: Recubrimiento protector UV	
REF-3M	Sustrato: Aluminio 5052 Capa I: Cinta aislante 88, 3M	

Adicionalmente, se utilizó el módulo experimental para la regulación de la temperatura superficial, lo cual permitió una mayor precisión al momento de conocer la temperatura a la que se encontraban las muestras. Sumado a lo anterior, el sistema termoeléctrico permitió el control de temperatura superficial por periodos de tiempo prolongados, facilitando la captura de todas las imágenes en una sola sesión por muestra. El voltaje suministrado para la regulación de la temperatura se encontró en un rango de 1 a 17 V, y se reguló constantemente hasta que la temperatura se mantuvo estable con variaciones de ± 5 °C.

El procedimiento consistió en primeramente registrar la temperatura de la muestra REF-3M para los intervalos de 15 °C a 45 °C, ingresando como parámetros de medición a la cámara termográfica una $\epsilon=0.96$ ya que es el valor sugerido por Teledyne FLIR, y los parámetros climáticos de temperatura del aire, temperatura reflejada y humedad relativa acorde a lo registrado por un dispositivo data logger en tiempo real. Posteriormente se retiró la muestra REF-3M y se intercambié por la muestra prototipo a medir repitiendo las precisiones anteriores. Es importante señalar que en este análisis el valor mínimo de 13 °C propuesto en el protocolo de la sección 3.5.6. fue omitido debido a que las condiciones ambientales del espacio superaron el punto de rocío de las muestras termocrómicas, exponiendo al experimento a mediciones erróneas por tratarse superficies húmedas. A continuación, se presentan los resultados para los intervalos críticos de temperatura: 15 °C, 29 °C, 31 °C y 45 °C.

4.7.1. Emitancia térmica de la muestra AR-04

Para el intervalo de temperatura de 15 °C se asignaron los valores de ϵ de 0.88, 0.87 y 0.86, dado que 0.87 es el valor indicado en la ficha técnica del producto APOC 252 y 0.86 y 0.85 son los valores más cercanos. Los parámetros ambientales ingresados en la cámara termográfica fueron una temperatura ambiente de 21 °C, una temperatura reflejada de 21 °C, una humedad relativa de 73 % y una distancia mínima de 1 m. Con valor de $\epsilon=0.88$ la muestra registró una T_{sup} de 16°C, a $\epsilon=0.87$, registró un valor de 16.5°C y por último a $\epsilon=0.86$ un valor de T_{sup} de 15.8°C. Con el fin encontrar un valor que se acercara la temperatura aparente de la muestra a la temperatura registrada en el material modificador de superficie (REF-3M) se asignó un valor más de emisividad igual a 0.85, el cual registro una T_{sup} de 15.1°C, por lo que se tomó como valor de emisividad para la muestra AR-04.

En el intervalo de 29 °C los valores de ϵ ingresados fueron 0.88, 0.87 y 0.86, la temperatura ambiente y la temperatura reflejada se actualizaron a 20 °C y la humedad relativa a 72 %. Con $\epsilon=0.88$ la T_{sup} fue igual a 29.1 °C, $\epsilon=87$ por su parte registró una T_{sup} de 26.7 °C y $\epsilon=86$ una T_{sup} de 27 °C. En este caso el valor de temperatura más cercano fue el correspondiente a $\epsilon=0.88$, por que se determinó que a 29 °C la emitancia de la muestra es igual a 0.88.

El siguiente intervalo de interés fue el de 31 °C, los valores de ϵ en esta ocasión fueron 0.88, 0.87 y 0.86, los parámetros de temperatura ambiente, temperatura reflejada y humedad se mantuvieron constantes con respecto a la medición anterior. Para $\epsilon=0.88$ la T_{sup} fue igual a 31









°C, $\varepsilon=0.87$ registró una T_{sup} de 27.8 °C y a $\varepsilon=0.86$ una T_{sup} de 27.6 °C. Por lo anterior, el valor de $\varepsilon=0.88$ se tomó como correcto.

Por último, en el intervalo de 45 °C, los valores de emitancia fueron nuevamente 0.88, 0.87 y 0.86, para esta medición el parámetro de humedad relativa se actualizó a 74 % ya que el data logger indicó este cambio en el ambiente del entorno. Para $\varepsilon=0.88$ la T_{sup} fue de 45.7 °C, para $\varepsilon=0.87$ fue de 46 °C y para $\varepsilon=0.86$ fue de 46.9 °C, dado que la emitancia de 0.88 fue la más cercana se realizaron más pruebas mediante el software *FLIR tools* modificando este valor a 0.89, 0.90, y 0.91, siendo este último el más próximo con una T_{sup} de 45.1 °C.

Los resultados de la estimación de la emitancia térmica se resumen en la Tabla 28, de acuerdo con estos datos la emitancia de la muestra estimada en este estudio es bastante cercana al establecido por el proveedor del producto APOC 252, salvo por la temperatura mínima de 15 °C en donde la emitancia tiende a decrecer, así como para la temperatura máxima de 45 °C en donde esta tiende a incrementar, por lo que se concluye que este recubrimiento presenta distintos valores de emitancia en función de su temperatura superficial, corroborando que a mayor temperatura mayor es la emitancia.

Tabla 28

Resultados del análisis de termografía infrarroja para la muestra AR-04

Precisiones R-3M	Imagen radiométrica	Precisiones AR-04	Imagen radiométrica
<p>$\epsilon: 0.96$</p> <p>$T_{\text{sup-S1}}: 15 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{sup-FLIR}}: 15 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{amb}}: 20 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>HR: 73 %</p>		<p>$\epsilon: 0.85$</p> <p>$T_{\text{sup-S1}}: 15 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{sup-FLIR}}: 15.1 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{amb}}: 21 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>HR: 73 %</p>	
<p>$\epsilon: 0.96$</p> <p>$T_{\text{sup-S1}}: 29 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{sup-FLIR}}: 29.2 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{amb}}: 21 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>HR: 73 %</p>		<p>$\epsilon: 0.88$</p> <p>$T_{\text{sup-S1}}: 29 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{sup-FLIR}}: 29 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{amb}}: 20 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>HR: 72 %</p>	
<p>$\epsilon: 0.96$</p> <p>$T_{\text{sup-S1}}: 31 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{sup-FLIR}}: 31.4 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{amb}}: 21 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>HR: 73 %</p>		<p>$\epsilon: 0.88$</p> <p>$T_{\text{sup-S1}}: 31 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{sup-FLIR}}: 30.5 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{amb}}: 20 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>HR: 72 %</p>	
<p>$\epsilon: 0.96$</p> <p>$T_{\text{sup-S1}}: 45 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{sup-FLIR}}: 44.9 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{amb}}: 20 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>HR: 73 %</p>		<p>$\epsilon: 0.91$</p> <p>$T_{\text{sup-S1}}: 31 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{sup-FLIR}}: 45.1 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>$T_{\text{amb}}: 20 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>HR: 74 %</p>	

Nota. S1 representa el valor de temperatura registrado en tiempo real por el control PID

4.7.2. Emitancia térmica de la muestra AR-TC-01

Para el intervalo de temperatura de 15 °C se asignaron los valores de ϵ de 0.96, 0.95, 0.94 y 0.93, estos valores fueron determinados a partir de la emitancia conocida para la pintura negra, el cual es del 0.95 de acuerdo con el apéndice B, mientras que el resto son valores cercanos a este. Los parámetros climáticos ingresados a la cámara termográfica fueron una temperatura ambiente de 20 °C, una temperatura reflejada de 20 °C, una humedad relativa de 70 % y una distancia mínima de 1 m. Ingresando el valor $\epsilon=0.96$ la muestra registró una T_{sup} de 15.3 °C, un valor de $\epsilon=0.95$ registró un valor de 15.2 °C, el valor de $\epsilon=0.94$ registro una T_{sup} de 15.9 °C, y finalmente $\epsilon=0.93$ una T_{sup} de 15.7 °C, por lo que el valor de emisividad asignado a este intervalo de temperatura fue 0.95.









En el intervalo de 29 °C los valores de emitancia asignados fueron nuevamente 0.96, 0.95 y 0.94, el valor de la humedad relativa se actualizó a 74 % debido al cambio de este parámetro en el data logger. De acuerdo con los resultados obtenidos, para una $\epsilon=0.96$ la T_{sup} fue igual a 28.9 °C, $\epsilon=0.95$ por su parte registró una T_{sup} de 28.4 °C y $\epsilon=0.94$ una T_{sup} de 28.9 °C. Al ser $\epsilon=0.96$ el valor que más se acercó a los 29 °C, este se tomó como correcto.

Posteriormente se realizó el análisis de la muestra a 31 °C, cabe mencionar que para este punto de temperatura de la muestra ya sobrepasaba su temperatura de transición, por lo que con base a los resultados obtenidos de la medición de la emisividad de la muestra AR-04, se asignaron como valores de emisividad 0.88, 0.87 y 0.86. Los parámetros ambientales (temperatura ambiente, temperatura reflejada y humedad) se mantuvieron en 20 °C y 74 % respectivamente. Para un $\epsilon=0.88$ la T_{sup} fue igual a 30.4 °C, $\epsilon=0.87$ registró una T_{sup} de 31.1 °C y $\epsilon=0.86$ una T_{sup} de 31.2 °C. Con base a lo anterior, el valor 0.87 se tomó como correcto.

La última medición se realizó en el intervalo de 45 °C, los valores de emitancia fueron de nuevo 0.88, 0.87 y 0.86, manteniéndose también los parámetros ambientales. Para $\epsilon=0.88$ la T_{sup} fue de 44.2 °C, para $\epsilon=0.87$ fue de 43.2 °C y para $\epsilon=0.86$ fue de 43.6 °C, dado que la emitancia de 0.88 fue la más próxima se analizaron los valores sucesivos en el software FLIR tools, sin embargo, para los valores 0.89, 0.90 y 0.91 la temperatura aparente de la muestra bajaba a 43 °C, por lo que se mantuvo el valor de 0.88 como el más cercano a la emitancia del material a esta temperatura. Los resultados obtenidos se presentan a manera de resumen en la Tabla 29, estos demuestran que la muestra termocrómica presenta una mayor emitancia térmica

por debajo de su temperatura de transición, en la medida que la muestra incrementa su temperatura la emitancia tiende a disminuir, ya que al exhibirse el estado de decoloración la emitancia adquiere el valor del recubrimiento APOC 252.

Tabla 29. Resultados del análisis de termografía infrarroja para la muestra AR-TC-01

Precisiones R-3M	Imagen radiométrica	Precisiones AR-TC-01	Imagen radiométrica
$\epsilon: 0.96$ $T_{\text{sup-S1}}: 15 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{sup-FLIR}}: 15 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{amb}}: 20 \text{ }^\circ\text{C}$ HR: 73 %		$\epsilon: 0.95$ $T_{\text{sup-S1}}: 15 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{sup-FLIR}}: 15.2 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{amb}}: 20 \text{ }^\circ\text{C}$ HR: 70 %	
$\epsilon: 0.96$ $T_{\text{sup-S1}}: 29 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{sup-FLIR}}: 29.2 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{amb}}: 21 \text{ }^\circ\text{C}$ HR: 73 %		$\epsilon: 0.96$ $T_{\text{sup-S1}}: 29 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{sup-FLIR}}: 28.9 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{amb}}: 20 \text{ }^\circ\text{C}$ HR: 74 %	
$\epsilon: 0.96$ $T_{\text{sup-S1}}: 31 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{sup-FLIR}}: 31.4 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{amb}}: 21 \text{ }^\circ\text{C}$ HR: 73 %		$\epsilon: 0.87$ $T_{\text{sup-S1}}: 31 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{sup-FLIR}}: 31.1 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{amb}}: 20 \text{ }^\circ\text{C}$ HR: 74 %	
$\epsilon: 0.96$ $T_{\text{sup-S1}}: 45 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{sup-FLIR}}: 44.9 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{amb}}: 20 \text{ }^\circ\text{C}$ HR: 73 %		$\epsilon: 0.88$ $T_{\text{sup-S1}}: 31 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{sup-FLIR}}: 44.2 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{amb}}: 20 \text{ }^\circ\text{C}$ HR: 74 %	

Nota. S1 representa el valor de temperatura registrado en tiempo real por el control PID

4.7.3. Emitancia térmica de la muestra AR-TC-UV-04

En el intervalo de 15 °C se ingresaron en la cámara termográfica los parámetros ambientales del entorno, para la temperatura del ambiente y la temperatura reflejada se ingresó el valor de 20 °C y para la humedad relativa un valor de 77 %, los valores de emitancia asignados fueron 0.95 de acuerdo con el apéndice B, así como 0.94 y 0.93 por ser valores cercanos. En el valor de $\epsilon=0.95$ registró un T_{sup} de 15 °C, de $\epsilon=0.94$ registró un T_{sup} de 15.4 °C y de $\epsilon=0.93$ registró un T_{sup} de 14.9 °C, siendo $\epsilon=0.95$ el valor con la temperatura más cercana a la muestra REF-3M y al control PID.

Para el intervalo de temperatura de 29 °C los valores de emitancia asignados fueron 0.96, 0.95 y 0.94, el valor de la humedad relativa fue actualizado a 74 % de acuerdo con lo monitoreado en tiempo real por el data logger. Las temperaturas observadas en la cámara FLIR fueron para $\epsilon=0.96$ una T_{sup} de 28.9 °C, para de $\epsilon=0.95$ una T_{sup} de 29.4 °C, y para $\epsilon=0.94$ una T_{sup} de 29.3 °C, por lo que el valor de emitancia aceptado para este intervalo de temperatura fue 0.96.

El siguiente intervalo por medir fue el de 31 °C asignándose los valores de emitancia de 0.88, 0.87 y 0.86, estos valores fueron asignados de acuerdo con los resultados de la emitancia de la muestra AR-04, ya que 31 °C corresponde a la temperatura de transición. En cuanto a los parámetros ambientales, se actualizó en la cámara termográfica el valor de la humedad relativa a 76 % acorde a lo monitoreado por el dispositivo data logger. Para $\epsilon=0.88$ la T_{sup} fue igual a 31.2 °C, $\epsilon=0.87$ registró una T_{sup} de 31.3 °C y $\epsilon=0.86$ una T_{sup} de 31.4 °C, con base a lo anterior, el valor 0.88 se tomó como el correcto para este intervalo de temperatura.









Finalmente, para el intervalo de 45 °C, los valores de emitancia asignados fueron nuevamente 0.88, 0.87 y 0.86, la temperatura del ambiente y la temperatura reflejada ingresadas a la cámara termográfica fueron 23 °C y la humedad relativa fue de 62 %. Para $\epsilon=0.88$ la T_{sup} fue de 45.6 °C, para $\epsilon=0.87$ fue de 45.3 °C y para $\epsilon=0.86$ fue de 45.7 °C, al ser la emitancia 0.87 la más cercana a la temperatura del control PID y de la muestra REF-3M, se tomó este como el valor de ϵ a esta temperatura.

Estos resultados coinciden con los obtenidos para la muestra AR-TC-01, por lo que se concluyó que el estado de coloración de las muestras termocrómicas presentaron una mayor emitancia a la de la muestra del recubrimiento altamente reflectivo (AR-04), así como también

es destacable que la emitancia entre ambas muestras termocrómicas presentó resultados bastante cercanos, por lo que no hay un efecto derivado del recubrimiento protector UV sobre esta variable. En la Tabla 30 se presentan brevemente las fotografías térmicas obtenidas de este análisis y los parámetros ingresados en el dispositivo FLIR.

Tabla 30

Resultados del análisis de termografía infrarroja para la muestra AR-TC-UV-04

Precisiones R-3M	Imagen radiométrica	Precisiones AR-TC-UV-04	Imagen radiométrica
$\epsilon: 0.96$ $T_{sup-S1}: 15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{sup-FLIR}: 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{amb}: 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ HR: 73 %		$\epsilon: 0.95$ $T_{sup-S1}: 15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{sup-FLIR}: 15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{amb}: 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ HR: 77 %	
$\epsilon: 0.96$ $T_{sup-S1}: 29\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{sup-FLIR}: 29.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{amb}: 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ HR: 73 %		$\epsilon: 0.96$ $T_{sup-S1}: 29\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{sup-FLIR}: 28.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{amb}: 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ HR: 74 %	
$\epsilon: 0.96$ $T_{sup-S1}: 31\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{sup-FLIR}: 31.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{amb}: 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ HR: 73 %		$\epsilon: 0.88$ $T_{sup-S1}: 31\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{sup-FLIR}: 31.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{amb}: 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ HR: 76 %	
$\epsilon: 0.96$ $T_{sup-S1}: 45\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{sup-FLIR}: 44.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{amb}: 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ HR: 73 %		$\epsilon: 0.87$ $T_{sup-S1}: 31\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{sup-FLIR}: 45.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{amb}: 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ HR: 62 %	

Nota. S1 representa el valor de temperatura registrado en tiempo real por el control PID

4.8. Análisis mecano-óptico de topografía

Este análisis consistió en la lectura de la superficie de las muestras a escala nanométrica para evaluar su topografía, identificar la presencia de los pigmentos termocrómicos y medir el diámetro de los mismos, las muestras analizadas fueron la AR-04, AR-TC-01 y AR-TC-UV-04 (véase Tabla 31). Las mediciones se realizaron en un espacio cerrado con una temperatura ambiente de 20.7 °C, dicho valor fue medido mediante un termómetro digital. Para el análisis AFM se utilizó un cantiléver con una punta de 48 Newtons, el modo de medición fue por fuerza dinámica y la escala fue de 3.44 μm ya que esta permitió una mejor apreciación de los pigmentos termocrómicos. En la Figura 79 se observa parte del proceso de medición.

Tabla 31

Muestras seleccionadas para el análisis de mecano óptico de topografía




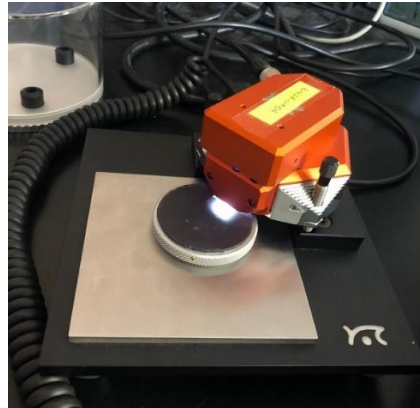
Nomenclatura de la muestra	Descripción	Imagen de referencia
AR-04	Sustrato: Aluminio 5052 Capa I: APOC 252 Sunwhite	
AR-TC-01	Sustrato: Aluminio 5052 Capa I: APOC 252 Sunwhite Capa II: Recubrimiento termocrómico	
AR-TC-UV-04	Sustrato: Aluminio 5052 Capa I: APOC 252 Sunwhite Capa II: Recubrimiento termocrómico Capa III: Recubrimiento protector UV	

Figura 79

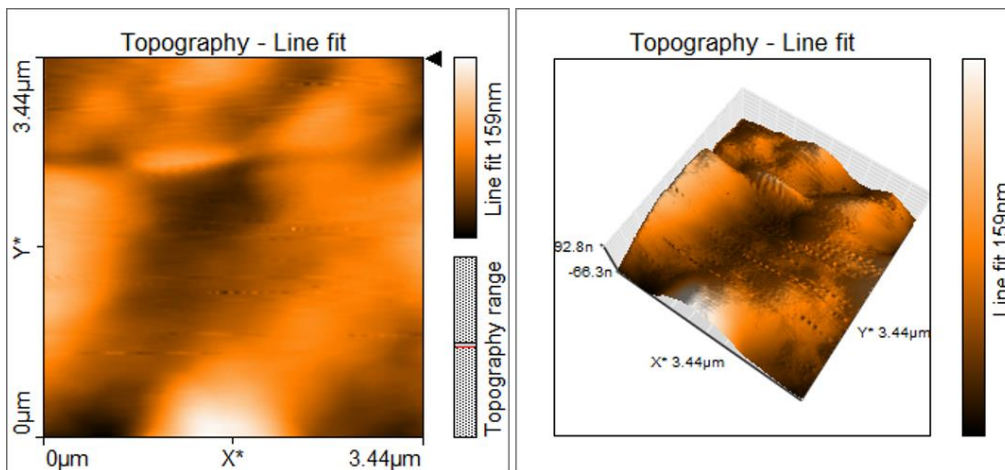
Análisis de muestra prototipo mediante microscopio AFM



Primeramente, se realizó el barrido de la cara al aire de la muestra AR-04 con un área de $3.44 \times 3.44 \mu\text{m}$ (Figura 80), en esta muestra no se observa la presencia de los pigmentos termocrómicos sin embargo si es posible apreciar cierta rugosidad en la superficie, lo cual puede deberse a los componentes de la pintura APOC 252.

Figura 80

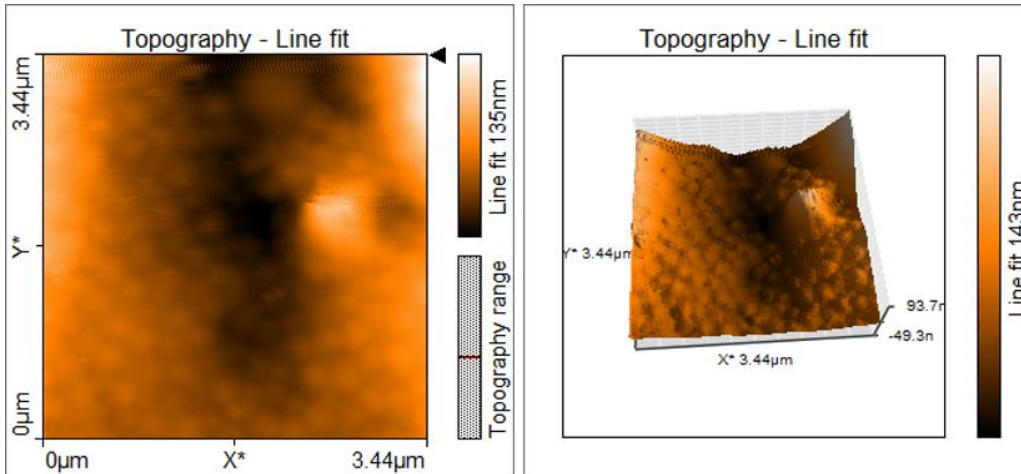
Topografía de la muestra AR-04



El segundo barrido se realizó con la muestra AR-TC-01 con un área de $3.44 \times 3.44 \mu\text{m}$ (Figura 81), en esta ocasión la superficie de la muestra si contiene pigmentos termocrómicos, los cuales pueden observarse claramente en la figura, mediante el software Nanosurf Easyscan fue posible medir el diámetro de estos, obteniendo un valor de entre 200 y 300 nm.

Figura 81

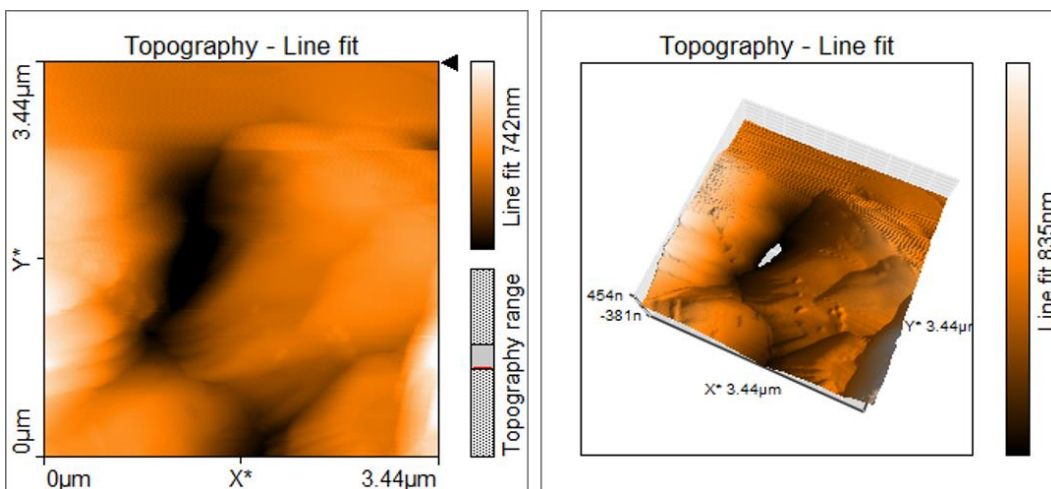
Topografía de la muestra AR-TC-01



El tercer barrido se realizó con la muestra AR-TC-UV-04 nuevamente con un área de 3.44 x 3.44 μm , los resultados se presentan en la Figura 82, en la cual se aprecia un cambio drástico en la rugosidad de la superficie con respecto a los pigmentos termocrómicos los cuales han dejado de ser perceptibles debido a la capa del recubrimiento protector UV, asimismo se observó una mayor irregularidad con respecto a las muestras anteriores, lo cual puede estar relacionado con el método de aplicación por aerosol.

Figura 82

Topografía de la muestra AR-TC-UV-04



DISCUSIÓN

El sobrecalentamiento urbano es un desafío que hoy en día afecta principalmente a las grandes ciudades, sin embargo, ante los futuros escenarios de expansión urbana es sustancial la incorporación de mejores materiales constructivos, sobre todo en aquellas economías de bajos ingresos, cuyo crecimiento se prevé alcanzará un 141 % para el año 2050 (UN-Hábitat, 2022). Desde una perspectiva de mitigación y prevención, en la presente investigación se realizó una evaluación del potencial de mitigación de los materiales fríos, atendiendo primeramente el reconocimiento de sus principales características, los componentes e instrumentos requeridos y las zonas climáticas en que estos se han evaluado con anterioridad. Seguidamente, se propuso el diseño de un material termocrómico de acuerdo a las condiciones climáticas de la ciudad de Ensenada, B.C.

El material desarrollado fue entonces un recubrimiento multicapa, conformado por una primera capa de un recubrimiento elastomérico acrílico altamente reflectivo, una segunda capa de un recubrimiento termocrómico con una temperatura de transición de 31 °C elaborado mediante pigmentos microencapsulados con un diámetro de entre 200 a 300 nm, y una tercera capa de un recubrimiento protector a la radiación ultravioleta. Lo anterior es una propuesta poco explorada en este tipo de materiales, ya que de los materiales fríos presentes en el campo de la investigación actual son los materiales de enfriamiento radiante diurno los más hacen uso de este tipo de estructuras como es el caso de Huan (2017), quien aprovecho múltiples capas para mejorar el desempeño de un material DRC.

Durante el proceso de diseño y fabricación de la presente investigación, se identificó que actualmente los materiales denominados como fríos y con un comportamiento estático se encuentran ya presentes en la industria a nivel internacional (CRRC, 2022), por lo que su incorporación a gran escala es una meta factible, sin embargo en lo respecta a los materiales termocrómicos, estos a pesar de ser ampliamente estudiados en este campo de investigación, aún presentan retos importantes en lo que respecta a su durabilidad ante ambientes exteriores, es por este motivo que su presencia en la industria como material de uso final y de grado arquitectónico depende en gran medida de los desarrollos tecnológicos para su optimización.

De igual manera, la selección del producto de protección a la radiación ultravioleta fue una etapa compleja debido a las limitantes en el campo de la investigación sobre el desarrollo y evaluación de estos productos para mejorar la resistencia de los materiales termocrómicos

aplicables en condiciones reales, ya que los estudios consultados hacen uso de películas plásticas que difícilmente pueden incorporarse como acabado final en superficies exteriores (Karlessi y Santamouris, 2015), aunque, si fue posible identificar que en otras disciplinas como es el caso del resguardo del patrimonio, sobre todo de murales exteriores, si existe un interés en crecimiento para la investigación, la fabricación y el análisis de este tipo de productos (Pozo-Antonio et al., 2023).

El mayor reto durante la caracterización óptica de las muestras prototipo fue la manipulación de su temperatura superficial, estudios previos resolvieron esta cuestión mediante la medición de esta variable en dos sesiones: en su estado de coloración y en su estado de decoloración, incrementado la temperatura superficial de las muestras mediante el uso de un plato caliente de laboratorio previo a la colocación de las muestras en el espectrofotómetro (Berardi et al., 2020), sin embargo este procedimiento no permite el control de la temperatura por tiempos prolongados además de no llevar el registro de la temperatura de la muestra al momento de la medición. Como contribución, en la presente investigación se propuso el uso de un sistema termoeléctrico conectado a un portaobjetos para la regulación y el control de la temperatura superficial, este método facilitó el análisis de las muestras en intervalos de temperatura de especial interés, como fue el caso de la temperatura sol aire y la temperatura de transición.

De igual forma, investigaciones anteriores evaluaron la emitancia de materiales termocrómicos durante ciclos de enfriamiento/calentamiento en su estado de coloración y en su estado de decoloración, tomando fotografías en cada caída del temperatura ($0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Soudian et al., 2020). En lo respecta a la presente investigación, se realizó la toma de las fotografías térmicas en ciclos de calentamiento y enfriamiento de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, la regulación de la temperatura se realizó por medio del mismo sistema termoeléctrico, el cual además de suministrar el calor a la muestra prototipo funcionó como una referencia de control sobre la temperatura superficial que debía registrarse en la cámara termográfica.

Los resultados de la caracterización óptica indicaron que por debajo de los $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ la muestras termocrómicas absorben la mayor parte de la radiación visible incidente, con porcentajes de entre 3.73% y 4.53% cuando estas se encuentran a $13\text{ }^{\circ}\text{C}$, similar a lo reportado

por Hu et al. (2019), quien también mediante pigmentos termocrómicos con un estado de coloración negro y una TT de 31 °C reportó una reflectancia VIS de 5 %.

Sin embargo, en el espectro NIR las muestras termocrómicas de la presente investigación incrementaron significativamente su reflectancia entre un 41.98 % y 52.70 %, lo cual puede llegar a decrecer su potencial de calentamiento, sumado a lo anterior, la emitancia térmica de las muestras a 15 °C alcanzó valores de entre 0.95 y 0.96, comprometiendo también su desempeño en el invierno. En contraste con lo anterior, la muestra altamente reflectiva (AR-04) reflejó el 63.13 % de la radiación VIS, el 62.98 % de la radiación NIR y reportó una emitancia de entre 0.87 y 0.88, contrastando con los resultados de otros estudios en donde utilizaron también recubrimientos fríos, como Zhang et al. (2022) quien también utilizó un compuesto reflectivo a base de TiO₂ el cual alcanzó una reflectancia VIS mayor al 80 %.

Cuando las muestras termocrómicas superaron la temperatura de transición, su reflectancia en el espectro VIS se elevó entre 40.53 % y 49.37 %, alcanzando un valor máximo de 65.35 % en el espectro NIR, concordando con los resultados obtenidos por Soudian (2020) mediante pintura termocrómica elevada a 45 °C. En cuanto a la emitancia térmica por arriba de la TT, las muestras termocrómicas mostraron una disminución de su valor ϵ de entre 0.96 y 0.95 a un valor de entre 0.88 y 0.87, que, si bien es un valor menor al del estado de coloración, sigue siendo considerado como una emitancia alta.

Con base a estos resultados se considera que el material termocrómico a pesar de su alta reflectancia en el espectro NIR y su considerable emitancia térmica, puede promover el calentamiento pasivo en invierno de una manera más eficiente que los materiales fríos tradicionales, pero previo a su incorporación deben precisarse con mayor detenimiento sus beneficios por medio estudios de campo y de simulación que contemplen el costo beneficio del mismo. En cuanto a su potencial de enfriamiento, el material termocrómico presenta buenos resultados con base a su alta reflectancia NIR y su alta emitancia térmica, por lo que su uso en temporadas de verano puede promover el enfriamiento pasivo de los edificios.

Retomando la pregunta de investigación: *¿De qué manera puede un recubrimiento termocrómico elaborado a partir de una estructura multicapa, contribuir en la mitigación del efecto de la ICU a microescala durante los periodos cálidos extremos sin afectar negativamente a los periodos fríos?*; los resultados obtenidos corroboran que, la incorporación de un

recubrimiento termocrómico multicapa, constituido por materiales altamente reflectivos (VIS/NIR), materiales termocrómicos, y materiales altamente absorbentes (UV-A), permiten la modulación de la reflectancia difusa y la emitancia térmica en función de la temperatura del ambiente, por lo que pueden contribuir en la mitigación de la ICU a microescala durante los periodos cálidos extremos sin afectar significativamente a los periodos fríos en contraste con los materiales fríos tradicionales de comportamiento estático.

CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

En esta investigación se llevó a cabo el diseño y la caracterización de un recubrimiento termocrómico multicapa, optimizado mediante la combinación de tres recubrimientos: un recubrimiento altamente reflectivo de la radiación VIS/NIR, un recubrimiento termocrómico y un recubrimiento protector a la radiación UV. El desarrollo de muestras prototipo fue mediante la técnica de deposición de recubrimiento por centrifugado.

Para la etapa de caracterización fueron seleccionadas tres tipos de muestra prototipo, primeramente, una muestra monocapa del componente altamente reflectivo VIS/NIR denominada AR-04; en segundo lugar, una muestra bicapa con el componente altamente reflectivo y termocrómico denominada AR-TC-01 y, por último, una muestra tricapa elaborada mediante los componentes reflectivo, termocrómico y el recubrimiento protector UV a la cual se denominó AR-TC-UV-04.

Las propiedades ópticas de las muestras fueron evaluadas por debajo y por encima de la temperatura de transición (31 °C) de los pigmentos termocrómicos utilizados. La reflectancia difusa fue medida mediante un espectrofotómetro UV-VIS-NIR y una esfera de integración en un rango de 360 a 880 nm, la emitancia térmica fue estimada mediante una cámara termográfica en la longitud de onda infrarroja de 8 a 14 μm , en ambos análisis el control y la regulación de la temperatura se realizó mediante un sistema termoeléctrico desarrollado como parte de este estudio. Como complemento, para conocer el diámetro de los pigmentos termocrómicos se empleó un microscopio de fuerza atómica.

Por debajo de la temperatura de transición (a 13 °C) la muestra con la mayor reflectancia en el espectro UV-A fue la AR-04, con una reflectancia promedio de 14.53 % la cual fue influenciada por la presencia de TiO_2 en el producto utilizado. Similarmente en el espectro VIS la mayor reflectancia fue de 63.13 % para la muestra AR-04 debido a su tonalidad blanca, lo cual implica que en temporadas de clima frío y semifrío la muestra AR-04 puede llegar a disminuir las ganancias de calor de la cubierta afectando a las condiciones de confort térmico interior, por otro lado, las muestras termocrómicas AR-TC-01 y AR-TC-UV-04 presentaron una reflectancia de 4.53 % y 3.73 % respectivamente, por lo que estas al absorber la mayor parte de la radiación incidente pueden potencialmente contribuir a las ganancias de calor en los periodos fríos y semifríos de Ensenada.

En lo que respecta al espectro NIR la mayor reflectancia se da en la muestra AR-04, con un valor de 62.98 %, lo cual sustenta nuevamente sus limitaciones en el periodo frío y semifrío para promover el confort térmico. En cuanto a las muestras AR-TC-01 y AR-TC-UV-04 estas alcanzaron una reflectancia de 41.98 % y 52.70 %, por lo que a pesar de reflejar una menor proporción de radiación infrarroja si pueden también llegar a afectar a la absorción de la misma, en este sentido mayores estudios de campo y simulación son recomendables para conocer realmente sus beneficios en climas templados.

Continuando con la caracterización de las muestras por debajo de su temperatura de transición, los resultados de la emitancia térmica a 15 °C indicaron que todas las muestras emiten un alto porcentaje de radiación en la ventana infrarroja de 8 a 14 μm , lo cual también obstaculiza el calentamiento pasivo, sobre todo en las muestras termocrómicas con valores de $\epsilon=0.95$, por lo que para conocer con mayor detalle los beneficios de los recubrimientos termocrómicos es importante que futuros estudios contemplen la caracterización de otros tipos de compuestos termocrómicos que sumado a su comportamiento dinámico posean una baja emitancia cuando el material se expone a bajas temperaturas.

Con respecto a las propiedades de las muestras una vez superada la TT, cuando las muestras alcanzan los 45 °C la mayor reflectancia en el espectro UV-A se da en la muestra AR-04 con valor de 21 %. En el espectro VIS la muestra con el mayor porcentaje de reflectancia fue nuevamente la AR-04 con 62.52 %, en este rango del espectro ambas muestras termocrómicas incrementaron significativamente su reflectancia, la muestra AR-TC-01 alcanzó un 40.53 % y la muestra AR-TC-UV-04 un 49.37 % si bien son mucho más altos que en su estado de coloración no superan a la muestra AR-04. En el espectro NIR la mayor reflectancia se dio en la muestra fue la muestra AR-TC-UV-04 con un valor de 65.35 %, lo cual favorece en gran medida al potencial de enfriamiento de la muestra termocrómica tricapa.

Sumado a lo anterior, cuando las muestras alcanzan los 45 °C su emitancia presenta resultados favorables, sobre todo para la muestra AR-04 con un valor $\epsilon=0.91$, mientras que las muestras termocrómicas AR-TC-01 y AR-TC-UV-04 alcanzaron valores de $\epsilon=0.88$ y $\epsilon=0.87$ respectivamente, esto sugiere que todas las muestras contribuyen a una alta emisión de la radiación en la ventana atmosférica infrarroja en la longitud de onda de 8 a 14 μm .

En cuanto al efecto del recubrimiento protector UV, la alta absorbancia de la muestra AR-TC-UV-04 indica que una gran parte de la radiación es absorbida por este componente, sin embargo, es necesario que futuras investigaciones evalúen su efectividad por periodos de tiempo prolongados y de exposición directa a las condiciones ambientales, para de esta forma comprender mejor su efectividad contra el efecto de fotoblanqueo. En lo que respecta a este estudio, se corroboró que este componente no afecta a las cualidades cromáticas del material ni a la emitancia del mismo, aunque sí influye en su reflectancia en el espectro NIR.

Con base a lo antes descrito se concluye que el recubrimiento multicapa propuesto en esta investigación, representado por la muestra AR-TC-UV-04, es efectivo para promover el efecto de enfriamiento pasivo dada su alta reflectancia en el espectro NIR y su alta emitancia en la ventana atmosférica de 8 a 14 μm , lo anterior cuando se presenta el estado de decoloración. En cambio, cuando este se encuentra en su estado de coloración es capaz de favorecer al calentamiento pasivo debido a su alta absorbancia en el espectro VIS, sin embargo, su alta reflectancia en el espectro NIR y su alta emitancia en la ventana atmosférica pueden llegar a comprometer su efectividad.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos y de las limitaciones experimentadas en este estudio, se proponen las siguientes rutas a atender en investigaciones futuras:

- A pesar de que el sistema termoeléctrico funcionó correctamente, es recomendable la implementación de mejoras para incrementar su efectividad en temperaturas superiores a 45 °C y menores a 13 °C.
- Durante la ejecución del análisis de espectrofotometría se recomienda colocar sensores de temperatura ambiental en el puerto de reflectancia del espectrofotómetro para tener una mayor precisión del ambiente en el que se encuentra la muestra.
- En lo que respecta a recubrimientos multicapa, futuros estudios son necesarios para evaluar el efecto de reflexión interna entre las distintas capas de estos materiales.
- La determinación de la temperatura de transición ideal debe estudiarse con mayor detenimiento, así como el desempeño de los materiales termocrómicos en campo, tomando en consideración la reflexión y absorción múltiple entre los edificios.

- Debido a la tendencia del material termocrómico de incrementar su reflectancia en el espectro NIR, es importante que se realicen investigaciones con instrumentos de medición que permitan el análisis del material para longitudes de onda más allá del rojo.

REFERENCIAS

- Abrar, R., Sarkar, S. K., Nishtha, K. T., & Talukdar, S. (2022). *Assessing the Spatial Mapping of Heat Vulnerability under Urban Heat Island (UHI) Effect in the Dhaka Metropolitan Area.*
- Aburas, M., Ebendorff-Heidepriem, H., Lei, L., Li, M., Zhao, J., Williamson, T., Wu, Y., & Soebarto, V. (2021). Smart windows – Transmittance tuned thermochromic coatings for dynamic control of building performance. *Energy and Buildings*, 235, 110717. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110717>
- Adamowski, J., & Prokoph, A. (2013). Assessing the impacts of the urban heat island effect on streamflow patterns in Ottawa, Canada. *Journal of Hydrology*, 496, 225–237. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.032>
- Afirm Group. (2021). *Agentes absorbentes y estabilizadores de UV.* 1–3.
- Akbari, H., Bretz, S., Kurn, D. M., & Hanford, J. (1997). Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs. *Energy and Buildings*, 25(2), 117–126. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(96\)01001-8](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(96)01001-8)
- Akbari, H., & Kolokotsa, D. (2016). Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy and Buildings*, 133, 834–842. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.067>
- Akbari, H., & Matthews, H. D. (2012). Global cooling updates: Reflective roofs and pavements. *Energy and Buildings*, 55, 2–6. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.055>
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). *Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas.* 70(3), 295–310.
- Akbari, H., & Taha, H. (1991). The impacts of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four canadian cities. *Energy*, 17(2), 141–149.
- Al-Saud, K. A. (2009). Measured versus Calculated Roof Peak Sol-air Temperature in Hot-arid Regions. *J. King Saud Univ*, 21(1), 1–7.
- Aliofkhazraei, M., & Ali, N. (2014). AFM Applications in Micro/Nanostructured Coatings. In *Comprehensive Materials Processing* (Vol. 7). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00712-3>
- AMS. (2012). Radiative cooling. In *Glossary of meteorology.* https://glossary.ametsoc.org/wiki/Radiative_cooling
- APLITER. (2011). *Tablas de emisividad.* <https://dokumen.tips/documents/manual-flir-tablas-emisividad.html?page=1>
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mastellone, M., & Peter Vanoli, G. (2019). Phase change materials for reducing cooling energy demand and improving indoor comfort: A step-by-step retrofit of a Mediterranean educational building. *Energies*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/en12193661>
- Ashraf Vaghefi, S., Abbaspour, N., Kamali, B., & Abbaspour, K. C. (2017). A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions – Case study: California-Baja California Peninsula. *Environmental Modelling and Software*, 96, 181–198. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.033>
- ASTM International. (2011). Standard practice for calculating solar reflectance index of horizontal and low-sloped opaque surfaces. *American Society for Testing Materials*, 11(Reapproved 2019), 11–13.
- ASTM International. (2020). *ASTM E903-20, Standard Test Method for Solar Absorptance , Reflectance , and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres.* 03, 1–9. www.astm.org
- Baetens, R., Petter, B., & Gustavsen, A. (2010). *Phase change materials for building applications : A state-of-the-art review.* 42(2010), 1361–1368. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.026>
- Bao, H., Yan, C., Wang, B., Fang, X., Zhao, C. Y., & Ruan, X. (2017). Double-layer nanoparticle-based coatings for efficient terrestrial radiative cooling. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 168(November 2016), 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.04.020>
- Becherini, F., Lucchi, E., Gandini, A., Barrasa, M. C., Troi, A., Roberti, F., Sachini, M., Di Tuccio, M. C., Arrieta, L. G., Pockel , L., & Bernardi, A. (2018). Characterization and thermal performance evaluation of infrared reflective coatings compatible with historic buildings. *Building and Environment*, 134(February), 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.034>
- Bellia, L., Del Naja, V., & Fragliasso, F. (2020). Optical characteristics of traditional portuguese azulejos: Mixing colors to obtain “Cool” building façades. *Journal of Daylighting*, 7(2), 273–281. <https://doi.org/10.15627/JD.2020.23>
- Benjeddou, O., Alyousef, R., Mohammadhosseini, H., Soussi, C., Khadimallah, M. A., Alabduljabbar, H., & Tahir, M. M. (2020). Utilisation of waste marble powder as low-cost cementing materials in the production of mortar. *Journal of Building Engineering*, 32(May), 101642. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101642>
- Berardi, U., Garai, M., & Morselli, T. (2020). Preparation and assessment of the potential energy savings of thermochromic and cool coatings considering inter-building effects. *Solar Energy*, 209(July), 493–504. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.015>
- Berdahl, P., Chen, S. S., Destailats, H., Kirchstetter, T. W., Levinson, R. M., & Zalich, M. A. (2016). Solar Energy Materials & Solar Cells Fluorescent cooling of objects exposed to sunlight – The ruby example. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 157, 312–317. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.05.058>

- Bokaie, M., Zarkesh, M. K., Arasteh, P. D., & Hosseini, A. (2016). Assessment of Urban Heat Island based on the relationship between land surface temperature and Land Use/ Land Cover in Tehran. *Sustainable Cities and Society*, 23, 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.03.009>
- Boles, M. A., Çengel, Y. A., Boles, M. A., & Granados, V. (2019). *Termodinámica*.
- Butcher, G. (2016). *Tour of the Electromagnetic Spectrum*. National Aeronautics and Space Administration.
- C40 Cities, & UCCRN. (2018). *The future we don't want: how climate change could impact the World's Greatest Cities*. February, 59. https://c40-production-images.s3.amazonaws.com/other_uploads/images/1789_Future_We_Don't_Want_Report_1.4_hires_120618.original.pdf%0Ahttps://www.c40knowledgehub.org/s/article/The-future-we-don-t-want-How-climate-change-could-impact-the-world-s-greatest-c
- Carlosena, L., Andueza, Á., Torres, L., Irulegi, O., Hernández-Minguillón, R. J., Sevilla, J., & Santamouris, M. (2021). Experimental development and testing of low-cost scalable radiative cooling materials for building applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111209>
- Carlosena, L., Ruiz-Pardo, Á., Feng, J., Irulegi, O., Hernández-Minguillón, R. J., & Santamouris, M. (2020). On the energy potential of daytime radiative cooling for urban heat island mitigation. *Solar Energy*, 208(April), 430–444. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.015>
- Cascone, Y., Capozzoli, A., & Perino, M. (2018). Optimisation analysis of PCM-enhanced opaque building envelope components for the energy retrofitting of office buildings in Mediterranean climates. *Applied Energy*, 211(July 2017), 929–953. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.081>
- Castellani, B., Morini, E., Anderini, E., Filippini, M., & Rossi, F. (2017). Development and characterization of retro-reflective colored tiles for advanced building skins. *Energy and Buildings*, 154, 513–522. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.078>
- Cengel, Yunus A. , Ghajar, A. J. (2011). Fundamentos de la radiación térmica. *Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones*, 683–730.
- CESAR. (2017). *CESAR 's Booklet: The Electromagnetic Spectrum*.
- Cetto, A. M. (2019). La Luz. In *Fondo de Cultura Económica*.
- Chae, D., Son, S., Lim, H., Jung, P. H., Ha, J., & Lee, H. (2021). Scalable and paint-format microparticle–polymer composite enabling high-performance daytime radiative cooling. *Materials Today Physics*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2021.100389>
- Chen, J., Li, J., Wang, H., Huang, W., Sun, W., & Xu, T. (2019). Preparation and effectiveness of composite phase change material for performance improvement of Open Graded Friction Course. *Journal of Cleaner Production*, 214, 259–269. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.001>
- Chen, Z., Zhang, H., Duan, H., & Shi, C. (2021). Improvement of thermal and optical responses of short-term aged thermochromic asphalt binder by warm-mix asphalt technology. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123675>
- Chen, Z., Zhang, H., Duan, H., Wu, C., & Zhang, S. (2021). Long-term photo oxidation aging investigation of temperature-regulating bitumen based on thermochromic principle. *Fuel*, 286(P2), 119403. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119403>
- Coakley, J. A. (2003). Reflectance and Albedo, Surface. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, 1914–1923. <https://doi.org/10.1016/b0-12-227090-8/00069-5>
- CONAGUA. (2023). *Temperatura*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/pronostico-climatico/temperatura-form>
- Cortez, P. M. (2016). *Principios y aplicaciones de la espectroscopia de infrarrojo en el analisis de alimentos y bebidas*. 15(2), 1–23.
- CRRC. (2022). *Rated Roof Products*. <https://coolroofs.org/directory/roof>
- Dabén, M. (2013). *Efecto Invernadero vs. efecto Albedo*. <https://mariadaben.wordpress.com/2013/05/22/efecto-invernadero-versus-efecto-albedo/>
- Díaz, J. (2018). *La radiación de cuerpo negro y el nacimiento de la mecánica cuántica*. 1–15.
- Domingo, A. M. (2011). *Apuntes de Transmisión del Calor*.
- Dong, Y., Han, H., Wang, F., Zhang, Y., Cheng, Z., Shi, X., & Yan, Y. (2022). A low-cost sustainable coating: Improving passive daytime radiative cooling performance using the spectral band complementarity method. *Renewable Energy*, 192, 606–616. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.093>
- Doulos, L., Santamouris, M., & Livada, I. (2004). Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy*, 77(2), 231–249. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.04.005>
- Duckworth, F.S. and Sandberg, J. S. (1954). The Effect of Cities upon Horizontal and Vertical Temperature Gradients. *Bulletin of American Meteorological Society*, 3.

- Ebi, K. L., Vanos, J., Baldwin, J. W., Bell, J. E., Hondula, D. M., Errett, N. A., Hayes, K., Reid, C. E., Saha, S., Spector, J., & Berry, P. (2020). Extreme Weather and Climate Change: Population Health and Health System Implications. *Annual Review of Public Health*, 42, 293–315. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-012420-105026>
- EIA. (2021). *What is energy?* <https://www.eia.gov/energyexplained/what-is-energy/>
- Enríquez, E., Fuertes, V., Cabrera, M. J., Seores, J., Muñoz, D., & Fernández, J. F. (2017). New strategy to mitigate urban heat island effect: Energy saving by combining high albedo and low thermal diffusivity in glass ceramic materials. *Solar Energy*, 149, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.011>
- Environmental Protection Agency. (2011). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*, i–iii, 1–19.
- EPA. (2022a). *Climate Change Indicators: Heat-Related Deaths*. <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-heat-related-deaths#:~:text=Some statistical approaches estimate that,set shown in Figure 1.>
- EPA. (2022b). *Estrategias de enfriamiento para las islas de calor*. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/estrategias-de-enfriamiento-para-las-islas-de-calor>
- EPA. (2022c). *Heat Island Effect*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/heatislands>
- Fabiani, C., Castaldo, V. L., & Pisello, A. L. (2020). Thermochromic materials for indoor thermal comfort improvement: Finite difference modeling and validation in a real case-study building. *Applied Energy*, 262(June 2019), 114147. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114147>
- Fabiani, C., Piselli, C., & Pisello, A. L. (2020). Thermo-optic durability of cool roof membranes: Effect of shape stabilized phase change material inclusion on building energy efficiency. *Energy and Buildings*, 207, 109592. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109592>
- Fabiani, C., Pisello, A. L., Bou-Zeid, E., Yang, J., & Cotana, F. (2019). Adaptive measures for mitigating urban heat islands: The potential of thermochromic materials to control roofing energy balance. *Applied Energy*, 247(April), 155–170. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.020>
- Femenias, A. F. (2015). *Escuaramidas como agentes de "Quenching" de fluorescencia Grado de Química*.
- Feng, J., Gao, K., Santamouris, M., Shah, K. W., & Ranzi, G. (2020). Dynamic impact of climate on the performance of daytime radiative cooling materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 208(August 2019), 110426. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110426>
- Feng, J., Santamouris, M., & Gao, K. (2020). The radiative cooling efficiency of silica sphere embedded polymethylpentene (TPX) systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 215(June), 110671. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110671>
- Fernández-Mira, M., Jimenez-Relinque, E., Martínez, I., & Castellote, M. (2021). Evaluation of changes in surface temperature of TiO₂ functionalized pavements at outdoor conditions. *Energy and Buildings*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110817>
- Fest, E. (2013). Stray Light Analysis and Control. In *Environment* (pp. 1–39). SPIE. <https://doi.org/https://doi.org/10.1117/3.1000980>
- Founda, D., & Santamouris, M. (2017). Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Scientific Reports*, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11407-6>
- Freire, N. (2023). *Isaac Newton: el primer científico que explicó la naturaleza de los colores*. National Geographic Portugal. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/isaac-newton-primer-cientifico-explicar-naturaleza-colores_19587#:~:text=En 1665%2C Newton descubrió en,albergaba todos los colores visibles.
- G.K.Stylios. (2006). Engineering textile and clothing aesthetics using shape changing materials. In H.R. Mattila (Ed.), *Intelligent Textiles and Clothing*.
- Gao, Q., Wu, X., Fan, Y., & Meng, Q. (2018). Novel near infrared reflective pigments based on hollow glass microsphere/BiOC11-xIx composites: Optical property and superhydrophobicity. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 180(October 2017), 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.02.033>
- Garg, P. K. (2018). *Lecture 16: Remote Sensing - Blackbody and Atmospheric Window*. IIT Roorkee July 2018. <https://www.youtube.com/watch?v=PJWxAWpYng0>
- Garshasbi, S., Huang, S., Valenta, J., & Santamouris, M. (2020a). Can quantum dots help to mitigate urban overheating? An experimental and modelling study. *Solar Energy*, 206(May), 308–316. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.010>
- Garshasbi, S., Huang, S., Valenta, J., & Santamouris, M. (2020b). On the combination of quantum dots with near-infrared reflective base coats to maximize their urban overheating mitigation potential. *Solar Energy*,

- 211(July), 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.069>
- Garshasbi, S., Huang, S., Valenta, J., & Santamouris, M. (2022). Adjusting optical and fluorescent properties of quantum dots : Moving towards best optical heat-rejecting materials. *Solar Energy*, 238(July 2021), 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.026>
- Garshasbi, S., & Santamouris, M. (2019). Using advanced thermochromic technologies in the built environment: Recent development and potential to decrease the energy consumption and fight urban overheating. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 191(October 2018), 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.10.023>
- Gonzalez-Trevizo, M. E., Martinez-Torres, K. E., Armendariz-Lopez, J. F., Santamouris, M., Bojorquez-Morales, G., & Luna-Leon, A. (2021). Research trends on environmental, energy and vulnerability impacts of Urban Heat Islands: An overview. *Energy and Buildings*, 246, 111051. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111051>
- Granadeiro, V., Almeida, M., Souto, T., Leal, V., Machado, J., & Mendes, A. (2020). Thermochromic Paints on External Surfaces : Impact. *Energies*. <https://doi.org/doi:10.3390/en13081912>
- Hecht, E. (2017). Optics. In *Pearson Education Limited* (5th ed.).
- Hewitt, V., Mackres, E., & Shickman, K. (2014). Cool Policies for Cool Cities : Best Practices for Mitigating Urban Heat Islands in North American Cities. In *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings* (Issue 202). <http://aceee.org/research-report/ui1405>
- Hodgson, J. L., & Coote, M. L. (2010). Clarifying the mechanism of the denisov cycle: How do hindered amine light stabilizers protect polymer coatings from photo-oxidative degradation? *Macromolecules*, 43(10), 4573–4583. <https://doi.org/10.1021/ma100453d>
- Hu, J., & Yu, X. B. (2019a). Adaptive thermochromic roof system: Assessment of performance under different climates. *Energy and Buildings*, 192, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.040>
- Hu, J., & Yu, X. B. (2019b). Design and characterization of energy efficient roofing system with innovative TiO₂ enhanced thermochromic films. *Construction and Building Materials*, 223, 1053–1062. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.003>
- Huang, Z., & Ruan, X. (2017). Nanoparticle embedded double-layer coating for daytime radiative cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 890–896. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.009>
- IEA. (2020). *2020 Global status report for buildings and construction*.
- IIT Bombay. (2018). *Lección 10: Reflectancia, albedo y cantidades relacionadas*. https://www.google.com/search?gs_ssp=eJzj4tTP1TcwNEu2zDBg9OLKzCxRSMrPTUqsBABKMqb&q=iit+bombay&rlz=1C1VDKB_enMX1045MX1045&oq=IIT+bomba&aqs=chrome.1.0i355i512j46i512j69i57j0i22i3014j69i60.4224j0j9&sourceid=chrome&ie=UTF-8
- INEGI. (2020). *Información por entidad*. Senso de Población y Vivienda 2020. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bc/poblacion/default.aspx?tema=me&e=02>
- Jeong, S. Y., Tso, C. Y., Ha, J., Wong, Y. M., Chao, C. Y. H., Huang, B., & Qiu, H. (2020). Field investigation of a photonic multi-layered TiO₂ passive radiative cooler in sub-tropical climate. *Renewable Energy*, 146, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.119>
- Jin, J., Liu, L., Liu, R., Wei, H., Qian, G., Zheng, J., Xie, W., & Lin, F. (2019). Preparation and thermal performance of binary fatty acid with diatomite as form-stable composite phase change material for cooling asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 226, 616–624. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.305>
- Jin, J., Liu, S., Gao, Y., Liu, R., Huang, W., Wang, L., Xiao, T., Lin, F., Xu, L., & Zheng, J. (2021). Fabrication of cooling asphalt pavement by novel material and its thermodynamics model. *Construction and Building Materials*, 272, 121930. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121930>
- John R. Howell, M. Pinar Mengüç, Kyle Daun, R. S. (2021). Fundamentals of thermal radiation. In *Thermal Radiation Heat Transfer* (7th ed., pp. 561–590). CRC Press.
- Karlessi, T., & Santamouris, M. (2015). Improving the performance of thermochromic coatings with the use of UV and optical filters tested under accelerated aging conditions. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10(1), 45–61. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt027>
- Kim, Y. J. (2014). *Advanced Composites in Bridge Construction and Repair*.
- KortUm, G. v. (1969). *Reflectance Spectroscopy Principles, Methods, Applications*. Institut für Physikalische Chemie der Universität. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-88071-1>
- Kotteck, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>

- Kwon, Y., Sung, I., Hee, M., Kim, S., & Chul, J. (2017). Effect of PCM cool roof system on the reduction in urban heat island phenomenon. *Building and Environment*, *122*, 411–421. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.015>
- Kyriakodis, G. E., & Santamouris, M. (2018). Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates - Results from a large scale urban mitigation project. *Urban Climate*, *24*, 326–339. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.002>
- Landsberg, H. E. (1981). *The Urban Climate*.
- Lee, D., Go, M., Son, S., Kim, M., Badloe, T., Lee, H., Kim, J. K., & Rho, J. (2021). Sub-ambient daytime radiative cooling by silica-coated porous anodic aluminum oxide. *Nano Energy*, *79*(September 2020), 105426. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105426>
- Lee, K., & Brown, R. D. (2022). Effects of Urban Landscape and Sociodemographic Characteristics on Heat-Related Health Using Emergency Medical Service Incidents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph19031287>
- Lei, J., Kumarasamy, K., Zingre, K. T., Yang, J., Wan, M. P., & Yang, E. H. (2017). Cool colored coating and phase change materials as complementary cooling strategies for building cooling load reduction in tropics. *Applied Energy*, *190*, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.114>
- Levinson, R., Chen, S., Slack, J., Goudey, H., Harima, T., & Berdahl, P. (2020). Design, characterization, and fabrication of solar-retroreflective cool-wall materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *206*(April 2019), 110117. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110117>
- Li, Q., Hu, T., Luo, S., Gao, L., Wang, C., & Guan, Y. (2020). Evaluation of cooling effect and pavement performance for thermochromic material modified asphalt mixtures under solar radiation. *Construction and Building Materials*, *261*, 120589. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120589>
- Li, X., Peoples, J., Huang, Z., Zhao, Z., Qiu, J., & Ruan, X. (2020). Full Daytime Sub-ambient Radiative Cooling in Commercial-like Paints with High Figure of Merit. *Cell Reports Physical Science*, *1*(10), 100221. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100221>
- Li, Y., Zhang, Y., Yang, Z., Xue, X., He, Z., Wang, H., Wang, C., Qu, J., Feng, Y., Zhang, W., & Xu, L. (2020). Waterborne coatings with sub-ambient cooling under direct sunlight—part I: Optical properties and cooling effect measurements. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *217*(February), 110672. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110672>
- Lim, H., Chae, D., Son, S., Ha, J., & Lee, H. (2022). CaCO₃ micro particle-based radiative cooling device without metal reflector for entire day. *Materials Today Communications*, *32*(June), 103990. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103990>
- Lira, A. (2018). Transferencias de calor (cualidades térmicas de los materiales). In *Unidades de Apoyo de Aprendizaje*. https://uapa.cuaieed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/f0a34d71-c662-42f1-9913-7c189025e480/Transferencia_de_calor/index.html
- Lira Oliver, A., & Guevara Mon, A. B. (2017). *Cálculo Del Índice De La Reflectancia Solar*.
- Liu, J., Zhang, D., Jiao, S., Zhou, Z., Zhang, Z., & Gao, F. (2020). Preliminary study of radiative cooling in cooling season of the humid coastal area. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *208*(September 2019), 110412. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110412>
- Liu, J., Zhou, Z., Zhang, J., Feng, W., & Zuo, J. (2019). Advances and challenges in commercializing radiative cooling. *Materials Today Physics*, *11*, 100161. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2019.100161>
- Manni, M., Lobaccaro, G., Goia, F., & Nicolini, A. (2018). An inverse approach to identify selective angular properties of retro-reflective materials for urban heat island mitigation. *Solar Energy*, *176*(July), 194–210. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.003>
- Marsh, A. (2010). *Reflectivity and reflectance*. [http://performativedesign.com/definitions/light/reflectivity/#:~:text=However%2C it is very important,or samples of those media](http://performativedesign.com/definitions/light/reflectivity/#:~:text=However%2C%20it%20is%20very%20important,or%20samples%20of%20those%20media).
- Mauri, L., Battista, G., de Lieto Vollaro, E., & de Lieto Vollaro, R. (2018). Retroreflective materials for building's façades: Experimental characterization and numerical simulations. *Solar Energy*, *171*(June), 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.073>
- McCluney, R. (2008). Radiometry and Photometry. *Color Imaging*, 319–362. <https://doi.org/10.1201/b10637-9>
- Meenakshi, P., & Selvaraj, M. (2018). Bismuth titanate as an infrared reflective pigment for cool roof coating. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *174*(April 2017), 530–537. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.09.048>
- Mesloub, A., Ghosh, A., Kolsi, L., & Alshenaifi, M. (2022). Polymer-Dispersed Liquid Crystal (PDLC) smart switchable windows for less-energy hungry buildings and visual comfort in hot desert climate. *Journal of*

- Building Engineering*, 59(August), 105101. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105101>
- Mikla, V. I., Rusin, V. I., & Boldizhar, P. A. (2012). Advances in imaging from the first X-Ray images. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 14(7–8), 559–570. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-417021-6.00001-0>
- Miles, R. B., Lempert, W. R., & Forkey, J. N. (2001). Laser Rayleigh scattering. *Measurement Science and Technology*, 12(5). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/5/201>
- Mills, G. (2006). The Climate of London by Luke Howard (1833). *Iauc*, January 2006.
- Mora, M. E. (2009). *Diseño y construcción del prototipo de una esfera de ultravioleta*. UNIVERSIDAD DE LOS ANDES FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.
- Morais, L., Lopes, A., & Nogueira, P. (2021). Human health outcomes at the neighbourhood scale implications: Elderly's heat-related cardiorespiratory mortality and its influencing factors. *Science of the Total Environment*, 760, 144036. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144036>
- Morini, E., Castellani, B., Anderini, E., Presciutti, A., Nicolini, A., & Rossi, F. (2018). Optimized retro-reflective tiles for exterior building element. *Sustainable Cities and Society*, 37(October 2017), 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.007>
- Morini, E., Castellani, B., De Ciantis, S., Anderini, E., & Rossi, F. (2018). Planning for cooler urban canyons: Comparative analysis of the influence of façades reflective properties on urban canyon thermal behavior. *Solar Energy*, 162(October 2017), 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.064>
- Morini, E., Castellani, B., Presciutti, A., Anderini, E., Filipponi, M., Nicolini, A., & Rossi, F. (2017). Experimental analysis of the effect of geometry and façade materials on urban district's equivalent albedo. *Sustainability*, 9(7), 1245. <https://doi.org/10.3390/su9071245>
- Morini, E., Castellani, B., Presciutti, A., Filipponi, M., Nicolini, A., & Rossi, F. (2017). Optic-energy performance improvement of exterior paints for buildings. *Energy and Buildings*, 139, 690–701. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.060>
- Morron, L. (2014). *Radiación de cuerpo negro y catástrofe ultravioleta*. <https://losmundosdebrana.com/2014/03/10/radiacion-de-cuerpo-negro-y-catastrofe-ultravioleta/>
- Navarro-Estupiñan, J., Robles-Morua, A., Díaz-Caravantes, R., & Vivoni, E. R. (2020). Heat risk mapping through spatial analysis of remotely-sensed data and socioeconomic vulnerability in Hermosillo, México. *Urban Climate*, 31(July 2019), 100576. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100576>
- Nayak, S. G., Shrestha, S., Kinney, P. L., Ross, Z., Sheridan, S. C., Pantea, C. I., Hsu, W. H., Muscatiello, N., & Hwang, S. A. (2018). Development of a heat vulnerability index for New York State. *Public Health*, 161, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2017.09.006>
- NIST. (2021). *Spectrophotometry*. <https://www.nist.gov/programs-projects/spectrophotometry>
- NOAA. (2023). The Atmospheric Window. *National Weather Service*. <https://www.weather.gov/jetstream/absorb>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- ONU-Habitat. (2021). *Folleto de Datos Poblacionales 2020*. <https://onuhabitat.org.mx/index.php/folleto-de-datos-poblacionales-2020#:~:text=20 de enero%2C 2021.,tercio de la población global>
- P.Talvenmaa. (2006). Introduction to chromic materials. *Intelligent Textiles and Clothing*. <https://doi.org/10.1533/9781845691622.3.193>
- Paolini, R., & Santamouris, M. (2023). *Urban Climate Change and Heat Islands* (Vol. 21, Issue 1). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04618-6>
- Perez, G., Mota-Heredia, C., Sánchez-García, J. A., & Guerrero, A. (2020). Compatibility between thermochromic pigments and Portland cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 251, 119038. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119038>
- Perez, G., Sirvent, P., Sanchez-Garcia, J. A., & Guerrero, A. (2021). Improved methodology for the characterization of thermochromic coatings for adaptive façades. *Solar Energy*, 230(October), 409–420. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.062>
- Peréz, J. M. (2017). *Cambio de fase — Termodinámica*. https://termodinamica.readthedocs.io/en/latest/equilibrio_cambio_fase.html
- Philander, S. G. (2012). Encyclopedia of global warming. *SAGE*, Second edi.
- Piselli, C., Castaldo, V. L., & Pisello, A. L. (2019). How to enhance thermal energy storage effect of PCM in roofs with varying solar reflectance: Experimental and numerical assessment of a new roof system for passive cooling in different climate conditions. *Solar Energy*, 192(June 2018), 106–119. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.047>
- Pisello, A. L. (2015). High-albedo roof coatings for reducing building cooling needs. In C. G. Fernando Pacheco-

- Torgal, João Labrincha, Luisa Cabeza (Ed.), *Eco-Efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs* (1st ed.). Design, Properties and Applications.
- Pisello, A. L. (2017). State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities. *Solar Energy*, *144*, 660–680. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.068>
- Pisello, A. L., Fortunati, E., Fabiani, C., Mattioli, S., Dominici, F., Torre, L., Cabeza, L. F., & Cotana, F. (2017). PCM for improving polyurethane-based cool roof membranes durability. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *160*(July 2016), 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.09.036>
- Pisello, A. L., Fortunati, E., Mattioli, S., Cabeza, L. F., Barreneche, C., Kenny, J. M., & Cotana, F. (2016). Innovative cool roofing membrane with integrated phase change materials: Experimental characterization of morphological, thermal and optic-energy behavior. *Energy and Buildings*, *112*, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.061>
- Poverty, E., & Hub, A. (2022). *Introduction to the Energy Poverty Advisory Hub (EPAH) Handbooks: A Guide to Understanding and Addressing Energy Poverty*.
- Pozo-Antonio, J. S., Alonso-Villar, E. M., Rivas, T., & Márquez, I. (2023). Evaluation of a protective acrylic finish applied to surfaces painted with acrylic paints for outdoor or indoor uses. *Dyes and Pigments*, *212*(November 2022). <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2023.111141>
- Pyrgou, A., & Santamouris, M. (2018). Increasing probability of heat-related mortality in a mediterranean city Due to urban warming. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 15, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/ijerph15081571>
- Qi, Y., Zhao, H., Wu, Y., & Ren, Y. (2022). Facile preparation of solar reflective cool colored material with desired superhydrophobicity. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *242*(August 2021), 111761. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111761>
- Qin, Y., Zhao, Y., Chen, X., Wang, L., Li, F., & Bao, T. (2019). Moist curing increases the solar reflectance of concrete. *Construction and Building Materials*, *215*, 114–118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.164>
- R. Rebolo, S. I. (2018). *Cuerpo negro*. CosmoEduca. <https://www.iac.es/cosmoeduca/universo/anexos/cuerponegro.html>
- RAE. (2022). *Luz*. Real Academia Española. <https://dle.rae.es/luz>
- Ramos, N. M. M., Maia, J., Souza, A. R., Almeida, R. M. S. F., & Silva, L. (2021). Impact of incorporating nir reflective pigments in finishing coatings of etics. *Infrastructures*, *6*(6). <https://doi.org/10.3390/infrastructures6060079>
- Rathore, P. K. S., & Shukla, S. K. (2020). An experimental evaluation of thermal behavior of the building envelope using macroencapsulated PCM for energy savings. *Renewable Energy*, *149*, 1300–1313. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.130>
- Rosati, A., Fedel, M., & Rossi, S. (2021a). Laboratory scale characterization of cool roof paints: Comparison among different artificial radiation sources. *Progress in Organic Coatings*, *161*(September), 106464. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106464>
- Rosati, A., Fedel, M., & Rossi, S. (2021b). NIR reflective pigments for cool roof applications: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, *313*(April 2020), 127826. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127826>
- Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Romm, J. J., & Pomerantz, M. (1998). Cool communities: Strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings*, *28*(1), 51–62. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00063-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00063-7)
- Rossi, S., Calovi, M., Dalpiaz, D., & Fedel, M. (2020). The influence of NIR pigments on coil coatings' thermal behaviors. *Coatings*, *10*(6). <https://doi.org/10.3390/COATINGS10060514>
- Rosso, F., Pisello, A. L., Castaldo, V. L., Cotana, F., & Ferrero, M. (2017). Smart cool mortar for passive cooling of historical and existing buildings: Experimental analysis and dynamic simulation. *Energy Procedia*, *134*, 536–544. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.560>
- Rosso, F., Pisello, A. L., Castaldo, V. L., Fabiani, C., Cotana, F., Ferrero, M., & Jin, W. (2017). New cool concrete for building envelopes and urban paving: Optics-energy and thermal assessment in dynamic conditions. *Energy and Buildings*, *151*, 381–392. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.051>
- Rosso, F., Pisello, A. L., Castaldo, V. L., Ferrero, M., & Cotana, F. (2017). On innovative cool-colored materials for building envelopes: Balancing the architectural appearance and the thermal-energy performance in historical districts. *Sustainability (Switzerland)*, *9*(12), 1–13. <https://doi.org/10.3390/su9122319>
- Rosso, F., Pisello, A. L., Jin, W., Ghandehari, M., Cotana, F., & Ferrero, M. (2016). Cool marble building envelopes: The effect of aging on energy performance and aesthetics. *Sustainability (Switzerland)*, *8*(8).

<https://doi.org/10.3390/su8080753>

- S.J. Ling, J.Sanny, W. M. (2016). *University Physics Volume 3*. OpenStax.
- Saafi, K., & Daouas, N. (2019). Energy and cost efficiency of phase change materials integrated in building envelopes under Tunisia Mediterranean climate. *Energy*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115987>
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., Lucio, P. B., Valencia, S. M., & Torres, C. P. M. (2014). *Metodología de la investigación* (6th ed., Vol. 21, Issue 1). McGraw-Hill Education. <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>
- Santamouris, M. (2005). Passive cooling of buildings. *Advances of Solar Energy, January 2005*, 35–55. <https://doi.org/10.4324/9781315073668>
- Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>
- Santamouris, M., Papadopoulos, A. M., Paolini, R., Khan, A., Bartesaghi Koc, C., Haddad, S., Garshasbi, S., Arasteh, S., & Feng, J. (2022). *Cool Roofs. Cost Benefit Analysis*. 1(May), 149.
- Santamouris, M., & Vasilakopoulou, K. (2021). Present and Future Energy Consumption of Buildings: Challenges and Opportunities towards Decarbonisation. *E-Prime*, 1(August), 100002. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100002>
- Santamouris, M., & Young, G. (2020). Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island. *Renewable Energy*, 161, 792–807. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.109>
- Service., N. W. (n.d.). *The Atmospheric Window*. <https://www.weather.gov/jetstream/absorb>
- Sharma, M., Whaley, M., Chamberlain, J., Oswald, T., Schroden, R., Graham, A., Barger, M., & Richey, B. (2017). Evaluation of thermochromic elastomeric roof coatings for low-slope roofs. *Energy & Buildings*, 155, 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.030>
- Shimadzu Scientific Instruments. (2023). *Solid Sample Reflectance Measurements*. https://www.shimadzu.com/an/service-support/technical-support/analysis-basics/fundamentals-uv/reflectance_measurements.html#:~:text=Relative diffuse reflectance is measured,rough surface%2C such as paper.
- Son, S., Jeon, S., Chae, D., Lee, S. Y., Liu, Y., Lim, H., Oh, S. J., & Lee, H. (2021). Colored emitters with silica-embedded perovskite nanocrystals for efficient daytime radiative cooling. *Nano Energy*, 79(August 2020), 105461. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105461>
- Soudian, S., Berardi, U., & Laschuk, N. (2020). Development and thermal-optical characterization of a cementitious plaster with phase change materials and thermochromic paint. *Solar Energy*, 205(May), 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.015>
- SSA. (2020). *MANUAL DE PROCEDIMIENTOS ESTANDARIZADOS PARA LA VIGILANCIA EPIDEMIOLOGICA DE DAÑOS A LA SALUD POR TEMPERATURAS NATURALES EXTREMAS (SVEDSTNE)*.
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Stritih, U., Tyagi, V. V., Stropnik, R., Paksoy, H., Haghghat, F., & Joybari, M. M. (2018). Integration of passive PCM technologies for net-zero energy buildings. *Sustainable Cities and Society*, 41(May 2018), 286–295. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.036>
- Taha, H., Douglas, S., & Haney, J. (1997). Mesoscale meteorological and air quality impacts of increased urban albedo and vegetation. *Energy and Buildings*, 25(2), 169–177. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(96\)01006-7](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(96)01006-7)
- Taleghani, M., & Berardi, U. (2018). The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto. *Urban Climate*, 24, 449–459. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.007>
- Talens, P. (2017). Evaluación del color y tolerancia de color en alimentos a través del espacio CIELAB. *Tecnología de Alimentos*, 1–7.
- Teknika4. (2022). *ALUMINIO 5052*. <https://www.teknika4.com/es/aluminio-5052>
- Teledyne FLIR LLC. (2023). *How Does Emissivity Affect Thermal Imaging?* <https://www.flir.com/discover/professional-tools/how-does-emissivity-affect-thermal-imaging/>
- Tyona, M. D. (2013). A theoretical study on spin coating technique. *Advances in Materials Research*, 2(4), 195–208. <https://doi.org/10.12989/amr.2013.2.4.195>
- Ulpiani, G., Ranzi, G., Feng, J., & Santamouris, M. (2021). Expanding the applicability of daytime radiative cooling: Technological developments and limitations. *Energy and Buildings*, 243, 110990.

- <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110990>
- Ulpiani, G., Ranzi, G., Shah, K. W., Feng, J., & Santamouris, M. (2020). On the energy modulation of daytime radiative coolers: A review on infrared emissivity dynamic switch against overcooling. *Solar Energy*, 209(August), 278–301. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.077>
- UN-Habitat. (2022). Envisaging the Future of Cities. In *World City Report*.
- UNDESA. (2018). The World's Cities in 2018. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*, 34. https://www.flickr.com/photos/thisisin%0Ahttps://www.un.org/en/events/citiesday/assets/pdf/the_worlds_cities_in_2018_data_booklet.pdf
- United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN. (2016). *World Economic Situation & Prospects: Report 2021*. 1–198. <https://www.un.org/development/desa/dpad/publication/world-economic-situation-and-prospects-2019/>
- University Cambridge. (2022). Fluorescence. In *Cambridge Advanced Learner's Dictionary & Thesaurus*. <https://dictionary.cambridge.org/es-LA/dictionary/english/fluorescence>
- Vallati, A., Mauri, L., Colucci, C., & De Lieto Vollaro, R. (2018). Numerical Model for the Characterization of Retro-reflective Materials Behavior in an Urban Street Canyon. *Journal of Thermal Science*, 27(5), 456–462. <https://doi.org/10.1007/s11630-018-1040-1>
- Vik, M., & Periyasamy, A. P. (2016). *Chromic Materials, Fundamentals, Measurements, and Applications* (M. Viková (ed.); Vol. 15, Issue 2). Taylor & Francis Group, LLC.
- Vilaso, J. E. (2020). *Microscopía de Fuerza*. June. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17860.24963>
- Wang, H., Lu, W., Wu, Z., & Zhang, G. (2020). Parametric analysis of applying PCM wallboards for energy saving in high-rise lightweight buildings in Shanghai. *Renewable Energy*, 145, 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.124>
- Wang, T., Wu, Y., Shi, L., Hu, X., Chen, M., & Wu, L. (2021). A structural polymer for highly efficient all-day passive radiative cooling. *Nature Communications*, 12(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20646-7>
- White, J. R. (2013). Herschel y el rompecabezas de la radiación infrarroja. *Investigación y Ciencia*.
- WHO. (2004). Heat-waves: risks and responses. *Health and Global Environmental Health Series, No.2(2)*, 124 pp. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0283-7>
- WITS. (2023). *Marble, travertine and alabaster; simply cut or sawn, with a flat or even surface exports by country in 2021*. <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2021/tradeflow/Exports/partner/WLD/product/680221#:~:text=In%2021%2C%20Top%20exporters%20of,%20Egypt%20Arab%20Rep.>
- Xiang, B., Zhang, R., Luo, Y., Zhang, S., Xu, L., Min, H., Tang, S., & Meng, X. (2021). 3D porous polymer film with designed pore architecture and auto-deposited SiO₂ for highly efficient passive radiative cooling. *Nano Energy*, 81(October 2020), 105600. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105600>
- Xie, N., Li, H., Zhao, W., Zhang, C., Yang, B., Zhang, H., & Zhang, Y. (2019). Optical and durability performance of near-infrared reflective coatings for cool pavement: Laboratorial investigation. *Building and Environment*, 163(August), 106334. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106334>
- Yang, J., Wang, Y., Xiu, C., Xiao, X., Xia, J., & Jin, C. (2020). Optimizing local climate zones to mitigate urban heat island effect in human settlements. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123767. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123767>
- Yang, N., Fu, Y., Xue, X., Lei, D., & Dai, J. G. (2022). Geopolymer-based sub-ambient daytime radiative cooling coating. *EcoMat*, May 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1002/eom2.12284>
- Yang, X., Peng, L. L. H., Jiang, Z., Chen, Y., Yao, L., He, Y., & Xu, T. (2020). Impact of urban heat island on energy demand in buildings: Local climate zones in Nanjing. *Applied Energy*, 260(30), 114279. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114279>
- Yang, Y. K., Kim, M. Y., Chung, M. H., & Park, J. C. (2019). PCM cool roof systems for mitigating urban heat island - an experimental and numerical analysis. *Energy and Buildings*, 205, 109537. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109537>
- Yoon, H., Kim, D., Park, M., Kim, J., Kim, J., Srituravanich, W., Shin, B., Jung, Y., & Jeon, S. (2018). Extraordinary Enhancement of UV Absorption in TiO₂ Nanoparticles Enabled by Low-Oxidized Graphene Nanodots. *Journal of Physical Chemistry C*, 122(22), 12114–12121. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b03329>
- Yoon, S. G., Yang, Y. K., Kim, T. W., Chung, M. H., & Park, J. C. (2018). *Thermal Performance Test of a Phase-Change-Material Cool Roof System by a Scaled Model*. 2018.
- You, Z., Zhang, M., Wang, J., & Pei, W. (2019). A black near-infrared reflective coating based on nano-technology.

- Energy and Buildings*, 205, 109523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109523>
- Younes, J., Ghali, K., & Ghaddar, N. (2022). Diurnal Selective Radiative Cooling Impact in Mitigating Urban Heat Island Effect. *Sustainable Cities and Society*, 83(May), 103932. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103932>
- Yu, X., & Chen, C. (2020). A simulation study for comparing the cooling performance of different daytime radiative cooling materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 209(February), 110459. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110459>
- Yuan, J., Emura, K., Farnham, C., & Sakai, H. (2016). Application of glass beads as retro-reflective facades for urban heat island mitigation: Experimental investigation and simulation analysis. *Building and Environment*, 105, 140–152. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.039>
- Yuan, J., Farnham, C., & Emura, K. (2019). Performance of retro-reflective building envelope materials with fixed glass beads. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/app9081714>
- Yuan, J., Masuko, S., Shimazaki, Y., & Chai, J. (2022). Researching the design of a glass-bead retro-reflective material to reduce downward reflection for urban heat island mitigation. *Materials Today Sustainability*, 18, 100147. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100147>
- Yuan, J., Masuko, S., Shimazaki, Y., Yamanaka, T., & Kobayashi, T. (2022). Evaluation of outdoor thermal comfort under different building external-wall-surface with different reflective directional properties using CFD analysis and model experiment. *Building and Environment*, 207(PB), 108478. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108478>
- Yuxuan, Z., Yunyun, Z., Jianrong, Y., & Xiaoqiang, Z. (2020). Energy saving performance of thermochromic coatings with different colors for buildings. *Energy and Buildings*, 215, 109920. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109920>
- Zhang, S., Jing, W., Chen, Z., Zhang, C., Wu, D., Gao, Y., & Zhu, H. (2022). Full daytime sub-ambient radiative cooling film with high efficiency and low cost. *Renewable Energy*, 194, 850–857. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.151>
- Zhang, X., Li, H., Xie, N., Jia, M., Yang, B., & Li, S. (2022). Laboratorial Investigation on Optical and Thermal Properties of Thermochromic Pavement Coatings for Dynamic Thermoregulation and Urban Heat Island Mitigation. *Sustainable Cities and Society*, 83(May), 103950. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103950>
- Zhang, Y., & Zhai, X. (2019). Preparation and testing of thermochromic coatings for buildings. *Solar Energy*, 191(May), 540–548. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.042>
- Zhao, B., Hu, M., Ao, X., & Pei, G. (2019). Performance evaluation of daytime radiative cooling under different clear sky conditions. *Applied Thermal Engineering*, 155(July 2018), 660–666. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.028>
- Zinzi, M., Agnoli, S., Ulpiani, G., & Mattoni, B. (2021). On the potential of switching cool roofs to optimize the thermal response of residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 233, 110698. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110698>
- Zou, J., Zhang, T., & He, X. (2019). Dark brown Cr doped CaTiO₃ pigments with high NIR reflectance. *Materials Letters*, 248, 173–176. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.031>

APENDICES

Apéndice A: Revisión de la literatura

Referencia	Año	Ubicación	Zona climática	Tipo de material	Enfoque	Tipo de estudio	Elemento arquitectónico	Periodo	Variables climáticas	Dimensiones de la muestra	Espesor	Propiedades ópticas	Valor de reflectancia/albedo	Propiedades térmicas	Técnicas	Instrumentos
(Rosso et al., 2016)	2016	New York	Cfa	LC	M	L, S	W	☼*	T _a	N/A	10	SR, SA, TE	↑SR, ↓SR	N/A	☉	☉
(Yuan et al., 2016)	2016	Osaka	Cfa	RR	QT	L, S	W	☼	*	120 • 120	30	SR, RR, ST, A, SA	↑SR	N/A	☉	☉
(Pisello et al., 2016)	2016	Lab	N/A	PCM	QT	L	R	☼	T _a	100 • 100	N/A	TE	N/A	C, D, K	☉	☉
(Berdahl et al., 2016)	2016	Berkerley	Csb	FL	QT	L, F	R	N/A	T _a , T _s , T _{sky}	75 • 75	N/A	ESR	↓SR	N/A	☉	☉
(Rosso, Pisello, Castaldo, Ferrero, et al., 2017)	2017	Perugia	Cfb	CC	QT	L, F	F, R	A	T _a , T _s , *	N/A	N/A	IRE	↓SR	K	☉	☉
(Rosso, Pisello, Castaldo, Fabiani, et al., 2017)	2017	Perugia	Cfb	CC	QT	L, F	F, R	☼	%, T _a , T _s , E _{gl} , Irrg/gl, ≈	50 • 50	15	ST, SR	↓SR	K	☉	☉
(Rosso, Pisello, Castaldo, Cotana, et al., 2017)	2017	Rome	Csa	CC	QT	L, S	F, R	☼	T _s	N/A	N/A	SR	↓SR	N/A	☉	N/A
(Lei et al., 2017)	2017	Singapore	Af	CC	QT	L	R, F	A	T _a , %, ≈, E _{gl}	70 • 200 • 5	5	SR, SA	↓SR	C, K, D, C	☉	☉
(Enríquez et al., 2017)	2017	Castellon	Bsk	CC	QT	L	R, F	☼	T _a , T _s , *	150 • 150	N/A	SR, SA	↑SR, ↑NIR	K	☉	☉
(Castellani et al., 2017)	2017	Perugia	Cfb	RR	QT	L	N/A	N/A	N/A	0.05 • 0.05	N/A	SR, RR	↓SR	N/A	☉	☉
(Morini, Castellani, Presciutti, Filipponi, et al., 2017)	2017	Perugia	Cfb	RR	QT	L	W	☼☼	*	40 • 70 40 • 65 35 • 70	0.1 -3	RR, SR, SA	↓SR	N/A	☉	☉
(Sharma et al., 2017)	2017	Phoenix, NY, Chicago	Bwh, Cfa, Dfa	TC	QT	L	R	☼*	T _a , %	36.7 • 150	0.05	SR, SPE	↓SR	N/A	☉	☉
(Lei et al., 2017)	2017	Singapore	Af	PCM	QT	L, S	R	A	T _a , %, ≈, E _{gl}	70 • 200	5	SR, SA	↓SR	K, D, LH, C	☉	☉
(Pisello et al., 2017)	2017	Lab	N/A	PCM	QT	L	R	N/A	T _a , %, UV-R	N/A	N/A	SR	↓SR	K, TD	☉	☉
(Kwon et al., 2017)	2017	Seoul	Dwa	PCM	QT	F, S	R	☼	T _a , E _{gl} , ☁, ≈	600 • 600	30	N/A	N/A	N/A	☉	☉
(Huang & Ruan, 2017)	2017	Lab	N/A	DRC	QT	L	N/A	N/A	T _a , T _s	N/A	0.5	SR, TE	↑SR	N/A	☉	N/A
(Bao et al., 2017)	2017	Shangai	Cfa	DRC	QT	L, F	N/A	☼	T _a , T _s , %, *	N/A	0.01	SPR, TE	↑SR	ST, K	☉	☉
(Taleghani y Berardi, 2018)	2018	Toronto	Dfb	LC	M	S	P	☼	T _a , T _s , %, ≈	ø 50	10	SR, A	↓VIS, ↓IR	N/A	☉	☉

Referencia	Año	Ubicación	Zona climática	Tipo de material	Enfoque	Tipo de estudio	Elemento arquitectónico	Periodo	Variables climáticas	Dimensiones de la muestra	Espesor	Propiedades ópticas	Valor de reflectancia/albedo	Propiedades térmicas	Técnicas	Instrumentos
(Morini, Castellani, De Ciantis, et al., 2018)	2018	Perugia	Cfb	LC	Q	F	W	☼	$T_a, T_s, \%, \approx, *$	N/A	N/A	TE, SR, SA	↓A	N/A	⊙	⊙
(Becherini et al., 2018)	2018	Istambul	Csa	CC	QT	L, S, F	F	A	$T_a, T_s, *$	40 • 40 • 40 50 • 50 • 40 • 50 50 • 50 • 30 300 • 300 • 5	N/A	SA	N/A	K	⊙	⊙
(Kyriakodis y Santamouris, 2018)	2018	Athens	Csa	CC	QT	F, S	P	☼	$T_a, T_s, \%$	N/A	N/A	SR	↓SR	N/A	⊙	⊙
(Meenakshi y Selvaraj, 2018)	2018	Lab	N/A	CC	QT	L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	NIRR	↑SR	N/A	⊙	⊙
(Gao et al., 2018)	2018	Lab	N/A	CC	QT	L	R	N/A	T_a, GSI	N/A	0.12	IRR, SR	↑NIR	N/A	⊙	⊙
(Manni et al., 2018)	2018	Numerous	Numerous	RR	QT	S	W, R, P	A	$E_{gl}, Irr_{dif}, SIA, \bullet$	N/A	N/A	RR	N/A	N/A	⊙	⊙
(Mauri et al., 2018)	2018	Rome, Milan, Palermo	Csa, Cfa, Csa	RR	QT	S	W	☼ *	$\approx, \%, T_a, *$	N/A	N/A	RR, ST, SR	↓VIS	N/A	⊙	⊙
(Morini, Castellani, Anderini, et al., 2018)	2018	Perugia	Cfb	RR	QT	L	W	☼	*	N/A	N/A	SR, RR	↓SR	N/A	⊙	⊙
(Vallati et al., 2018)	2018	La Rochelle	Cfb	RR	QT	S	W	☼ * *	DR	N/A	N/A	RR	N/A	N/A	⊙	⊙
(S. G. Yoon et al., 2018)	2018	Seoul	Dwa	PCM	QT	F	R	☼	$T_a, \approx, E_{gl}, \bullet$	600 • 600	30	N/A	N/A	K, ET	⊙	⊙
(Stritih et al., 2018)	2018	Ljubljana	Cfb	PCM	QT	F, S	W	☼	T_a, E_{gl}	20 • 20 mm ²	0.12	N/A	N/A	LH, K, C, D, ThT, U	⊙	⊙
(Cascone et al., 2018)	2018	Turin, Palermo	Cfb, Csa	PCM	M	S	W	☼ *	T_a	N/A	5-40	N/A	N/A	U, LH, K, C	⊙	⊙
(Mesloub et al., 2022)	2022	Hai'1	Bwh	TC	QT	L, F, S	Wa	↓	$T_a, T_s, *$	500 • 670	10	SR, ST	↓SR	U	⊙	⊙
(Qin et al., 2019)	2019	Lab	N/A	LC	Q	L	N/A	N/A	$T_a, \%$	150 • 150	10	A, SPR	↓SR, ↓VIS	N/A	⊙	⊙
(You et al., 2019)	2019	Lanzhou	Bsk	CC	QT	L, F	N/A	☼ ☼	$T_a, T_s, \%, *$	50 • 50 200 • 200	N/A	SPR	↓NIR	N/A	⊙	⊙
(Xie et al., 2019)	2019	Lab	N/A	CC	QT	L	N/A	N/A	T_a, T_s	100 • 100	0.1	SPR, SA	↓NIR	K	⊙	⊙
(Yuan et al., 2019)	2019	Osaka	Cfa	RR	QT	L	W	N/A	N/A	100 • 100	0.9	RR	N/A	N/A	⊙	⊙
(Morini, Castellani, Presciutti, Anderini, et al., 2017)	2019	Perugia	Cfb	RR	M	F	W	☼	*	15 • 150 15 • 1500	N/A	A, SR	↑SR	N/A	⊙	⊙
(Fabiani et al. 2019)	2019	Jersey City	Cfa	TC	QT	L, S	R	A	$T_{sol-air}, T_a, T_s, \%, \approx, SW, \bullet$	200 • 200	15	A, IRE	↓SR	TT, K, C, D	⊙	⊙

Referencia	Año	Ubicación	Zona climática	Tipo de material	Enfoque	Tipo de estudio	Elemento arquitectónico	Periodo	Variables climáticas	Dimensiones de la muestra	Espesor	Propiedades ópticas	Valor de reflectancia/albedo	Propiedades térmicas	Técnicas	Instrumentos
(Hu y Yu, 2019a)	2019	Numerous	Numerous	TC	QT	L	R	A	T_a, T_s, \approx	N/A	0.258 - 0.275	SA, VISA, TE, ST	↓SR	K, D, C, TA, TT	⊙	⊙
(Hu y Yu, 2019b)	2019	Cleveland, OH	Dfa	TC	QT	L, F	R	☼ * *	$T_a, T_s, *$	∅ 85 - 100	0.25 - 0.416	SR, SA, TE	↓SR	K, HC	⊙	⊙
(Zhang y Zhai, 2019)	2019	Shanghai	Cfa	TC	QT	L	N/A	↓	$T_a, T_s, \%, \approx$	60 • 60 150 • 150	0.06	SR, TE	↑SR	N/A	⊙	⊙
(Yang et al., 2019)	2019	Seoul	Dwa	PCM	QT	F, S	R	A	$T_a, T_s, E_{gl}, \approx, \bullet$	N/A	30	SR	↓SR	LH, K, C, LE	⊙	⊙
(Piselli et al., 2019)	2019	Rome, Abu Dhabi	Csa, Bwh	PCM	QT	L	R	☼	T_a, T_s, E_{gl}	200 • 200	4, 15	SR, TE	↑SR	Thermal transmittance	⊙	⊙
(Ascione et al., 2019)	2019	Molise	Cfa	PCM	QT	S	R	☼	$T_a, E_{gl}, \%$	N/A	20	SR, TE, VISA, SA	N/A	U, LH, C, K	⊙	⊙
(Saafi y Daouas, 2019)	2019	Tunis	Csa	PCM	QT	S	W	☼ *	$T_a, T_s, E_{gl}, T_{sky}, \bullet$	N/A	10-30	TE	↑SR	K, D, C, ThT, LH	⊙	⊙
(Chen et al., 2019)	2019	Lab	N/A	PCM	QT	L	P	*	T_a	N/A	N/A	N/A	N/A	LE, D, HC, TSR	⊙	⊙
(Jin et al., 2019)	2019	Lab	N/A	PCM	QT	L	P	☼	T_a, E, T_a, T_s	15 • 150	50	A, SA	↓SR	LH, K, HC	⊙	⊙
(Zhao et al., 2019)	2019	Beijing, Hefei	Dwa, Cfa	DRC	QT	L, F	R	*	$\%, *, \bullet, T_a, PWP, ATM-R$	∅ 101.6	$5e^{-5} (SiO_2)$ 0.00015 (Ag) 0.5 (SiO ₂)	SPR, TE, SA	↑SR	K	⊙	⊙
(Zou et al., 2019)	2019	Lab	N/A	CC	QT	L	N/A	N/A	$T_a, T_s, *$	N/A	N/A	SR, SPE, SPR, SPA	↓SR	N/A	⊙	N/A
(Bellia et al., 2020)	2020	Lab	N/A	LC	M	L	W	N/A	N/A	140 • 140	N/A	SR	↓SR	N/A	⊙	⊙
(Rossi et al., 2020)	2020	Miami	N/A	CC	QT	L	R	N/A	$T_a, T_s, T_{plateau}, GSI$	210 • 230	0.5	SPR, ST	N/A	N/A	⊙	⊙
(Levinson et al., 2020)	2020	Fresno, CA	Bsk	RR	QT	L, S	W	☼	N/A	N/A	0.05 (aluminized Mylar)	ST, RR, TE, SR, SPR	↑SR	N/A	⊙	⊙
(Berardi et al., 2020)	2020	Toronto	Dfb	TC	QT	L, S	W, R	☼ *	T_a, T_s, SI	50 • 50	N/A	SR, TE	↑SR	TT	⊙	⊙
(Fabiani, Castaldo, et al., 2020)	2020	Perugia	Cfb	TC	QT	F, S	R, W	☼ *	$T_a, T_s, \%, \approx, *, E_{gl}, SI$	Building model	N/A	SR	↓SR	ThT, K, TT	⊙	⊙
(Q. Li et al., 2020)	2020	Nanjing	Cfa	TC	QT	L	P	N/A	*	∅ 150	40	N/A	N/A	K	⊙	⊙
(Soudian et al., 2020)	2020	Toronto	Dfb	TC	QT	L	W	N/A	T_a, T_s	100 • 100	N/A	SA, TE	↓SR	K, C, LH	⊙	⊙
(Yuxuan et al., 2020)	2020	Shanghai	Cfa	TC	QT	L, S	W, R	☼ *	$T_a, T_s, *$	60 • 60	2	SR	↓SR	U, K, C, D	⊙	⊙
(Perez et al., 2020)	2020	Madrid	Csa	TC	QT	L	N/A	N/A	T_a	30 • 60	10	N/A	N/A	D	⊙	⊙
(Granadeiro et al., 2020)	2020	Madrid, Porto, Abu Dhabi	Csa, Csb, Bwh	TC	QT	S	W, R	A	T_a	N/A	N/A	SR, SA, TE	↑SR	U, K, C	⊙	N/A
(Wang et al., 2020)	2020	Shanghai	Cfa	PCM	QT	S	W	* ☼	T_a, \bullet, E_{gl}	N/A	20, 30, 40	N/A	N/A	K, HC, ET	⊙	⊙
(Rathore y Shukla, 2020)	2020	Mathura	Bsh	PCM	QT	F	W	☼	$T_a, E_{gl}, \approx, \%$	1120 • 1120	16.7	TE	N/A	LH, D, K, TE-, MPa	⊙	⊙

Referencia	Año	Ubicación	Zona climática	Tipo de material	Enfoque	Tipo de estudio	Elemento arquitectónico	Periodo	Variables climáticas	Dimensiones de la muestra	Espesor	Propiedades ópticas	Valor de reflectancia/albedo	Propiedades térmicas	Técnicas	Instrumentos
(Fabiani et al., 2020)	2020	Perugia	Cfb	PCM	QT	L, F, S	R	☼	$T_a, T_{sol-air}, UV-R, \%$	100 • 100	N/A	A	↓SR	Heat capacity	②	③
(Garshasbi et al., 2020b)	2020	Sydney	Cfa	FL, CC	QT	L	N/A	☼	T_a, T_s	204 mm ²	2e ⁻⁵	AC, NIRR, SPR	↑NIR	N/A	②	③
(Li et al., 2020)	2020	Beijing	Dwa	FL	QT	L	W, R	☼ ☼	$T_a, T_s, \%, \approx, *, \bullet, \ominus$ DRL	∅ 300 310 • 310	0.2	SR, A	↑SR	K	②	③
(Garshasbi et al., 2020a)	2020	Sydney	Cfa	FL	QT	L, F	N/A	N/A	$T_a, *, \approx, LW, SW$	204 mm ²	N/A	TE, BRM, SR	↓SR	C	②	③
(Feng et al., 2020)	2020	Numerous	Numerous	DRC	QT	L, F	N/A	☼ ☼	$T_a, T_s, T_{sky}, *, \approx$	N/A	0.025, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2	SPT, SPA, SPR, TE	↓SR	N/A	①	①
(Jeong et al., 2020)	2020	Hong Kong	Cfa	DRC	QT	L, F	R	*	$T_a, T_s, *, \bullet, \ominus, AT, PWP, ATM-R, AE$	N/A	0.0005	SPR, TE	↑SR	N/A	③	③
(Yu y Chen, 2020)	2020	Numerous	Numerous	DRC	QT	S	R	N/A	$T_a, *, AE$	N/A	N/A	SPR, TE, SA	N/A	N/A	①	①
(Carlosena et al., 2020)	2020	Phoenix (AZ), Sydney	Bwh, Cfa	DRC	QT	S, TA	N/A	☼ *	$T_a, T_s, *, \bullet, \approx, ATM-R$	N/A	N/A	SPR, TE, SA	↑SR	K, D, C, Hflu-	③	③
(Feng et al., 2020)	2020	Sydney, Singapore, Alice Springs	Cfa, Af, Bwh	DRC	QT	S, F	R	☼ ☼	$T_a, T_s, *, \bullet, T_{sky}, PWP, ATM-R, AE, AT, \approx$	500 • 500	N/A	TE, SA, ST, SPT, SPA	↑NIR	K, HC	③	③
(Liu et al., 2020)	2020	Tianjin	Dwa	DRC	QT	L, F	N/A	☼	$T_a, T_s, *, \bullet, T_{dew}, \%$	N/A	N/A	AT, A-IR-T, SA, t(λ)	↑SR	N/A	②	③
(Li et al., 2020)	2020	West Lafayette	Dfa	DRC	QT	L, F, S	N/A	⬇	$T_a, T_s, *, \%, \ominus$	50 • 50	0.4	SR, TE	↑SR	N/A	③	③
(Aburas et al., 2021)	2021	Cairo, London, Barcelona	Cfb, Csa, Bwh	TC	QT	L	WD	A	$T_a, *$	N/A	8e ⁻⁵ , 16e ⁻⁵ , 25e ⁻⁵ , 5e ⁻⁴ , 8e ⁻⁴	SR, ST, SA	↓SR	N/A	③	③
(Chae et al., 2021)	2021	Seoul	Dwa	DRC	QT	L, F	N/A	☼	$*, \bullet, T_{dew}, T_{amb}, \approx, \%, SF$	N/A	0.25	SR, SA, TE, ST	↑SR	N/A	③	③
(Ramos et al., 2021)	2021	Porto	Csb	CC	QT	F, L	R	A	$T_a, T_s, E_{gl}, \ominus$	1000 • 1000	2	SR	↑NIR	N/A	③	③
(Rosati et al., 2021a)	2021	Trento	Dfb	CC	QT	L	R	☼	$T_a, T_s, E_{gl}, \%, GSI$	90 • 150	0.1	ST, IRR	↓SR, ↓IR	N/A	②	③
(Fernández-Mira et al., 2021)	2021	Madrid	Csa	CC	QT	F	N/A	☼ *	$T_a, \%, \approx, *, T_s$	1 m ²	N/A	ST, SPR, SA	↑NIR	N/A	③	③
(Chen, et al., 2021)	2021	Changsha	Cfa	TC	QT	L, F	P	☼ *	T_a, T_s	∅ 150, 100 h	N/A	SR, TE	↑VIS	TT, K	③	③
(Zinzi et al., 2021)	2021	Barcelona, Palermo, Cairo	Csa, Csa, Bwh	TC	QT	S	R	☼ *	$T_a, T_s, \%$	Building model	N/A	SR, SA	↓SR	K, TR, U, TC	①	N/A
(Z. Chen, Zhang, Duan, Wu, et al., 2021)	2021	Changsha	Cfa	TC	QT	L	P	☼ *	$T_a, *$	∅ 140	1.3, 3.2	N/A	N/A	D	②	③
(Perez et al., 2021)	2021	Madrid	Csa	TC	QT	L, F	W	⬇ * ☼	$T_a, \%$	100 • 100	10	SA, SR	↑IR	N/A	②	③
(Jin et al., 2021)	2021	Lab	N/A	PCM	QT	L	P	☼	T_a, T_s, E_{gl}	150 • 150	50	SA, TE	N/A	K, D, C, PCE	③	③

Referencia	Año	Ubicación	Zona climática	Tipo de material	Enfoque	Tipo de estudio	Elemento arquitectónico	Periodo	Variables climáticas	Dimensiones de la muestra	Espesor	Propiedades ópticas	Valor de reflectancia/albedo	Propiedades térmicas	Técnicas	Instrumentos
(Carlosena et al., 2021)	2021	Pamplona	Cfb	DRC	QT	L, F, S	N/A	☼	T _a , %, ≈, ATM	200 • 200	0.001- 0.0037	SR, SA, TE, ST	↓SR (Al), ↑SR (Vikuiti)	N/A	⊙	⊙
(Lee et al., 2021)	2021	Seoul	Dwa	DRC	QT	L, F	R	☽	T _a , T _s , *, T _{dew} , %, ≈	20 • 30	0.05 (emmitter)	SR, TE	↑SR	N/A	⊙	⊙
(Son et al., 2021)	2021	Seoul, Chiang Mai	Dwa, Aw	DRC	QT	L	R	☼ *	T _a , *, T _{dew} , %, ≈	N/A	0.02	SA, TE	↑SR	N/A	⊙	⊙
(Wang et al., 2021)	2021	Shanghai	Cfa	DRC	QT	L, F, S	R	☼	T _a , *, %, ≈, ☁	100 • 100	~ 0.16	SR, TE, SA, SPT	↑SR	N/A	⊙	⊙
(Xiang et al., 2021)	2021	Nanjing	Cfa	DRC	QT	L, F	R	☼	T _a , T _s , *, %, ≈, GSI	ø 150	~ 0.15	SR, SPE	↑SR	N/A	⊙	⊙
(Qi et al., 2022)	2022	Changzhou	Cfa	CC	QT	L	N/A	N/A	T _a	N/A	ø 35	SR, NIR, SA	↓NIR, ↑SRI	N/A	⊙	⊙
(Zhang et al., 2022)	2022	Shanghai	Cfa	TC	QT	L, S	P	☼ *	T _a , T _s , *, %	60 • 60 ø 150, 150 h	0.15	SR, SPR	↓SR	N/A	⊙	⊙
(Garshasbi et al., 2020a)	2022	Sydney	Cfa	FL	QT	L, F	N/A	☼	T _a , T _s , *, %, ≈, LW, SW	N/A	N/A	TE, SA, SR, ST,	↓SR, ↑SR	C, CC	⊙	⊙
(Yang et al., 2020)	2022	Zhejiang	Cfa	DRC	QT	L, F	R	☼	T _a , *, ☁, %, ≈, ☽	N/A	N/A	SR, AT, SPL	↑SR	N/A	⊙	⊙
(Younes et al., 2022)	2022	Beirut	Csa	DRC	QT	S	R	☼ ☼	T _a , T _s , *, T _{dew} , %, ☽, ATM-R	N/A	N/A	SPR, SPE, A, EE, AE, AA, EHSA	↓SR	HC, TR, LH	⊙	⊙
(Yang et al., 2022)	2022	Hong Kong	Cfa	DRC	QT	L, F	N/A	*	T _a , T _s , *, %, ≈	300 • 300 • 4	0.5 ± 0.05	SR, IRE, SA, ST	↑SR	N/A	⊙	⊙
(Zhang et al., 2022)	2022	Qingdao	Cfa	DRC	QT	L	N/A	☼	T _a , T _s , *, %	600 • 600	2	SR, TE	↑SR	N/A	⊙	⊙
(Dong et al., 2022)	2022	Weihai	Cfa	DRC	QT	L, F, S	N/A	☽	T _a , T _s , *, %, ≈, ATM-R	100 • 100	N/A	SR, SA, TE	↑SR	N/A	⊙	⊙
(Lim et al., 2022)	2022	Seoul	Dwa	DRC	QT	L, F	N/A	N/A	T _a , T _s , *, T _{dew} , %, ≈, ATM-R	N/A	0.2	AE, AT, SA	↑SR	N/A	⊙	⊙
(Yuan et al., 2022)	2022	Osaka, Toyohashi	Cfa	RR	QT	S	W	☼	T _a , WBGT, T _{sol-air} , GSI	N/A	N/A	SR, A, RR	↓SR	K	⊙	⊙

Ubicación del sitio del experimento: Lab (Condiciones de laboratorio), Zona climática: Af (clima de selva tropical); Am (clima monzónico tropical); Aw (clima de sabana tropical con invierno seco); As (Tropical Clima de sabana con verano seco); BWh (clima desértico cálido); BWk (clima desértico frío); BSh (clima semiárido cálido); BSk (clima semiárido frío); Csa (clima mediterráneo de verano cálido); Csb (clima mediterráneo cálido-verano); Cfa (clima subtropical húmedo); Cfb (clima oceánico); Cwb (Subtropical de invierno seco); Dfa (clima continental húmedo de verano cálido); Dfb (clima continental húmedo de verano cálido); Dwa (clima continental húmedo de verano cálido influenciado por los monzones), **clase de material:** LC (color claro), CC (color frío), RR (retroreflector), DRC (enfriamiento radiativo diurno), TC (termocrómico), PCM (material de cambio de fase), FL (Fluorescente), **Enfoque:** Cuantitativo (QT), Cualitativo (QL), Mixto (M), **Tipo de estudio:** L (Laboratorio), F (Campo), S (Simulación), **Elemento arquitectónico:** W (Paredes exteriores), R (Techo), P (Pavimento), **Periodo:** * (Invierno), ☽ (Primavera), ☼ (Verano), ☼ (Otoño), A (Anual), **Variables climáticas:** T_a (Temperatura del aire), T_s (Superficie T_{sol}-aire (Temperatura del aire del sol), T_{plateau} (Temperatura de la meseta), T_{sky} (Temperatura del cielo), WBGT (Temperatura del globo de bulbo húmedo), % (Humedad), ≈ (Velocidad del viento), * (Irradiación solar/ Radiación solar), E_{gl} (irradiación/radiación global), Irrdif (irradiación/radiación difusa), Irrg/gl (ratio de irradiación solar directa a global), SW (radiación de onda corta), LW (radiación de onda larga), ATM-R (radiación atmosférica), UV-R (radiación UV), GSI (irradiación espectral global), DRL (radiación de onda larga descendente), SIA (ángulo de incidencia de los rayos solares), ☁ (cobertura de nubes), ☽ (precipitación), DP (punto de rocío), PWV (Vapor de agua precipitable), AE (emisividad atmosférica), AT (transmitancia atmosférica), **Propiedades ópticas:** SR (reflectancia solar), SPR (reflectancia espectral), SA (absorción solar), SPA (absorción espectral), ST (transmitancia solar), SPT (Transmitancia espectral), TE (Emisividad térmica), A (Albedo), **Valor de reflectancia/albedo:** ↑SR (Alta reflectancia solar), ↑VIS (Alta reflectancia VIS), ↑IR (Alta reflectancia IR), ↑A (Albedo alto), ↓SR (reflectancia solar baja) ↓VIS (reflectancia VIS baja) ↓IR (reflectancia IR baja) ↓A, (albedo bajo), Nota* Alto>80%, Bajo<80%, Propiedades térmicas/físicas: K (Conductividad térmica), C (Calor específico), D (densidad), MP (punto de fusión), TT (Temperatura de transición), **Técnica:** Número de técnicas empleadas, **Herramientas:** Número de herramientas empleadas.

Apéndice B: Tablas de emisividad

Material	Especificación	Temperatura	Espectro	Emitancia
3M 35	Cinta aislante de vinilo (varios colores)	< 80	OL	Aprox. 0.96
3M 88	Cinta aislante de vinilo negro	< 105	MW	< 0.96
3M 88	Cinta aislante de vinilo negro	< 105	OL	Aprox. 0.96
3M Super 33	Cinta aislante de vinilo negro	< 80	OL	Aprox. 0.96
Pintura	Óleo, negra	20	OC	0.94
Pintura	Óleo, negra brillante	20	OC	0.92
Pintura	Óleo, varios colores	100	T	0.92–0.96
Pintura	Plástica, blanca	20	OC	0.84
Pintura	Plástica, negra	20	OC	0.95

Nota. OC: 2–5 μm ; OL: 8–14 μm , OML: 6,5–20 μm . Valores tomados de APLITER, 2011.

Apéndice C: Parámetros de medición de análisis de espectrofotometría para la muestra AR-04

Nomenclatura	T _{air} (°C)	T _{sup} (°C) ¹	HR (%)	Color inicial (nm)	Color final (nm)	Intervalo (nm)	Velocidad de escaneo (nm/min)
N5KF13	25.72	13	49.315	880	360	5	180
N5JF15	30.343	15	40.462	880	360	5	180
N5JF17	30.192	17	41.177	880	360	5	180
N5JF19	29.916	19	41.876	880	360	5	180
N5JF21	29.565	21	42.927	880	360	5	180
N5JF23	29.165	23	44.099	880	360	5	180
N5JF25	28.072	25	46.711	880	360	5	180
N5JF27	27.333	27	48.527	880	360	5	180
N5JF29	26.769	29	49.964	880	360	5	180
N5IF31	29.515	31	41.501	880	360	5	180
N5IF33	27.825	33	43.027	880	360	5	180
N5IF35	27.702	35	43.733	880	360	5	180
N5IF37	27.604	37	43.526	880	360	5	180
N5IF39	27.505	39	43.121	880	360	5	180
N5IF41	27.431	41	43.473	880	360	5	180
N5IF43	27.358	43	43.563	880	360	5	180
N5IF45	27.259	45	43.715	880	360	5	180

Nota 1. Variación máxima de temperatura de ± 0.5 °C

Apéndice D: Parámetros de medición de análisis de espectrofotometría para la muestra AR-TC-01

Nomenclatura	T _{air} (°C)	T _{sup} (°C) ¹	HR (%)	Color inicial (nm)	Color final (nm)	Intervalo (nm)	Velocidad de escaneo (nm/min)
N5KTC13	24.243	13	52.547	880	360	5	180
N5JTC15	28.742	15	40.291	880	360	5	180
N5JTC17	28.841	17	40.567	880	360	5	180
N5JTC19	29.115	19	40.265	880	360	5	180
N5JTC21	29.365	21	40.092	880	360	5	180
N5JTC23	29.515	23	39.376	880	360	5	180
N5JTC25	29.464	25	39.037	880	360	5	180
N5JTC27	29.34	27	38.357	880	360	5	180
N5JTC29	29.115	29	38.334	880	360	5	180
N5JTC31	29.015	31	38.057	880	360	5	180
N5JTC33	29.015	33	38.091	880	360	5	180
N5JTC35	28.99	35	37.921	880	360	5	180
N5JTC37	28.916	37	37.479	880	360	5	180
N5KTC39	23.593	39	52.709	880	360	5	180
N5KTC41	23.713	41	52.883	880	360	5	180
N5KTC43	23.809	43	53.179	880	360	5	180
N5KTC45	23.954	45	53.042	880	360	5	180

Nota 1. Variación máxima de temperatura de ± 0.5 °C

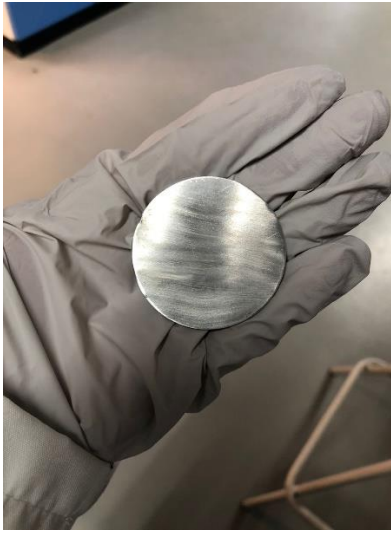
Apéndice E: Parámetros de medición de análisis de espectrofotometría para la muestra AR-TC-UV-04

Nomenclatura	T _{air} (°C)	T _{sup} (°C) ¹	HR (%)	Color inicial (nm)	Color final (nm)	Intervalo (nm)	Velocidad de escaneo (nm/min)
N5ITC213	27.186	13	45.889	880	360	5	180
N5ITC215	23.617	15	55.218	880	360	5	180
N5ITC217	23.93	17	53.416	880	360	5	180
N5ITC219	24.267	19	52.014	880	360	5	180
N5ITC221	24.581	21	51.741	880	360	5	180
N5ITC223	24.895	23	51.118	880	360	5	180
N5ITC225	25.162	25	50.645	880	360	5	180
N5ITC227	25.137	27	50.547	880	360	5	180
N5ITC229	25.283	29	49.993	880	360	5	180
N5ITC231	25.453	31	49.6	880	360	5	180
N5ITC233	25.671	33	49.213	880	360	5	180
N5ITC235	25.914	35	48.796	880	360	5	180
N5ITC237	26.085	37	48.465	880	360	5	180
N5ITC239	26.231	39	48.13	880	360	5	180
N5ITC241	26.573	41	47.238	880	360	5	180
N5ITC243	26.72	43	47.256	880	360	5	180
N5ITC245	26.94	45	26.94	880	360	5	180

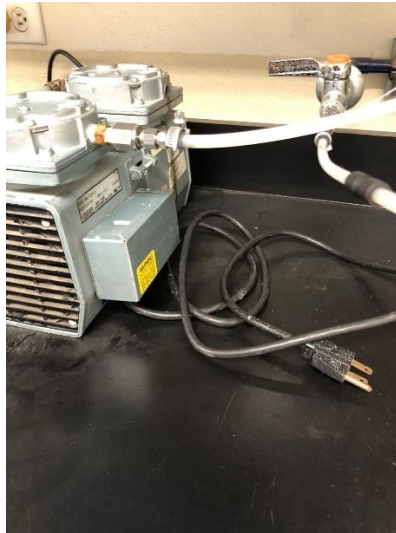
Nota 1. Variación máxima de temperatura de ± 0.5 °C

ANEXOS

Anexo A: Diseño y fabricación de muestras



Preparación de sustratos de aluminio 5052



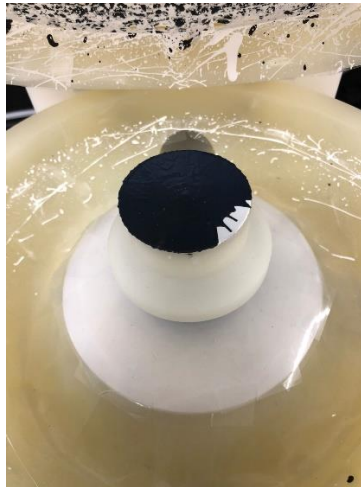
Conexión de bomba de vacío y tanque de aire comprimido (CDA) en dispositivo spin coater.



Colocación de sustrato de aluminio 5052 sobre plataforma giratoria



Deposición de recubrimiento altamente reflectivo



Deposición de recubrimiento termocrómico



Colocación de muestras sobre plato caliente

Anexo B: Configuración del módulo experimental



Perforación de placa de aluminio 5052



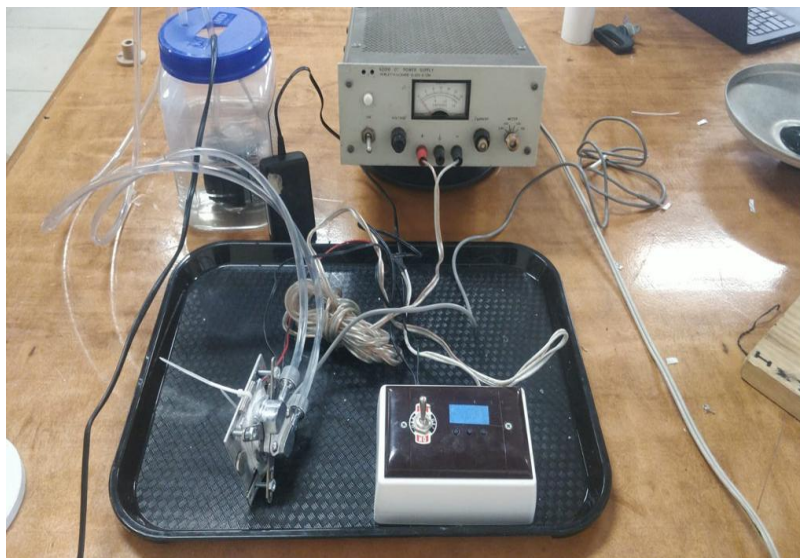
Ensamblaje de placa de aluminio 5052 a disipador



Prueba de funcionamiento de control PID.



Impresión de portamuestras



Prueba piloto del sistema termoelectrico

Anexo C: Medición de la reflectancia difusa



Arreglo experimental para el análisis de espectrofotometría en el laboratorio de óptica del Centro de Nanociencias y Nanotecnología.



Equipo de cómputo utilizado para la programación del espectrofotómetro.



Colocación de portaobjetos dentro de la esfera de integración del espectrofotómetro.