

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



ESTUDIO DE PIGMENTOS INORGÁNICOS REFLECTIVOS A BASE DE CARBONATO DE CALCIO BIO-RENOVABLE PARA EL DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN TERMO- ÓPTICA DE RECUBRIMIENTOS FRÍOS

T E S I S

que para obtener el grado de

MAESTRA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

Presenta

VANESSA ORDOÑEZ RAMOS

Director de Tesis

DR. MARCOS EDUARDO GONZÁLEZ EDUARDO

Co-director de Tesis

DR. ULISES JESÚS TAMAYO PÉREZ

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, ENERO 2025

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

ESTUDIO DE PIGMENTOS INORGÁNICOS REFLECTIVOS A BASE DE
CARBONATO DE CALCIO BIO-RENOVABLE PARA EL DISEÑO Y
CARACTERIZACIÓN TERMO-ÓPTICA DE RECUBRIMIENTOS FRÍOS

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

VANESSA ORDOÑEZ RAMOS

Correo electrónico: vanessa.ordonez@uabc.edu.mx
Identificador ORCID: 0000-0002-5139-210X

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

Co-Director de tesis: Dr. Ulises Jesús Tamayo Pérez
Identificador ORCID: 0000-0002-2800-9694

Revisor de tesis: Dr. Priscy Alfredo Luque Morales

Revisor de tesis: Dra. Karen Estrella Martínez Torres

Revisor de tesis: Dr. Francisco Fernández Melchor

Ensenada, B.C. 15 de enero de 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

**Estudio de pigmentos inorgánicos reflectivos a base de
carbonato de calcio bio-renovable para el diseño y
caracterización termo-óptica de recubrimientos fríos**

TESIS

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

Vanessa Ordoñez Ramos

Aprobada por:



**Dr. Marcos Eduardo González
Trevizo**
Director de tesis



Dr. Ulises Jesús Tamayo Pérez
Co-director de tesis



Dr. Priscy Alfredo Luque Morales
Miembro del comité tutorial



**Dra. Karen Estrella Martínez
Torres**
Miembro del comité tutorial



Dr. Francisco Fernández Melchor
Miembro del comité tutorial

Ensenada, Baja California, México. Enero 2025

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., 15 de enero de 2025



Vanessa Ordoñez Ramos

AVAL DE TERMINACIÓN DE TESIS

Fecha: 15 de enero de 2025

DR. JULIAN ISRAEL AGUILAR DUQUE
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:

VANESSA ORDOÑEZ RAMOS

ha concluido su tesis de grado titulada:

ESTUDIO DE PIGMENTOS INORGÁNICOS REFLECTIVOS A BASE DE CARBONATO DE CALCIO BIO-RENOVABLE PARA EL DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN TERMO-ÓPTICA DE RECUBRIMIENTOS FRÍOS

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

Al mar:

Aquel que con alimento me da sustento

Aquel que alivia mi angustia, pero me roba el aliento

Aquel que le da sentido a mi vida, sin tener la respuesta

Aquel que me da las ganas de vivirla, sin tenerla resuelta

Aquel que me da una razón para salir del caparazón

Y con ello sanar al fin mi desbordante corazón

Para así fundamentar no solo mi estancia y existencia

Sino también para justificar finalmente mi cuestionable permanencia

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, por estar a mi lado en mis momentos más vulnerables, por alentarme cuando sentía que no podía dar un paso más, por recordarme de lo que soy capaz y, sobre todo, por demostrarme que con amor todo es posible.

A mi padre, por su apoyo incondicional, por creer en mis sueños y sustentarlos cuando nadie más lo hace, por inspirarme a alcanzar mis metas profesionales, pero principalmente, por recordarme que todo éxito empieza con una idea.

A mis hermanos y el resto de mi familia, por siempre escucharme en mis momentos de inspiración y asombro durante este viaje, por ver potencial en mí cuando me cuesta verlo en mí misma, por ser mi red de apoyo más grande y simplemente por existir.

A mi director de tesis, Dr. Marcos Eduardo González Trevizo, por su apoyo desde el inicio hasta el final, por creer en mí desde el comienzo de esta idea, por motivarme a soñar en grande, por su disponibilidad y paciencia, por mostrarme un nuevo universo y ser mi guía durante todo el trayecto, por empujarme a superar mis propios límites y demostrarme que todo es posible con disciplina, constancia y pasión.

A mi codirector de tesis, Dr. Ulises Jesús Tamayo Pérez, por brindarme la confianza desde un inicio de utilizar el equipo y el espacio requerido para poder llevar a cabo este proyecto, por brindarme su conocimiento en áreas completamente ajenas a las mías y por su apoyo siempre que lo necesité.

A mi asesor de tesis, Dr. Priscy Alfredo Luque Morales, por creer en el proyecto y ver el potencial para alcanzar nuevos horizontes, por orientarme en la toma de decisiones imprescindibles para lograr los objetivos y por guiarme en las situaciones que superaban mis conocimientos.

A mi asesora de tesis, Dra. Karen Estrella Martínez Torres, por instruirme a la investigación desde antes de entrar al posgrado, por compartirme sus conocimientos e ideas con amabilidad y gentileza, por brindar calma incluso en los momentos caóticos y por siempre ingeniárselas para estar disponible con tal de ayudar.

A mi asesor de tesis, Dr. Francisco Fernández Melchor, por su disposición para atender cualquier percance siempre con amabilidad y gentileza, por volver más amenas las clases con su sentido del humor tan peculiar y por su aportación en este proyecto.

Agradezco especialmente al Dr. Roberto Machorro Mejía y todo el equipo de laboratorio de óptica del Centro de Nanociencias y Nanotecnología, por su confianza para la disposición de su laboratorio y equipo, por compartir su gran conocimiento y experiencia siempre con un gesto grato, por convertir las visitas al laboratorio más amenas y por su paciencia y sabiduría para apoyarnos a superar cualquier impedimento durante este proyecto de investigación.

A la Dra. Aurora García García de León, por ser de gran apoyo para poder llevar a cabo todo lo requerido para la realización y terminación de este posgrado.

A mis compañeros de maestría, América, Brenda, Abner y Nohemy, por su apoyo en las clases y constantes tareas, porque al compartir con ellos tanto los momentos de risas como de angustias, todo se volvía más sereno, por volverse mis amigos fuera del salón de clases y porque sin ellos simplemente no hubiera sido posible disfrutar tan plenamente este trayecto.

Agradezco a mis amistades de toda la vida, a las que han llegado en el momento indicado actualmente y a las que ya no están cerca de mí, porque todos y todas formaron parte de un momento crucial para poder concluir este capítulo en mi vida y así darle comienzo a uno nuevo.

Finalmente, agradezco fielmente a las instituciones que hicieron posible la realización de la presente investigación, a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI, antes conocido como 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 ofrecerme la oportunidad de formar parte de un equipo y de un proyecto que supera mi investigación.

RESUMEN

La “Isla de Calor Urbana” (ICU) es un fenómeno que presupone amenazas a la salud, al entorno urbano y a mayor demanda energética en edificaciones, debido a la alteración del medio físico natural. Por lo que, el objetivo de la investigación es el diseño y la caracterización de recubrimientos fríos que reduzcan las cargas térmicas en cubiertas. La síntesis de los pigmentos inorgánicos fue con carbonato de calcio (CaCO_3) bio-renovable natural y calcinado, obtenido del desecho de exoesqueletos de ostión (*crassostrea gigas*). La caracterización de reactivos inorgánicos, por medio de un análisis termo-físico, de absorbancia en espectrofotometría, de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) y de termografía infrarroja, permitió el dopaje de CaCO_3 . Las muestras prototipo fueron elaboradas mediante el método de deposición de recubrimiento por centrifugado (spin coating) y caracterizadas por espectrofotometría. La composición de fase se corroboró con análisis de difracción de rayos x (óxido de calcio y calcita), mientras que el tamaño de partícula (250nm-400nm) con análisis mecano-óptico de topografía. El recubrimiento con la reflectancia más alta fue la muestra con óxido de calcio (CaO), alcanzando un 92.2% en el espectro visible (VIS) y un 90.4% en el infrarrojo (NIR), mientras que el recubrimiento sin ninguna alteración del CaCO_3 , alcanzó un 78% en el VIS/NIR. En las muestras a partir del dopaje con óxido férrico (Fe_2O_3), la reflectancia más alta fue de 66.3% en el NIR. La incorporación del CaCO_3 bio-renovable puede permitir la disminución de las cargas térmicas incidentes en cubiertas, promoviendo la sustentabilidad en el desarrollo de materiales fríos, debido a la incorporación de un subproducto obtenido del sector terciario local en ciudades costeras con actividades acuícolas.

Palabras clave: carbonato de calcio, pigmentos inorgánicos, propiedades ópticas, materiales fríos, isla de calor urbana

ABSTRACT

The modification of the natural environment, resulting in elevated temperatures in urban areas, is called the "Urban Heat Island" (UHI), presenting risks to health and a significant increase in buildings energy consumption. The aim of this research is to design and characterize cool coatings that mitigate thermal loads on roofs. The synthesis of inorganic pigments was using natural and calcined bio-renewable calcium carbonate (CaCO_3), obtained from the oyster waste. The doping of CaCO_3 was determined by the characterization of inorganic reagents, employing absorbance spectrophotometry, Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), thermophysical analysis and infrared thermography. The prototype samples were fabricated via the spin coating method and analyzed through spectrophotometric techniques. The phase composition was obtained using X-ray diffraction analysis, while the particle size (250nm-400nm) was assessed using mechano-optical topography analysis. The coating exhibiting the maximum reflectance was the sample containing calcium oxide (CaO), achieving 92.2% in the visible (VIS) and 90.4% in the near-infrared (NIR) spectrums, whereas the CaCO_3 coating achieved 78% in both. The samples doped with ferric oxide (Fe_2O_3), the maximum reflectance was 66.3% in the NIR region. The use of bio-renewable CaCO_3 could achieve the mitigation of heat loads on roofs, which promotes a sustainable solution on the development of cool materials due the reutilization of a by-product.

Keywords: calcium carbonate, inorganic pigments, optical properties, cool materials, urban heat island

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XV
LISTADO DE ABREVIATURAS, CARACTERES Y SIMBOLOS.....	XVI
INTRODUCCIÓN	1
Conceptos fundamentales	2
Introducción al fenómeno de la isla de calor urbano	3
Resumen de capítulos	6
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	7
1. Planteamiento de la investigación.....	8
1.1. Panorama general.....	8
1.2. Planteamiento del problema	9
1.2.1. Vulnerabilidad ante la isla de calor urbano: pobreza energética, morbilidad y mortalidad9	
1.2.2. Estrategias de mitigación a microescala: incorporación de materiales fríos	15
1.2.3. Potencial de la incorporación de biomateriales derivados de la producción acuícola.	18
1.3. Justificación y motivación	19
1.4. Antecedentes.....	22
1.4.1. Investigaciones precursoras de la isla de calor urbano.....	22
1.4.2. Avance científico en el estudio de enfriamiento radiativo en materiales fríos.....	23
1.4.3. Incorporación de carbonato de calcio en materiales y recubrimientos de construcción	
24	
1.5. Contextualización del objeto de estudio	25
1.6. Pregunta de investigación e hipótesis	29
1.7. Objetivos de la investigación.....	30
1.7.1. Objetivo general	30
1.7.2. Objetivos específicos.....	30
1.8. Alcances y limitaciones	31
1.8.1. Alcance.....	31

1.8.2.	Limitaciones	31
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL		33
2.1.	Marco Conceptual.....	34
2.1.1.	Energía térmica	35
2.1.2.	Propiedades térmicas de los materiales	35
2.1.3.	Mecanismos de transferencia de calor.....	36
2.1.4.	Energía radiante.....	37
2.1.5.	Radiación visible	38
2.1.6.	Comportamiento de la luz	40
2.1.7.	Radiación ultravioleta.....	44
2.1.8.	Radiación infrarroja.....	45
2.1.9.	Ventana atmosférica	46
2.1.10.	Propiedades ópticas de los materiales	47
2.2.	Marco teórico.....	50
2.2.1.	Teoría del cuerpo negro perfecto.....	50
2.2.2.	La base energética de la isla de calor urbano	53
2.3.	Estado del arte: pigmentos reflectivos en materiales fríos predominantnes en la literatura 54	
2.3.1.	Análisis bibliométrico de tendencias.....	54
2.3.2.	Progreso histórico de las tendencias de investigación.....	56
2.3.3.	Clasificación de pigmentos en recubrimientos.....	58
2.3.4.	Pigmentos de titanio	61
2.3.5.	Pigmentos de hierro.....	62
2.3.6.	Pigmentos de zinc.....	64
2.3.7.	Pigmentos de metales postransicionales.....	64
2.3.8.	Pigmentos especiales	65
2.3.9.	Pigmentos lantánidos.....	66
2.3.10.	Pigmentos de metáles alcalinotérreos	67
2.3.11.	Métodos de síntesis de pigmentos inorgánicos	68
2.3.12.	Evaluación del impacto energético con la aplicación de pigmentos fríos.....	72
2.4.	Técnicas de caracterización	74
2.4.1.	Espectrofotometría de reflectancia difusa	74
2.4.2.	Termografía infrarroja.....	75

2.4.3.	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)	76
2.4.4.	Espectrofotometría para análisis de absorbancia UV-VIS	78
2.4.5.	Análisis de difracción de rayos X (XRD).....	79
2.4.6.	Análisis mecano-óptico de topografía (AFM).....	80
2.5.	Marco normativo	80
CAPÍTULO 3. MÉTODO		82
3.	Método	83
3.1.	Diseño de la investigación	83
3.1.1.	Procedimiento metodológico.....	84
3.2.	Diseño del experimento	87
3.2.1.	Objeto y variables de estudio	87
3.2.2.	Área de estudio: ambiente de laboratorio y aplicación final	88
3.2.2.1.	Descripción	88
3.2.2.2.	Caracterización climática y/o contextual	89
3.2.3.	Definición de la unidad de análisis.....	90
3.2.3.1.	Diseño del material (criterios de selección de la unidad de análisis).....	90
3.2.3.2.	Caracterización de la unidad de análisis	94
3.2.3.3.	Prueba piloto	105
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....		107
4.	Resultados	108
4.1.	Procesamiento del carbonato de calcio bio-renovable.....	108
4.1.1.	Tratamiento de los exoesqueletos de crassostrea gigas	108
4.1.2.	Manipulación de la microestructura de CaCO ₃	109
4.2.	Análisis de difracción de rayos X	110
4.2.1.	Estructura cristalográfica de crassostrea gigas sin calcinar.....	111
4.2.2.	Estructura cristalográfica de crassostrea gigas calcinada	111
4.3.	Análisis mecano-óptico de topografía	112
4.4.	Caracterización y análisis termo-óptico de los reactivos inorgánicos	114
4.4.1.	Análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier.....	115
4.4.2.	Análisis de absorbancia en espectrofotometría	118
4.4.3.	Análisis térmico.....	120
4.4.4.	Análisis de termografía infrarroja	122
4.4.4.1.	Diseño y fabricación de porta muestras	122

4.4.4.2.	Montaje de la muestra prototipo	123
4.4.4.3.	Caracterización termográfica infrarroja	126
4.5.	Diseño y fabricación de muestras prototipo	127
4.5.1.	Síntesis de los pigmentos inorgánicos a base de CaCO_3 bio-renovable	128
4.5.2.	Dopaje del CaCO_3 con Fe_2O_3	130
4.5.3.	Composición de los recubrimientos fríos	132
4.5.4.	Deposición de los recubrimientos fríos	133
4.6.	Análisis de espectrofotometría	136
4.6.1.	Reflectancia difusa de las muestras AC-1 y AP-1.....	136
4.6.2.	Reflectancia difusa de las muestras CA-1, CA-2 y CA-3	138
4.6.3.	Reflectancia difusa de las muestras FE-1, FE-2, FE-3 y FE-4	146
DISCUSIÓN		151
CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES		156
REFERENCIAS		161
APENDICES.....		183
	Apéndice A: Revisión de la literatura.....	184
	Apéndice B: Análisis comparativo de los reactivos químicos empleados en materiales fríos ...	191

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Conceptos que sustentan la investigación.....	3
Figura 2 Hospitalizaciones relacionadas con el calor en México basadas en el mapa UNIATMOS (periodo: 1902-2015)	11
Figura 3 Proyecciones de cambios de temperatura anual promedio (°C) en Baja California para escenarios de bajas (B1) y de altas (A2) emisiones de GEI de 2000-2100.....	13
Figura 4 Estrategias de mitigación y parámetros ambientales en el estudio de la ICU	16
Figura 5 Investigaciones en el estudio de enfriamiento radiativo en materiales fríos	24
Figura 6 Clasificaciones de Local Climate Zones.....	27
Figura 7 Clasificación de materiales fríos y subcategorías	28
Figura 8 Perspectiva deductiva del objeto de estudio en relación con el planteamiento del problema	32
Figura 9 Clasificaciones de la energía	34
Figura 10 Espectro de la radiación electromagnética	37
Figura 11 Espacio de color CIELAB, gráfico tridimensional de coordenadas	39
Figura 12 Tipos de reflexión de la luz	41
Figura 13 Absorción de la luz.....	41
Figura 14 Refracción de la luz	42
Figura 15 Dispersión de la luz	42
Figura 16 Difracción de luz	43
Figura 17 Fotografía de termografía	46
Figura 18 La ventana atmosférica dentro del espectro electromagnético	47
Figura 19 Radiación espectral de un cuerpo negro a diferentes temperaturas	51
Figura 20 La estrategia de búsqueda de la literatura.....	56
Figura 21 Clasificación de pigmentos en recubrimientos	60
Figura 22 Espectro infrarrojo de la miel de abeja	78

Figura 23 Precisiones metodológicas.....	83
Figura 24 Secuencia cronológica del proceso metodológico.....	84
Figura 25 Protocolo para análisis de la composición química y la microestructura	95
Figura 26 Protocolo para análisis termo-óptico de los reactivos inorgánicos.....	97
Figura 27 Protocolo para la síntesis de pigmentos inorgánicos y la fabricación de muestras prototipo	102
Figura 28 Protocolo para análisis de espectrofotometría	103
Figura 29 Prueba piloto para la fabricación de muestras prototipo.....	106
Figura 30 Tratamiento de limpieza de los exoesqueletos de ostión.....	108
Figura 31 Tratamiento de trituración de los exoesqueletos de ostión.....	109
Figura 32 Manipulación de la microestructura del carbonato de calcio	110
Figura 33 Análisis XRD de exoesqueletos de crassostrea gigas sin calcinar.....	111
Figura 34 Análisis XRD de exoesqueletos de crassostrea gigas calcinada.....	112
Figura 35 Análisis de muestra CaCO ₃ mediante la técnica AFM	113
Figura 36 Topografía de la muestra de CaCO ₃	113
Figura 37 Transmitancia espectral de carbonatos en FT-IR	116
Figura 38 Transmitancia espectral de óxidos metálicos en FT-IR.....	117
Figura 39 Ultrasonificación de reactivos inorgánicos en agua destilada.....	119
Figura 40 Absorbancia espectral de los reactivos inorgánicos	120
Figura 41 Caracterización térmica de CaCO ₃ y MnO ₂	121
Figura 42 Impresión de porta muestra y muestra revolver	122
Figura 43 Deposición de reactivos inorgánicos en muestra revolver.....	124
Figura 44 Emitancia infrarroja de los reactivos inorgánicos	127
Figura 45 Síntesis de los pigmentos inorgánicos bio-renovables	128
Figura 46 Síntesis de pigmentos inorgánicos bio-renovables	129
Figura 47 Cristalinidad de compuestos inorgánicos bio-renovables.....	129

Figura 48 Mejoramiento de la reflectancia del CaCO_3 bio-renovable por medio del dopaje con Fe_2O_3	131
Figura 49 Proceso metodológico del dopaje del CaCO_3 con Fe_2O_3	132
Figura 50 Almacenamiento de recubrimientos a base CaCO_3 sin modificar (a) y a partir del dopaje con Fe_2O_3 (b)	133
Figura 51 Deposición de las muestras prototipo	133
Figura 52 Comparación de recubrimientos fríos bio-renovables y comerciales	135
Figura 53 Recubrimientos fríos a partir del dopaje de carbonato de calcio bio-renovable y óxido férrico	136
Figura 54 Análisis comparativo de la reflectancia entre las muestras de los recubrimientos comerciales	137
Figura 55 Análisis comparativo de la reflectancia entre las muestras a base de CaCO_3 bio-renovable	139
Figura 56 Análisis comparativo del recubrimiento a base de CaCO_3 bio-renovable y las muestras comerciales	141
Figura 57 Análisis comparativo de los recubrimientos con CaCO_3 bio-renovable y ácido cítrico y los comerciales	143
Figura 58 Análisis comparativo del recubrimiento a base de CaO y las muestras comerciales ...	145
Figura 59 Análisis comparativo entre las muestras a partir del dopaje de CaCO_3 bio-renovable con Fe_2O_3	147
Figura 60 Análisis comparativo entre las muestras a partir del dopaje de CaCO_3 con Fe_2O_3 y las comerciales	149

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de materiales fríos	18
Tabla 2 Propiedades térmicas y físicas de los materiales.....	35
Tabla 3 Regiones del espectro electromagnético	38
Tabla 4 Longitud de onda con respecto al color	38
Tabla 5 Viabilidad multiobjetivo de los tipos de pigmentos para el desarrollo de materiales fríos	61
Tabla 6 Métodos de síntesis para pigmentos fríos	70
Tabla 7 Impacto energético obtenido con la implementación de pigmentos fríos	73
Tabla 8 Longitud de onda para distintos rangos del espectro infrarrojo	76
Tabla 9 Estándares internacionales en materiales fríos.....	81
Tabla 10 Proceso metodológico de la investigación	86
Tabla 11 Operacionalización de variables	88
Tabla 12 Propiedades térmicas de materiales de construcción	91
Tabla 13 Especificaciones técnicas del horno de sinterización tubular	93
Tabla 14 Estudio comparativo de reactivos químicos empleados en recubrimientos fríos.....	94
Tabla 15 Especificaciones técnicas de los equipos para análisis de la composición química y microestructura.....	95
Tabla 16 Especificaciones técnicas de los equipos del protocolo para análisis termo-óptico de los reactivos	98
Tabla 17 Métodos de síntesis de pigmentos y técnicas de caracterización termo-óptica.....	100
Tabla 18 Composición química del acero galvanizado.....	101
Tabla 19 Especificaciones técnicas de los equipos del protocolo de síntesis de pigmentos y fabricación de muestras.....	102
Tabla 20 Equipo utilizado para análisis de espectrofotometría.....	104
Tabla 21 Proceso químico desarrollado para la obtención del óxido de calcio.....	110
Tabla 22 Especificaciones de los reactivos inorgánicos	115
Tabla 23 Propiedades térmicas de los reactivos inorgánicos	121

Tabla 24 Especificaciones técnicas del impermeabilizante térmico Acritem.....	124
Tabla 25 Recubrimiento elastomérico acrílico APOC 252 Sunwhite.....	125

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Balance energético de la superficie expuesta al sol.....	48
Ecuación 2 Reflectancia solar	49
Ecuación 3 Reflectancia solar total	50
Ecuación 4 Emitancia infrarroja.....	50
Ecuación 5 Índice de reflectancia solar.....	50
Ecuación 6 Ley de Stefan.....	52
Ecuación 7 Ley de Wein	52
Ecuación 8 Ley de Planck.....	53
Ecuación 9 Cálculo de la absorbancia.....	79

LISTADO DE ABREVIATURAS, CARACTERES Y SIMBOLOS

Abreviatura	Descripción	Símbolo	Descripción
CC	Materiales de colores fríos	Al	Aluminio
DRC	Materiales de enfriamiento radiativo diurno	Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio
DST	Disminución de la temperatura de la superficie	B	Bismuto
FL	Materiales fluorescentes	BaCO ₃	Carbonato de bario
FT-IR	Espectroscopía infrarroja por transformada de fourier	BaSO ₄	Sulfato de bario
GEI	Gases de efecto invernadero	BaTiO ₃	Titanato de bario
ICU	Isla de calor urbana	BiVO ₄	Vanadato de bismuto
IR	Espectro Infrarrojo	Ca	Calcio
LC	Materiales de colores claros	CaCO ₃	Carbonato de calcio
LU/LC	Uso de suelo	CaO	Óxido de calcio
NIR	Espectro Infrarrojo cercano	Ca (OH) ₂	Hidróxido de calcio
QDs	Puntos cuánticos	CO ₂	Dióxido de carbono
PCM	Materiales de cambio de fase	Cr	Cromo
RR	Materiales retrorreflectivos	CuO	Óxido de cobre
RS	Revisión sistemática	Fe	Hierro
SEM	Microscopía electrónica de barrido	Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro
SR	Reflectancia solar	Mn	Manganeso
SRI	Índice de reflectancia solar	MnO ₂	Dióxido de manganeso
TC	Materiales termocrómicos	NaOH	Hidróxido de sodio
TSR	Reflectancia solar total	Si	Sílice
UEB	Presupuesto energético urbano	SiO ₂	Dióxido de silicio
UV	Espectro Ultravioleta	Ti	Titanio
VIS	Espectro Visible	TiO ₂	Dióxido de titanio
XRD	Técnica de difracción de rayos X	Zn	Zinc
		ZnO	Óxido de zinc
		V	Vanadio
		VO ₂	Óxido de vanadio
		λ	Longitud de onda
		ε	Emitancia infrarroja
		R _{nir}	Reflectancia infrarrojo cercano
		R _{vis}	Reflectancia visible
		R _{uv}	Reflectancia ultravioleta

INTRODUCCIÓN

Conceptos fundamentales

De forma introductoria, la presente investigación se encuentra dentro del contexto de la isla de calor urbano (ICU), centrándose en las técnicas que presenten capacidades para reducir la temperatura superficial urbana. Por lo tanto, los conceptos fundamentales que comprenden al tema de investigación son: estrategias de mitigación de la ICU, materiales fríos y síntesis de pigmentos reflectivos (Figura 1).

Las estrategias de mitigación de la ICU se pueden clasificar principalmente en 3 categorías: cobertura o uso de suelo (LU/LC¹), diseño urbano y planificación urbana (Gonzalez-Trevizo et al., 2021).

- Cobertura o uso de suelo: son aquellas técnicas que cubren distintas superficies con el objetivo de reducir la temperatura del ambiente. Incluyen la implementación de parques y áreas verdes, techos o fachadas verdes/frías, pavimentos fríos y cuerpos de agua.
- Diseño urbano: son estrategias relacionadas con la radiación, los fluidos y los sistemas hídricos. Se enfoca en el diseño de calles y de cañones urbanos, tomando en cuenta el flujo del viento y el agua.
- Planificación urbana: incluye políticas, compromiso comunitario y el diseño de la morfología urbana. Así mismo, considera la movilidad urbana y la intensidad del tráfico.

Un techo frío (*cool roof*) se caracteriza por reflejar con fuerza la luz solar (energía solar) y por ser capaz de enfriarse por sí mismo, emitiendo eficazmente el calor absorbido. Los materiales fríos (*cool materials*) no necesariamente son de color blanco, debido a que actualmente se utilizan pigmentos de colores oscuros muy reflectantes en la porción cercana al infrarrojo (no visible) del espectro solar. Las dos características básicas que determinan la capacidad de enfriamiento de un material son la reflectancia solar y la emitancia térmica. Ambas

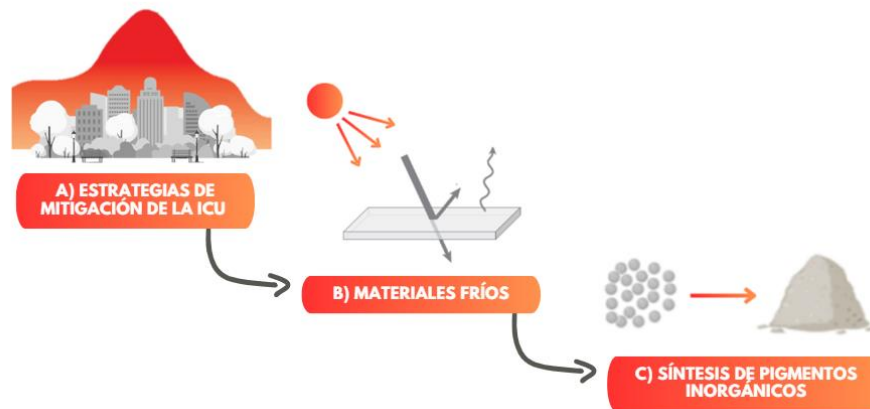
¹ Land Use/Land Cover, por sus siglas en inglés

propiedades son medidas en una escala de 0 a 1, donde 1 significa que el material es 100% reflectante o emisivo (Cool Roof Rating Council, 2024).

Los materiales fríos pueden ser categorizados en 7 grupos con base en sus propiedades ópticas y su rango espectral. Los tipos de materiales fríos se clasifican en materiales de color claro, materiales no-blancos, los materiales de enfriamiento radiativo diurno, los materiales fluorescentes, los materiales retrorreflectivos, los materiales termocrómicos y los materiales de cambio de fase (Morales-Inzunza et al., 2023).

Diversos recubrimientos fríos están conformados por pigmentos inorgánicos reflectivos, ya que son los compuestos principales para obtener una alta reflectancia solar (Levinson et al., 2010). Los pigmentos se pueden clasificar en orgánicos e inorgánicos. Los orgánicos son más susceptibles a la decoloración cuando se exponen a la luz, y se utilizan más en textiles o plásticos. Mientras que los inorgánicos como los óxidos metálicos, son sustancias formadas por pequeñas partículas insolubles en disolventes, con una alta estabilidad química y térmica. El desempeño óptico de estos pigmentos depende del tamaño, forma y concentración de volumen de partículas (Sheethu et al., 2019).

Figura 1
Conceptos que sustentan la investigación



Introducción al fenómeno de la isla de calor urbano

La quema de combustibles fósiles debido a diversas actividades humanas ha aumentado la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) han ocasionado un incremento en la temperatura de la superficie del planeta a un 1.1 °C en las últimas décadas (IPPC, 2023). El atrapamiento del calor antropogénico, representan afectaciones al clima urbano, las cuales han

generado una seria degradación medio ambiental. Así bien, el calor acumulado y liberado en el medio construido, aumenta la temperatura urbana comparada con la de zonas rurales, ocasionando como resultado el efecto de la ICU (Oke, 1982). Este fenómeno se produce por diversos factores, como la concentración de superficies oscuras e impermeables y la falta de infraestructura verde. De igual manera, los edificios altos que bloquean o ralentizan el flujo del viento, conocidos como cañones urbanos, contribuyen a la formación de islas de calor (Cool Roof Rating Council, 2024).

Las principales áreas afectadas por el fenómeno ICU son: energía, salud-morbilidad, salud-mortalidad, calidad ambiental urbana, riesgo y vulnerabilidad, confort humano y demografía. Desde hace dos décadas se ha demostrado que la ICU tiene un mayor impacto en el consumo energético de los edificios (Aghamohammadi & Santamouris, 2022). En promedio el consumo energético de edificios urbanos para enfriamiento es 13% mayor comparado con edificios similares en zonas rurales (Santamouris, 2014). Por su parte, se ha incrementado recientemente la demanda de equipos de climatización en edificios, principalmente en zonas mediterráneas. Las crecientes exigencias de confort en este tipo de clima, provocan un aumento constante del consumo de energía (Ascione et al., 2019).

De igual manera, el 80% de la utilización mundial de energía genera un gran aumento en las concentraciones de GEI en la atmosfera (Nejat et al., 2015). Los principales GEI debido al suministro de electricidad incluyen el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) (COCEF, 2010). La concentración de dichos contaminantes aunado al aumento de la temperatura incrementa la duración de las olas de calor, lo que puede agravar la salud de las personas con enfermedades crónicas. Así mismo, se ha determinado que la temperatura tiene un impacto directo sobre la mortalidad durante los periodos más cálidos, alcanzando una estimación media del 37% (Aghamohammadi & Santamouris, 2022). Como consecuencia de lo anterior, se estima que en las próximas dos décadas, el planeta afrontará un incremento en la temperatura de 1.5 °C, generando impactos graves y algunos irreversibles de alto riesgo (IPCC, 2022). El riesgo a desastres, el cual se refiere a la probabilidad de pérdida, está estrechamente relacionado al peligro y la vulnerabilidad. La vulnerabilidad social se presenta como consecuencia directa del empobrecimiento, el incremento demográfico y de la urbanización acelerada sin planeación. Así mismo, la capacidad de respuesta de la sociedad ante los desastres

naturales es definida como vulnerabilidad social, la cual considera factores económicos, sociales y culturales (CENAPRED, 2006).

Actualmente, la implementación de materiales reflectantes en la cobertura del suelo, como en los techos de los edificios, ha demostrado la reducción de la temperatura superficial y con ello la mitigación de la ICU (Santamouris & Yun, 2020). Con ello, las cubiertas se mantienen más frescas, reduciendo así la cantidad de calor conducido al interior del edificio. La capacidad de estos materiales para reflejar el calor en la atmósfera, disminuye el empleo del aire acondicionado para mantener en confort a los ocupantes de los edificios (Cool Roof Rating Council, 2024). Los materiales que permiten obtener una alta reflectancia en recubrimientos son los pigmentos inorgánicos, ya que contienen excelentes propiedades resistentes al calor y a la luz debido a su alta estabilidad química y térmica (Chen et al., 2016; Lee et al., 2021).

Considerando lo anterior, la presente investigación tiene como objetivo el diseño y la caracterización de un material frío compuesto por pigmentos reflectivos naturales, con el propósito de responder a la siguiente pregunta: *¿Cómo se puede incrementar experimentalmente la reflectancia solar de recubrimientos fríos diseñados a partir de la síntesis y dopaje de pigmentos inorgánicos con una matriz de carbonato de calcio bio-renovable de bajo costo para el enfriamiento radiativo de superficies urbanas?*

Resumen de capítulos

Los fundamentos teóricos y los métodos que sustentan la presente investigación, así como los resultados obtenidos del estudio comprenden una estructura de cuatro capítulos:

- Capítulo I: Comprende los temas que exponen el planteamiento y panorama general de la problemática, justificación, antecedentes, contextualización del objeto de estudio, pregunta de investigación e hipótesis, objetivos de la investigación, alcances y limitaciones.
- Capítulo II: Expone los conceptos pertinentes a la investigación, teorías, publicaciones científicas y normativa correspondiente, los cuales conforman el marco teórico referencial.
- Capítulo III: Describe las técnicas empleadas para el diseño de la metodología utilizada para la presente investigación, conformándose por el diseño de la misma, el diseño del material y finalmente, el diseño del experimento.
- Capítulo IV: Presenta los resultados obtenidos a partir del diseño y la elaboración de muestras prototipo, por medio de la realización del experimento, el cual contiene los siguientes apartados: a) obtención del compuesto inorgánico bio-renovable, b) análisis de difracción de rayos X, c) análisis mecano-óptico de topografía, d) análisis de espectroscopía infrarroja por transformado de Fourier, e) análisis de absorbancia en espectrofotometría, f) análisis termo-físico, g) análisis de termografía infrarroja, h) diseño y fabricación de muestras, i) análisis de espectroscopía.

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1. Planteamiento de la investigación

1.1. Panorama general

Actualmente, el 58.3% de la población mundial, habita en ciudades, esperando que la tendencia siga en aumento en las siguientes décadas (ONU Hábitat, 2022). Se prevé, que el crecimiento demográfico mundial crecerá al menos 2.5 billones de habitantes urbanos entre el 2018 y el 2050, impulsado por la migración rural-urbana y la expansión geográfica de los asentamientos urbanos (United Nations, 2018). La urbanización implica la alteración en el balance energético natural, asociado a la pérdida de vegetación por la ocupación de suelos y al intercambio de superficies permeables por materiales de construcción con pobres características térmicas (Hashem Akbari et al., 2016). Así mismo, se espera que para el 2050 la temperatura en 153 ciudades a nivel mundial incremente entre 1.4°C – 1.3 °C (Susca & Pomponi, 2020).

La ICU puede incrementar la temperatura de las ciudades hasta 10°, impactando seriamente en la energía (Santamouris & Yun, 2020). Por consiguiente, las zonas urbanas con una baja calidad climática consumen más energía debido a los equipos de climatización, principalmente en verano. Con ello, el incremento de la población urbana en 1%, incrementa el consumo energético en un 2.2% (Santamouris et al., 2001). Así mismo, el aumento del consumo energético debido a la ICU, aumenta la concentración de contaminantes, deteriorando el confort térmico al interior y exterior de las ciudades, durante los periodos cálidos principalmente, afectando las condiciones de salud y aumentando la mortalidad (Santamouris & Kolokotsa, 2016).

Para contrarrestar el incremento de la temperatura en el ambiente urbano y reducir el impacto del consumo energético, los avances científicos se basan en el desarrollo de innovadoras y avanzadas tecnologías de mitigación. Dentro de las principales estrategias de mitigación propuestas, están aquellas que buscan aumentar el albedo del medio urbano, como el uso de materiales reflectantes de la radiación solar, extender la infraestructura verde y el uso de disipadores naturales del exceso de calor (Akbari & Kolokotsa, 2016; Santamouris & Kolokotsa, 2016). La aplicación de dichos materiales reflectivos o fríos representa una solución financieramente viable y amigable con el medio ambiente, ya que promueve una temperatura urbana superficial más baja, contribuyendo a la reducción del calor sensible emitiendo el calor

afuera del espacio a través de la ventana atmosférica (8–13 μm) (Sun et al., 2022). La diversidad de tipos de materiales fríos desarrollados para reflejar y disipar la radiación solar en superficies urbanas, como envolventes arquitectónicas y pavimentos, se caracteriza por su reflectancia en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético, principalmente en el infrarrojo cercano, que es en donde se generan las ondas de calor (Kyriakodis & Santamouris, 2018).

Los materiales fríos están conformados por pigmentos específicamente diseñados para reflejar en la porción cercana al infrarrojo (Rosati et al., 2021a). Los pigmentos son los materiales principales para obtener una alta reflectancia en recubrimientos, la cual es determinada por medio de un análisis espectral (Levinson et al., 2005; Levinson et al., 2010). El desarrollo de materiales fríos, predominantemente, es llevado a cabo en laboratorio, en donde a su vez, se realiza la síntesis de los pigmentos reflectivos y la caracterización de sus propiedades termo-ópticas. Los pigmentos inorgánicos, específicamente, contienen excelentes propiedades resistentes al calor y a la luz debido a su alta estabilidad química y térmica (Chen et al., 2016; Lee et al., 2021). En la actualidad, se utilizan para diversas aplicaciones industriales, sin embargo, la mayoría de los pigmentos inorgánicos comerciales derivan de metales pesados dañinos para la salud, limitando el desarrollo sustentable. Por lo que, cada vez es mayor el esfuerzo de la investigación científica para el desarrollo de pigmentos inorgánicos amigables con el medio ambiente, que, a su vez, presenten una alta reflectancia en el infrarrojo cercano, para contribuir a la disminución de la demanda energética debido a los sistemas de climatización activos en edificios (Sreeram et al., 2007; Xiao et al., 2021).

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Vulnerabilidad ante la isla de calor urbano: pobreza energética, morbilidad y mortalidad

La mayor parte de la energía utilizada para propósitos humanos es disipada como calor dentro de la superficie-atmosfera de la Tierra, lo cual implica un aumento en la emisión de GEI por la generación de electricidad (Santamouris & Kolokotsa, 2016). El incremento de la concentración de GEI en la atmosfera, contribuye al aumento de la temperatura urbana y a la duración de los fenómenos climáticos extremos (Landsberg, 1981).

De acuerdo con las predicciones, se espera que en el 2050 los países de la Organización para la Cooperación y Desarrollo de la Economía (OECD, por sus siglas en inglés) aumenten en un 50% el consumo energético para refrigeración. Por otro lado, en los países no-OECD, dicho aumento será cuatro veces mayor y a nivel global se estima que la demanda energética en edificios residenciales y comerciales aumente entre el 750% y 275% (Santamouris, 2016) (International Energy Agency, 2020). Entre 1990 y 2020, las emisiones de GEI han incrementado mundialmente dentro del sector energético de 23,283.88 toneladas métricas de CO₂ (MtCO₂e) a 35,475.65 MtCO₂e, o con un incremento del 52.3%. Por su parte, en el 2020 México se posicionó en el top 15 mundial de los países con más emisiones con un total de 401.26 MtCO₂e, contribuyendo al 1.13%. Así mismo, las emisiones de GEI en el país han incrementado un 33.8% entre los años de 1990 y 2020 (Climate Watch, 2024).

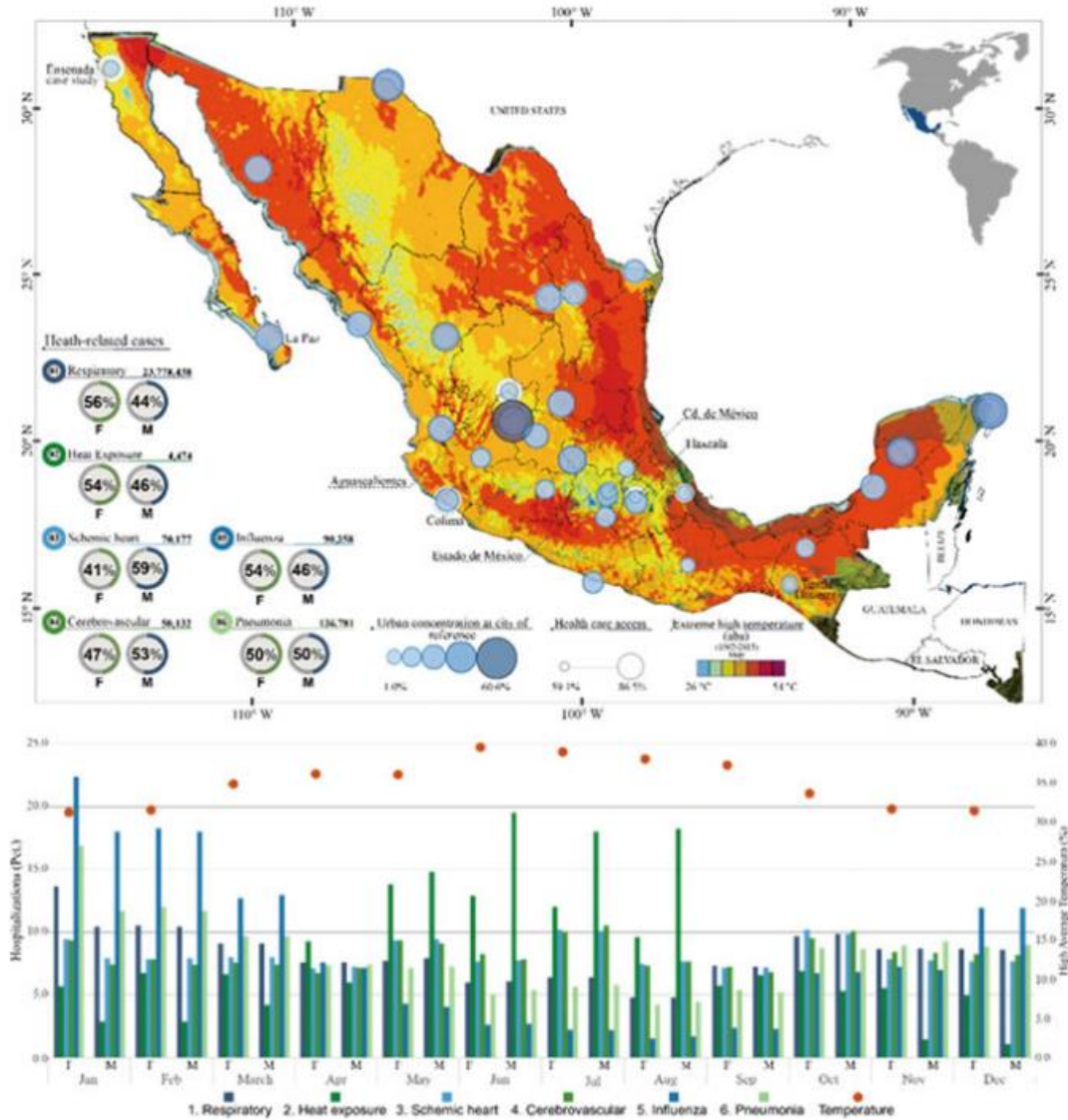
Con el sobrecalentamiento urbano, el punto más alto de la demanda de electricidad, aumenta la concentración de contaminantes, principalmente durante los periodos cálidos (Santamouris & Kolokotsa, 2016). Recientemente, se ha reportado en la investigación científica, que el sector de la población que presenta mayor vulnerabilidad a las fluctuaciones de la temperatura y la humedad del ambiente son los mayores a 65 años, infantes, la población femenil y las personas con enfermedades crónicas (Roberts et al., 2018). Por su parte, los niños menores a 5 años conforman el 88% de la morbilidad a causa del cambio climático, debido a ser más propensos a contraer una enfermedad como consecuencia de las diversas condiciones ambientales. De igual forma, los pueblos indígenas representan un grupo vulnerable, debido a sus limitaciones para la adquisición de recursos alimenticios, servicios básicos y refugio (Levy & Patz, 2015).

Así, América Latina es la región que concentra el mayor número de megaciudades, donde el 14.2% reside en 6 ciudades con 10 millones de habitantes, enfrentando el calentamiento global el cual acentúa el riesgo de mortalidad debido a las altas temperaturas (ECLAC—United Nations, 20210). Por su parte, en México se ha alertado desde hace unas décadas sobre los efectos del cambio climático en las enfermedades respiratorias agudas y diarreicas o golpes de calor por eventos climáticos extremos (Riojas-Rodriguez et al., 2006). Debido a lo anterior, ha sido necesario comprender los patrones de las tasas de morbilidad y mortalidad en las zonas como una cuestión de interés para las políticas públicas.

Por lo que recientemente, se ha realizado un estudio titulado “Impacto del sobrecalentamiento urbano y mortalidad por calor en México” donde se reporta la morbilidad y las enfermedades relacionadas con el calor de acuerdo con el Sistema de Clasificación de Enfermedades ICD-10 para un escenario pre-pandémico. De acuerdo con González-Trevizo et al. (2022), durante el año de estudio (2019) se reportaron hospitalizaciones en donde se identificó que el sector femenino es más susceptible a las enfermedades respiratorias e infartos representando un 56% y 54%, mientras que el 59% y el 53% del sector masculino reportó vulnerabilidad a las enfermedades isquémicas y cerebrovasculares. En total se reportaron 24130360 casos de hospitalizaciones relacionadas con el calor dentro del periodo mencionado. Así mismo en la Figura 2, se muestra el mapa de las 32 Entidades Federativas, las cuales son representadas por las burbujas azules que indican la Ciudad de Referencia (CoR), con mayor concentración de población. El promedio nacional de concentración demográfica en cada CoR, es de 22.9%. Por su parte, las burbujas blancas hacen referencia a la población con acceso a servicios de salud en cada CoR, con un 75% de promedio nacional. El contraste en el diámetro de las burbujas azules y blancas, indica el contraste en cada estado, con respecto al acceso a los servicios de salud. A pesar de que el mayor número de hospitalizaciones en México ocurre en enero, debido a la alta prevalencia de las enfermedades respiratorias, el clima predominante en las CoR es Cwb (clima subtropical de altiplano), según la clasificación climática de Köppen-Geiger, en donde el mes más cálido es mayo. De igual manera, el mapa muestra la distribución térmica de dicho mes y las temperaturas máximas extremas absolutas de acuerdo con los datos históricos de UNIATMOS entre 1902-2015, con una oscilación entre 15.3°C y 52.5 °C. Con ello, se muestra la evidencia en la tendencia inversa que presentan los casos de enfermedades respiratorias y su relación con la exposición al calor, las cuales incrementan porcentualmente durante en el mes más cálido, principalmente en la población femenina (Aghamohammadi & Santamouris, 2022).

Figura 2

Hospitalizaciones relacionadas con el calor en México basadas en el mapa UNIATMOS (periodo: 1902-2015)



Nota. Obtenida de Capítulo “Urban Overheating: Heat Mitigation and the Impact on Health Advances in Sustainability Science” por Aghamohammadi y Santamouris, 2022.

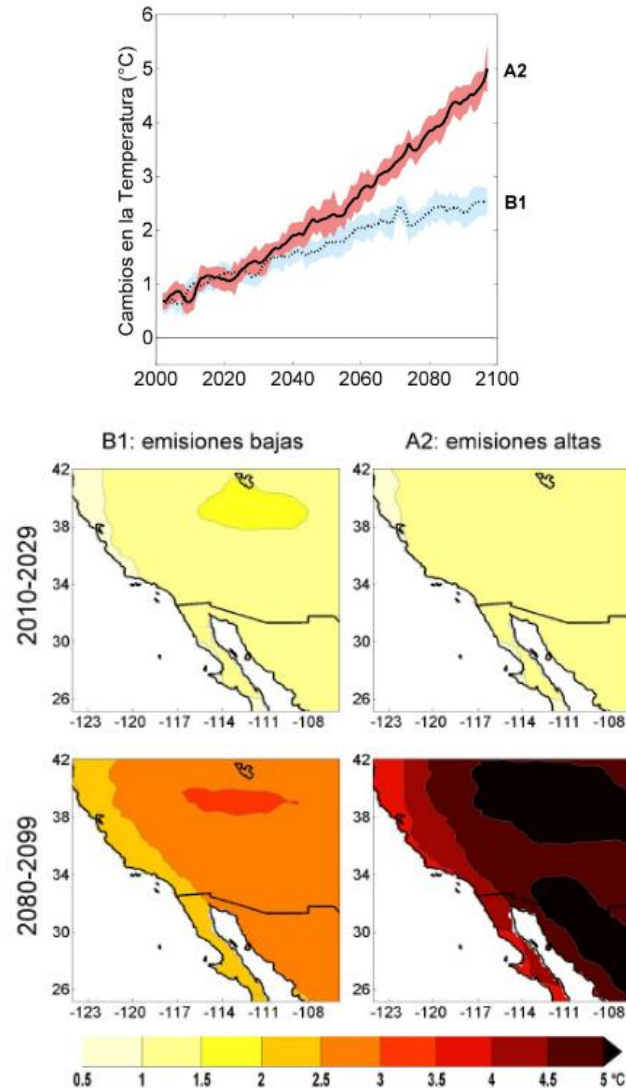
Por su parte, uno de los estados con una de las tasas más altas de crecimiento anual en el país, es Baja California con 3.2%. El acelerado crecimiento de la población urbana en el estado, es una de las principales razones que constituyen al aumento en el consumo de energía habitacional (Garcia et al., 2013). En el 2020, el estado generó 20.6 MMtCO₂e con base en consumo energético, correspondiendo al 5.13% del total de emisiones en el país. Así mismo, de 1990 al 2020, dichas emisiones aumentaron en el estado el 250%, mientras que en el resto del país solo aumentaron aproximadamente un 31%, entre 1990 al 2005 (COCEF, 2010)(Wei et al., 2017). De acuerdo con las directrices establecidas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en el 2006, se determinó que la

categoría principal de emisión en el estado es el sector energético con un 76% y se espera un 85% para el 2050. Dentro del mismo, el 12% corresponde a la generación de electricidad y al sector residencial (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de Baja California, 2012).

Aunado a lo anterior, tomando como referencia los datos obtenidos durante el desarrollo del Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California (PEACC-BC), el estado se encuentra vulnerable al cambio climático global (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de Baja California, 2012). Así mismo, se tienen proyectados dos posibles escenarios de cambio climático en Baja California, impactando en la temperatura y la precipitación con respecto a las emisiones generadas: B1 (bajas emisiones) y A2 (altas emisiones). En la parte superior de la Figura 3, se presentan las proyecciones de cambios en la temperatura del estado hasta el año 2100, considerando los datos climáticos del periodo 1961-1990. Después del 2050, las proyecciones demuestran un cambio significativo, ya que se prevé un aumento en la temperatura anual promedio hasta de 4.5 °C según el escenario A2, mientras que en el escenario de emisiones bajas se incrementa solamente hasta un 2.4 °C. Por otro lado, se muestra que en el periodo 2010-2029 las proyecciones de ambos escenarios no difieren, sin embargo, a partir del año 2080 hasta el 2099, las emisiones altas afectarían considerablemente el incremento de la temperatura anual promedio (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de Baja California, 2012).

Figura 3

Proyecciones de cambios de temperatura anual promedio (°C) en Baja California para escenarios de bajas (B1) y de altas (A2) emisiones de GEI de 2000-2100.



Nota. Obtenida del “Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California (PEACC-BC)” por Secretaría de Protección al Ambiente, 2012.

Por su parte, Ensenada es uno de los 5 municipios que comprenden al estado de Baja California, que ha presentado un acelerado crecimiento urbano en los últimos años. En el 2019 se registró que 87 mil personas vivían en zonas urbanas, mientras que 43mil personas vivían en regiones rurales. En cuanto el número de casos de mortalidad relacionada con los trastornos derivados del calor en el municipio dentro del mismo año, se registró un total de 1145 en zonas urbanas, el cual corresponde al 95.5% del total de la población. La tasa de mortalidad más alta se identificó en el sector poblacional mayor de 55 años y en las mujeres mayores de 70 años (Aghamohammadi & Santamouris, 2022).

Aunado a lo anterior, el fenómeno urbano en la ciudad de Ensenada no solo implica la invasión de nuevos territorios naturales, sino que también genera un incremento en el consumo energético. En el 2007, el 32% del suelo urbano estaba destinado al sector habitacional por encima de los demás usos, interponiéndose a los porcentajes de cobertura de suelo natural, los cuales promueven la mitigación del impacto del cambio climático. Así mismo, el consumo del sector residencial en el 2011, fue de 223.6 GWh con un consumo per cápita de 1.58 MW/año. (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de Baja California, 2012).

La diferencia de las cargas de enfriamiento activo atribuidas a la ICU, es una fuerte característica del funcionamiento de los edificios convencionales. La diferencia del calor urbano y el rural en el verano, en climas donde el enfriamiento activo es prioritario, es mucho más alta en comparación del descenso de la carga de calentamiento activo correspondiente (Santamouris & Kolokotsa, 2016). Por lo que, considerando las problemáticas planteadas anteriormente, la presente investigación busca la implementación de estrategias de mitigación de la ICU que disminuyan el uso de sistemas de climatización activos de las edificaciones dentro del contexto urbano en la ciudad de Ensenada, B.C.

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

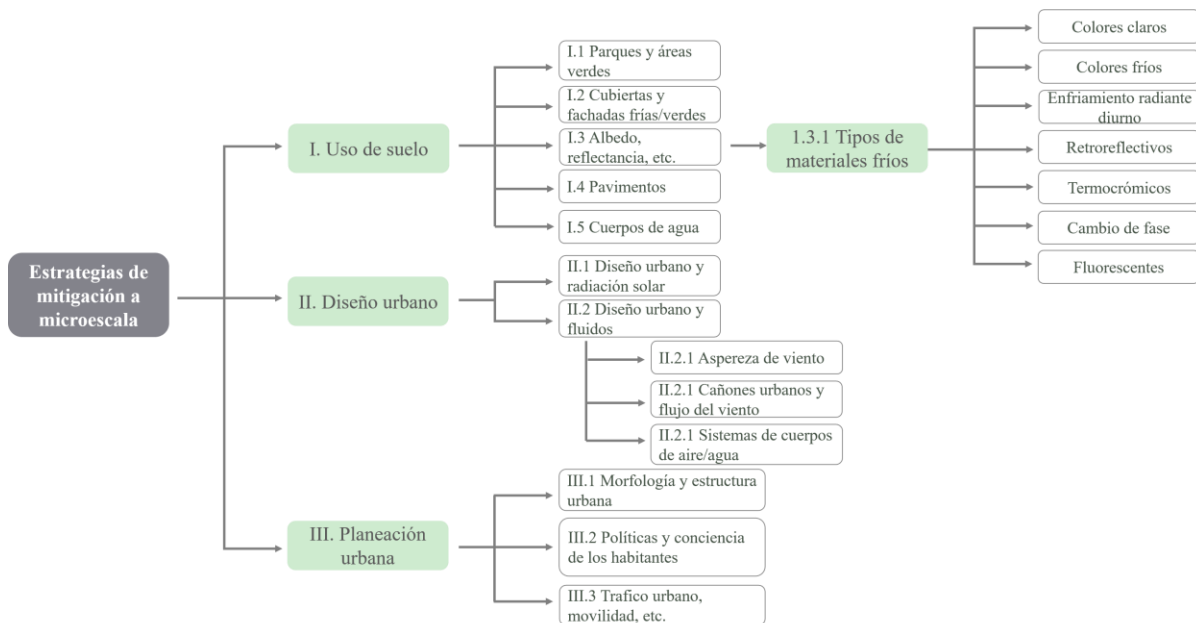
El incremento del consumo energético para enfriamiento en edificios es debido principalmente a la capacidad de los materiales para absorber y emitir la radiación solar, determinando en gran medida el equilibrio térmico urbano. Los materiales absorbentes incrementan la temperatura superficial aumentando la temperatura del ambiente urbano, contribuyendo así, al fenómeno ICU (Santamouris & Yun, 2020). La radiación solar está conformada espectralmente en un 5% por la región ultravioleta (UV) (200 nm – 400 nm), en un 43% por la visible (400 nm – 700 nm) y en su mayoría por el espectro infrarrojo-cercano (NIR²) (700 nm – 2,500 nm) correspondiendo a un 52% (Hashem Akbari et al., 2006). Por lo que, el sobrecalentamiento de las superficies de los edificios es consecuencia principalmente de la radiación solar infrarroja (Rosati et al., 2021b). El espectro NIR presenta una gran amplitud y

² Near-Infrared, por sus siglas en inglés

debido que ahí es en donde se genera el calor, es el espectro de mayor interés para reflejar la radiación en la presente investigación.

Así mismo, considerando las consecuencias que se generan debido a la ICU, existen técnicas específicas de mitigación y tecnologías de adaptación desarrolladas actualmente aplicadas en una escala mayor, para contrarrestar el impacto del sobrecalentamiento urbano. El propósito principal de esto es debilitar la fuerza de las fuentes de calor urbano. Por lo que, las estrategias de mitigación de dicho fenómeno se clasifican en 3 categorías: cobertura o uso de suelo, diseño urbano y planificación urbana. La primera categoría contempla las técnicas dirigidas al LU/LC, que cubren distintas superficies urbanas capaces de disminuir la temperatura del ambiente, como se muestra en Figura 4 (Gonzalez-Trevizo et al., 2021). Tomando en cuenta que, alrededor del 60% de las áreas urbanas están conformadas por techos y pavimentos, y que los materiales comúnmente utilizados en estas superficies se caracterizan por tener bajos valores de reflectancia solar, la primera categoría es considerada como estrategia principal en la presente investigación.

Figura 4
Estrategias de mitigación y parámetros ambientales en el estudio de la ICU



Nota. Elaborada a partir de Gonzalez-Trevizo et al., 2021.

Los materiales reflejantes o fríos se caracterizan por tener un gran potencial en su aplicación. Se pueden aplicar en edificios nuevos o existentes, para evitar costos adicionales, son financieramente viables y son amigables con el medio ambiente, ya que no generan desechos adicionales, y por lo contrario contribuyen a la reducción de desperdicios ya que prolongan el tiempo de vida útil de las superficies en donde son aplicados (H. Akbari et al., 1992). Los materiales fríos pueden ser categorizados en 7 clasificaciones con base en sus propiedades ópticas y su rango espectral (Morales-Inzunza et al., 2023):

- 1) Materiales de color claro que presentan una alta reflectancia en el espectro VIS (400 nm a 700 nm) conformados por materiales naturales y artificiales
- 2) Materiales con color altamente reflectivos en el espectro infrarrojo (700 nm a 1 mm), a base de pigmentos reflectivos en el espectro IR, compuestos con nanopartículas y con microesferas de vidrio huecas
- 3) Materiales de enfriamiento radiativo diurno, conformados por estructuras fotónicas multicapa, metamateriales de estructura fotónica 2D-3D y recubrimientos a base de pigmentos reflectivos en el espectro IR y compuestos con nanopartículas
- 4) Materiales fluorescentes, basados en el uso de puntos cuánticos, siendo nanomateriales conformados por nano-cristales o compuestos de bulto
- 5) Materiales retrorreflectivos que reflejan la radiación en la misma dirección en la que incide y están conformados por compuestos por esferas de vidrio, esferas de bario y láminas con estructura de prisma
- 6) Materiales termocrómicos, que permiten un cambio en su color a medida que su temperatura aumenta o disminuye, y pueden ser a base de colorantes y componentes altamente reflectantes
- 7) Materiales de cambio de fase, capaces de absorber o liberar calor durante un cambio de estado sólido a líquido o viceversa, subdivididos en materiales orgánicos, inorgánicos y eutécticos

La presente investigación está basada en el desarrollo y caracterización de los materiales fríos dentro de la clasificación 1 y 2 como se muestra en negritas en la Tabla 1, debido a que se

propone el uso de materiales naturales a base de pigmentos reflectivos IR compuestos por nano-partículas.

Tabla 1
Clasificación de materiales fríos

Clasificación	Sub-categorías	Clasificación	Subcategorías
Materiales de color claro (LC)	Materiales naturales Materiales artificiales	Materiales retroreflectivos (RR)	Estructuras de esferas de vidrio Estructuras de esferas de baio Estructuras de prisma A base de colorantes
Materiales con color (CC)	Materiales manufacturados Pigmentos reflectivos IR A base de nano-partículas Microesferas de vidrio huecas	Materiales termocrómicos (TC)	A base de colorantes de leuco A base de nano-partículas Pigmentos reflectivos IR
Materiales de enfriamiento radiativo diurno (DRC)	Estructuras fotónicas multicapa metamateriales de estructura fotónica 2D-3D Pigmentos reflectivos IR A base de nano-partículas	Materiales de cambio de fase (PCM)	Orgánicos Inorgánicos Eutécticos
Materiales fluorescentes (FL)	A base de nano-partículas Compuestos de bulto		

Nota. Elaborada a partir de Morales-Inzunza et al., 2023.

Las características ópticas de los materiales utilizados en edificios determinan el consumo de energía y las condiciones climáticas tanto de los edificios como de los espacios abiertos (Akbari et al., 1992). La ciudad de Ensenada, B.C. cuenta con un clima templado seco mediterráneo con verano cálido, lo cual se correlaciona directamente con el consumo de electricidad (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de Baja California, 2012). Sin embargo, se ha comprobado que al aumentar la reflectancia en las fachadas de un edificio, situado en una localidad mediterránea, se puede alcanzar un ahorro energético de hasta el 25% en la energía consumida para climatización (Yuan et al., 2022). Por lo que la presente investigación explora el uso de nuevos materiales de construcción que presenten propiedades reflectivas de la radiación solar como posible estrategia de mitigación de la ICU a una microescala local.

1.2.3. *Potencial de la incorporación de biomateriales derivados de la producción acuícola*

En la ciudad de Ensenada, B.C. los sectores secundarios y terciarios predominan como generadores de producción. En un análisis, respaldado por los datos publicados en 2004 por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Secretaría de Desarrollo Económico

del estado (SEDECO), se demostró que el sector de la construcción conformó el 10.15% de las participaciones dentro del Producto Interno Bruto Estatal en el año 2004. Por otro lado, la pesca formó parte del 3.63%, ya que es una de las actividades económicas primarias más importantes en la ciudad (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de Baja California, 2012). Por su parte, la acuicultura, se ha convertido en una de las actividades de producción de alimentos de más rápido crecimiento a nivel mundial, ante la demanda de productos marinos. De acuerdo al Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca, en el 2013 la producción acuícola en Baja California superó las 7,000 toneladas en peso vivo, ocupando el lugar 11 en el contexto nacional. En el 2012, en el cultivo de especies de mayor valor comercial, destacó el ostión, representando alrededor del 20% del volumen total de producción estatal acuícola (SEPESCA, 2015). De las 95 empresas pesqueras que existen en el estado, el 62% corresponden al municipio de Ensenada, que a su vez concentra el 6.8% de la producción pesquera nacional. El ostión (*crassostrea gigas*) es el tercer producto pesquero con mayor disponibilidad en el sector terciario de Ensenada (Maldonado, 2017). Por consiguiente, el constante aumento del consumo del ostión, genera un incremento en el desecho de los exoesqueletos del molusco. Por cada kilogramo de ostión consumido mundialmente, entre 370gr-700gr de desperdicio de exoesqueletos son generados. A su vez, el vertido abundante de estos desechos afecta negativamente la calidad de vida de las personas y genera problemas de contaminación ambiental (Mo et al., 2018).

Sin embargo, en recientes estudios, se ha demostrado que, con la incorporación de distintas especies de moluscos en recubrimientos constructivos, como el ostión, puede optimizar la absorción del calor y reducir la conductividad térmica debido al aumento de la porosidad en la mezcla (Mo et al., 2018) (Eziefula et al., 2018). Así mismo, el empleo de dichos exoesqueletos triturados en mezclas permite la elaboración de biomateriales de construcción, con el objetivo no solo de reutilizar y aprovechar dicho subproducto, sino también contribuir a la mitigación del sobrecalentamiento urbano debido a sus propiedades termo-ópticas (Lakshmi et al., 2022).

1.3. Justificación y motivación

De acuerdo con las predicciones, se espera que la población urbana global aumente significativamente en las siguientes décadas y con ello la urbanización, el consumo de diversos recursos y la concentración de GEI, impactando negativamente en la salud humana. Por su parte, según las proyecciones de la Red Mexicana de Modelación Climática, México es

ecológicamente vulnerable al cambio climático. Se estima que el país sea propenso a aumentos de temperatura superiores a la media mundial. En México, en la década anterior, se registró un incremento en el número de fenómenos relacionados al cambio climático, como ciclones tropicales, inundaciones, olas de calor, sequías y lluvias torrenciales, por mencionar algunos. Como resultado ha habido pérdidas humanas y altos costos tanto económicos como sociales. Los daños económicos causados por dichos fenómenos han superado una media de 700 millones de pesos anuales en los años ochenta y noventa a más de 21,000 millones en la última década (Federal Government of Mexico, 2013) (Wei et al., 2017). Por lo que es indispensable una reestructuración en la política nacional y estatal, con el objetivo de mitigar dichos efectos.

Debido a lo anterior, México es un país comprometido para hacer frente al cambio climático, demostrado por sus acciones de mitigación en los últimos años, apoyadas con recursos nacionales. En el 2009, el país presentó 5 Comunicaciones Nacionales con sus respectivos inventarios de GEI ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés). Con ello, se anunciaron sus principales objetivos para reducir sus emisiones de GEI con la intención de disminuirlas a un 25% para el 2030. En el ámbito internacional, México se ha sumado voluntariamente a lograr un acuerdo jurídico con todas las partes involucradas para mantener la temperatura media atmosférica mundial por debajo de 2 °C. En el 2012, el Congreso Mexicano aprobó la Ley General de Cambio Climático (LGCC), convirtiendo a México en el primer país en desarrollo en contar con una ley integral en esta materia. Por su parte, la Contribución Prevista Determinada a Nivel Nacional (INDC, por sus siglas en inglés) de México, se conforma de dos componentes, uno para la mitigación y otro relacionado con la adaptación. Con respecto a la mitigación, esta comprende dos tipos de medidas: incondicionales y condicionales. Las medidas incondicionales están previstas para que el país implemente con sus propios recursos, mientras que las condicionales implican que México desarrolle un nuevo régimen climático multilateral a través de recursos adicionales y de transferencia de tecnología por medio de la cooperación internacional. Con esto, la INDC es consistente con el objetivo de México de reducir 50% las emisiones para el 2050, con respecto al año 2000, como lo dicta la LGCC (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Mexico, 2015).

Dentro de las estrategias para reducir la emisión de GEI en México, se encuentra el Plan Nacional de Desarrollo, con el propósito de promover la eficiencia y tecnologías limpias para

la generación de energía. Con ello, se pretende impulsar el uso eficiente de energía en el sector habitacional, industrial y agrícola, considerando los estándares internacionales de emisiones (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de Baja California, 2012). Así mismo, el Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático del CONAHCYT (2022), promueve la generación de energía a través de procesos productivos locales con base en el uso de fuentes renovables. Con ello se propone contribuir a lograr una mayor distribución segura e independiente de energías en México para mitigar los efectos del cambio climático.

Debido a que el sector energético es uno de los más propensos al incremento de GEI, diversos esfuerzos se basan en la aplicación de medidas de mitigación dentro del mismo. Se estima que, al no implementar medidas de mitigación, habrá un incremento significativo de gases en la atmósfera. Por consiguiente, dicho incremento presentará afectaciones en el medio ambiente de manera directa e indirecta. El efecto directo será el aumento de la temperatura ambiental promedio, mientras que indirectamente se presentará un cambio en los ciclos naturales como un aumento del nivel del mar, cambios en las características del suelo y de la biomasa, así como una modificación en los patrones de fenómenos naturales (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de Baja California, 2012).

A pesar de los esfuerzos que México ha implementado en su agenda sobre el cambio climático, a finales de la década antepasada, se determinó que son indispensables los planes estatales de acción. Para ello, es necesario implementar un plan de desarrollo regional, teniendo en cuenta las características económicas, sociales, geográficas y ambientales de cada región del país, con la participación de los actores locales y aquellos responsables políticos. Dentro de los principales logros en las estrategias, se encuentra el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (PEACC). En el 2012, de los 32 estados de México, 29 se sumaron a dicho programa, dentro de los cuales se encuentra Baja California, siendo una de las fronteras con más impacto económico en México, en el Norte de América y en el mundo. Para que la estrategia climática alcance su objetivo a pesar de los cambios administrativos, es necesario poner mayor énfasis en las medidas rentables, que crearan los incentivos necesarios para los gobiernos estatales y locales (Wei et al., 2017).

A escala local, de acuerdo al Programa de Desarrollo Urbano de Ensenada 2007-2030, se establecieron factores críticos en la ciudad de acuerdo con su crecimiento espacial y

poblacional. Entre ellos, se encuentra la urbanización de la reserva territorial, que se requiere para el crecimiento habitacional, disminuyendo el índice de cobertura vegetal, lo cual reduce la calidad de vida de los ciudadanos. Ensenada se ha convertido en una ciudad de gran relevancia regional, lo que representa grandes cambios en la mancha urbana y al mismo tiempo a su entorno ambiental inmediato (Padilla & Muñoz, 2012). Por lo que existe una gran oportunidad de adecuar el planeamiento urbano, implementando estrategias de mitigación climáticas a una microescala en las futuras edificaciones, considerando la inevitable urbanización de los suelos.

Así mismo, los recientes estudios a escala internacional, afirman que, para disminuir el consumo energético en edificios, es necesario implementar materiales innovadores en la envolvente arquitectónica, que presenten propiedades con una alta capacidad de reflectancia solar y un alto aislamiento térmico. También, se menciona que dichas estrategias presentan grandes beneficios energéticos específicamente en zonas mediterráneas (Pedroso et al., 2020; Zinzi et al., 2021). Tomando en cuenta que, dichas condiciones climáticas se presentan en la ciudad de Ensenada, y que principalmente, se requiere a su vez, una implementación urgente de estrategias ambientales dentro de su plan de desarrollo urbano, es necesario la aplicación y regularización de dichos materiales innovadores. Por su parte, dentro de la ciudad de Ensenada, es requerido de igual forma, disminuir la alta cantidad de residuos generados por el sector terciario, debido al acelerado consumo y reproducción de moluscos.

Con respecto a lo anterior, la reutilización de este subproducto como componente primario en la elaboración de biomateriales dentro del sector de la construcción, reduciría la contaminación ambiental, y especialmente, contribuiría a la disminución del consumo energético en edificios debido a sus propiedades termodinámicas. Con ello, el municipio sumaría los esfuerzos para alcanzar los objetivos de las políticas regionales y nacionales para la reducción del consumo energético en edificios, la disminución de emisiones de GEI, y finalmente, la mitigación de los efectos del fenómeno ICU dentro cambio climático.

1.4. Antecedentes

1.4.1. Investigaciones precursoras de la isla de calor urbano

El origen de la climatología urbana, donde se tuvo la primera evidencia de la diferencia de temperatura entre el centro de la ciudad y los alrededores naturales próximos, surge debido

a los estudios desarrollados por el meteorólogo Luke Howard en el año de 1818, con las observaciones climáticas de Londres. El término de “Isla de calor”, se le reconoce al climatólogo Gordon Manley en 1958, donde tenía como objetivo explicar el comportamiento de la nieve en la ciudad de Londres. Con ello fue que se definió como el incremento térmico en las ciudades comparado con las zonas periféricas debido a la urbanización (Martínez, 2021). Por su parte, en 1981 Landsberg define explícitamente las acciones antropogénicas en las islas de calor, describiendo que el incremento de la concentración GEI en la atmósfera, aumenta la temperatura urbana y la duración de los fenómenos climáticos atípicos. Así mismo describe que la diversidad e irregularidad de las superficies urbanas representan el principal obstáculo para lograr un balance térmico, determinado por una alta capacidad de absorción y retención del calor (albedo), emisividad y capacidad calorífica de los materiales (Landsberg, 1981). Sin embargo, la definición de “Isla de calor urbana” se le atribuye al climatólogo Timothy Oke en 1982, donde describe que las diferentes características de la urbanización implican una alteración en el balance energético, el cual representa un incremento en la temperatura urbana comparada con la rural, dando como resultado el efecto de la ICU (Oke, 1982).

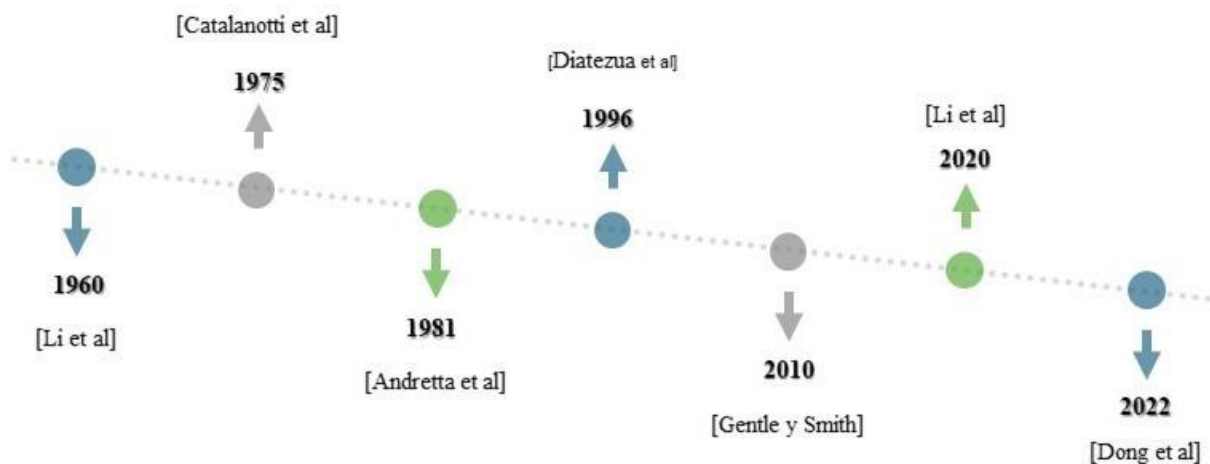
1.4.2. Avance científico en el estudio de enfriamiento radiativo en materiales fríos

El uso del enfriamiento radiativo pasivo data desde hace algunas décadas, donde los estudios científicos dieron comienzo desde 1960 (Li et al., 2020). En 1975 Catalanotti et al., realizaron una superficie selectiva con propiedades ópticas ajustadas a la ventana atmosférica (8 μ m-13 μ m), en donde se consideró mayormente eficaz para el enfriamiento en exposición directa al sol. Por su parte Andretta et al., en 1981 estudian la forma de proteger las superficies radiantes utilizando mantas selectivas, que limitan la radiación solar sin impedir la interacción infrarroja con el espacio frío. Con ello, desarrollaron algunas láminas de plástico y describieron las propiedades ópticas para lograr una refrigeración radiativa. Otro estudio a consideración es el de Diatezua et al., (1996), en donde utilizan el oxinitruro de silicio debido a sus propiedades ópticas y potencial como material de enfriamiento radiativo. Así mismo, mencionan que las configuraciones multicapa son una forma muy prometedora de mejorar el rendimiento de los dispositivos. Con ello, se logró disminuir los parámetros de enfriamiento radiativo a partir de mediciones en el espectro infrarrojo. Tomando en cuenta a Gentle y Smith (2010), se analizó que las nanopartículas que tienen bandas de absorción estrechas dentro de la ventana atmosférica

pueden utilizarse para enfriar radiativamente a temperaturas muy inferiores al ambiente. Como resultado se realizó una mezcla de nanopartículas de SiC y SiO₂ para producir una refrigeración de alto rendimiento de bajo costo dentro de un equipo de refrigeración práctico. Por otro lado, de acuerdo con el estudio actual de Li et al. (2020), se demostró que se puede lograr una refrigeración radiativa sub-ambiental diurna completa en una pintura acrílica utilizando una concentración del 60% de partículas de carbonato de calcio (CaCO₃) y una amplia distribución de tamaños. Con ello, se consiguió una reflectancia solar del 95.5% y una alta emisividad de 0.94 en la ventana atmosférica. De igual forma, de acuerdo con Dong et al. (2022), se identificó que la presencia del CaCO₃ en un recubrimiento, mostró que los diferentes tamaños de sus partículas tienen diferentes longitudes de onda óptimas, por lo tanto, la reflexión solar se mejora.

En la Figura 5 se presenta la línea de tiempo correspondiente al avance científico destacado en el estudio de enfriamiento radiativo en materiales fríos de acuerdo con las publicaciones realizadas.

Figura 5
Investigaciones en el estudio de enfriamiento radiativo en materiales fríos



1.4.3. Incorporación de carbonato de calcio en materiales y recubrimientos de construcción

El CaCO₃ es un compuesto inorgánico común en la tierra, ya que se encuentra en algunas rocas y es el principal componente de algunas conchas de animales. En el caso de México, desde la época prehispánica las piedras calizas o las conchas marinas eran calcinadas en fogones de diferentes tamaños y capacidades, pero no todos conseguían una forma hermética, por lo que no siempre se lograba que toda la materia recibiera la misma cantidad de calor. Debido a estos

algunos sitios prehispánicos, en donde se emplearon estos materiales, cumplen la función aglutinante debidamente, mientras que otros, donde solo estuvieron parcialmente calcinados, mantuvieron poca adherencia (Roux, 2010). El CaCO_3 es un compuesto inorgánico común en la tierra, ya que se encuentra en algunas rocas y es el principal componente de algunos exoesqueletos de moluscos (Dong et al., 2022).

Por su parte, Lertwattanakul, Makul y Siripattaraprat (2012), utilizaron 4 especies de moluscos, concha de mejillón verde, almeja de cuello corto, concha de berberecho y ostión, para la producción de un mortero, en donde se utilizaron para remplazar el cemento Portland parcialmente entre el 5% al 20%. Con la sustitución del 20% de las conchas marinas en el cemento Portland, se logró la menor disminución de la conductividad térmica del recubrimiento a 0.8 W/m-K. En el 2018, Eziefula, Ezech y Eziefula afirmaron que debido a que la gran mayoría de los exoesqueletos de moluscos contienen entre un 95%-97%, pueden ser empleados como un material inerte similar a la piedra caliza. Otro estudio a tomar en cuenta es el de Hossain y Roy (2019), donde evaluaron la viabilidad del uso de conchas marinas y cenizas volátiles, en porción de peso 1:1, para la fabricación de una placa de cerámica sustentable. Los exoesqueletos de moluscos se calcinaron a 1100°C para aumentar el contenido óxido de calcio. Con ello se logró disminuir la densidad y la conductividad térmica del material.

1.5. Contextualización del objeto de estudio

Diversas actividades humanas que implican el cambio de uso de suelo y la destrucción de millones de hectáreas forestales han causado un incremento en las GEI en la atmosfera, siendo la principal causante del calentamiento global (Nejat et al., 2015; Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno de Baja California, 2012). Así mismo, la falta de cobertura vegetal, las propiedades termofísicas de los materiales urbanos utilizados y las altas densidades urbanas, repercuten significativamente en la temperatura de las ciudades (Tsoka et al., 2018).

El incremento de la temperatura urbana tiene un serio impacto en la calidad de las ciudades, afectando las condiciones de salud y aumentando la morbilidad y mortalidad (Santamouris & Kolokotsa, 2016). Así bien, la contaminación atmosférica, en general, puede implicar diversas repercusiones adversas en el sistema respiratorio, en el nervioso central, en el circulatorio y en el urinario, principalmente (Aghamohammadi & Santamouris, 2022; Schraufnagel et al., 2019).

Por su parte, el aumento de la temperatura en el medio ambiente, ocasionado por el cambio climático y la ICU, ha incrementado la carga de enfriamiento activo en edificios durante los últimos 40-50 años en un 23%. Y como consecuente, el aumento de equipos de aire acondicionado genera más calor y tiene un efecto significativo en el clima exterior en una escala local, con implicaciones en el confort humano y la demanda de enfriamiento. Mientras que en una escala mayor, se generan GEI por el aumento de la generación de electricidad (Santamouris & Kolokotsa, 2016).

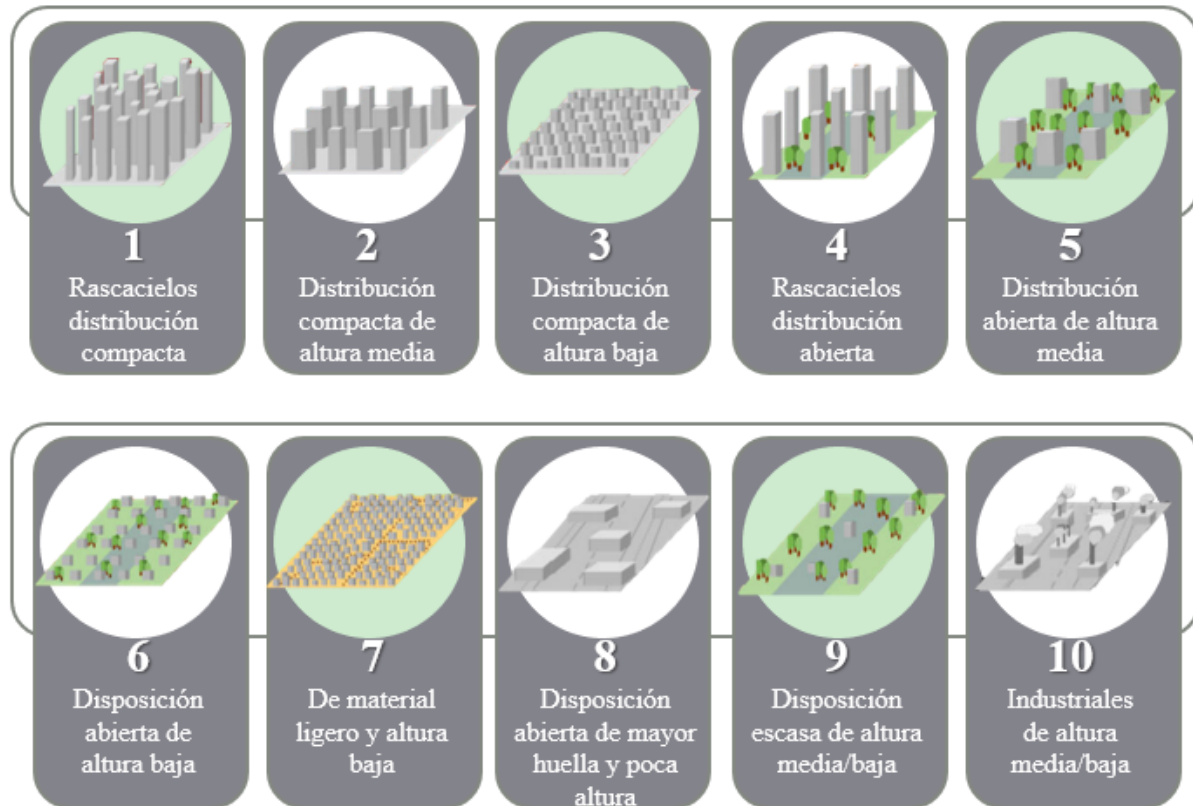
Debido a lo anterior, para lograr la mitigación de estos fenómenos climáticos es fundamental centrarse en el desarrollo urbano, ya que las ciudades generan el 70% de las emisiones mundiales de CO₂ con relación a la energía. Sin embargo, a pesar de las políticas públicas para lograr la mitigación de la ICU y el cambio climático, los parámetros urbanos existentes limitan el conocimiento necesario para la gestión de estrategias acertadas. Generalmente se desconoce de las ciudades la extensión, los materiales con los que se construyen y la ocupación. Pero principalmente, es necesario contar con datos climáticos-urbanos con relación a la cobertura, escala y contenido, para así respaldar la evaluación de riesgos y su gestión, y con ello, permitir una migración de conocimientos eficaces entre ciudades. Por lo que, partiendo de esta premisa, los investigadores T.R. Oke e I.D. Stewart en el 2012, proponen una gama más amplia de clases intraurbanas con información suficiente que describe los diferentes tipos de cubiertas y usos del suelo urbano: la tipología de Zonas Climáticas Locales (LCZ³).

Las LCZ hacen referencia a un sistema de clasificación de 17 clases, en las cuales 10 describen aspectos urbanos como se muestra en la Figura 6. Dicho sistema permite un intercambio estandarizado de observaciones de temperatura urbana para los estudios de la ICU. Las LCZ están definidas como regiones de cobertura superficial, estructura, material y actividades antropogénicas medidas desde cientos de metros hasta varios kilómetros en escala horizontal, sin considerar aspectos específicos de una cultura o región. Se caracterizan por contar con un régimen de temperatura con relación a la altura aparente en superficies secas, en

³ Local Climate Zone, por sus siglas en inglés

noches calmadas o despejadas. Así mismo, provee una plataforma común para el intercambio de conocimiento y descripción de los parámetros de cañones urbanos en los procesos de ecosistemas urbanos, especialmente para ciudades con pocos o insuficientes datos de infraestructura (Demuzere et al., 2021).

Figura 6
Clasificaciones de Local Climate Zones



Nota. Elaborada a partir de Demuzere et al., 2021.

Los materiales utilizados en las envolventes de los edificios y en las estructuras urbanas absorben la radiación incidente infrarroja y disipan un porcentaje del calor acumulado a través de la convección y un proceso radiativo hacia la atmósfera, incrementando la temperatura del ambiente. El balance térmico de las ciudades es enormemente afectado por el incremento de la absorción de la radiación solar, que corresponde al incremento del calor sensible por las estructuras urbanas, un alto calor antropogénico, la reducción del calor latente y las altas emisiones de la radiación infrarroja (Landsberg, 1981). Debido a estos fenómenos, las características termodinámicas de los materiales empleados en las superficies urbanas, están

estrechamente relacionadas con el confort térmico interior y exterior de las ciudades (Santamouris & Yun, 2020).

Actualmente la aplicación de materiales con superficies altamente reflejantes, se ha implementado como una estrategia para el ahorro de energía en edificios. Estos materiales fríos reflejan en gran medida la radiación solar incidente de la superficie en comparación de otros materiales, y debido a ello es que se ha implementado como una de las principales estrategias de mitigación de la ICU (Yuan et al., 2022). Los materiales fríos se pueden clasificar en 7 grandes grupos: 1) materiales de color calor (LC), 2) materiales con color (CC), 3) materiales de enfriamiento radiativo diurno (DRC), 4) materiales fluorescentes (FL), 5) materiales retrorreflectivos (RR), 6) materiales termocrómicos (TC) y 7) materiales de cambio de fase (PCM) (Morales-Inzunza et al., 2023).

Dentro de la presente investigación se propone el uso de materiales naturales (carbonato de calcio) a partir de un subproducto del sector terciario local (*crassostrea gigas*). El carbonato de calcio es un compuesto inorgánico de apariencia blanca por naturaleza, el cual se plantea utilizar como compuesto base para la síntesis de pigmentos inorgánicos reflectivos en la elaboración de recubrimientos fríos. Debido a ello, los recubrimientos fríos propuestos se encuentran dentro de los grupos: 1) materiales fríos de color calor (LC) y 2) materiales con color (CC) (Figura 7).

Figura 7

Clasificación de materiales fríos y subcategorías



Nota. Obtenida de “On the potential of cool materials in the urban heat island context: Scalability challenges and technological setbacks towards building decarbonization” por Morales-Inzunza et al., 2023.

1.6. Pregunta de investigación e hipótesis

Considerando lo anterior descrito, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo se puede incrementar experimentalmente la reflectancia solar de recubrimientos fríos diseñados a partir de la síntesis y dopaje de pigmentos inorgánicos con una matriz de carbonato de calcio bio-renovable de bajo costo para el enfriamiento radiativo de superficies urbanas?

Dando respuesta a la pregunta planteada anteriormente, se sugiera la siguiente hipótesis de investigación:

*A través de procesos químico térmicos de calcinación, es posible manipular la estructura cristalográfica del carbonato de calcio bio-renovable extraído de exoesqueletos del ostión (*crassostrea gigas*), lo que permite la incorporación de impurezas a partir de su dopaje*

con reactivos inorgánicos de baja absorbancia espectral, aumentando así sus propiedades de reflectancia solar y emitancia térmica.

1.7. Objetivos de la investigación

1.7.1. Objetivo general

En el objetivo general de la presente investigación se considera lo siguiente:

*Diseñar y caracterizar recubrimientos fríos por medio de la síntesis de pigmentos inorgánicos, a base de carbonato de calcio bio-renovable, extraído de los exoesqueletos del ostión (*crassostrea gigas*), a partir de la manipulación de la estructura cristalográfica y la incorporación de impurezas, derivado de la caracterización de reactivos inorgánicos preseleccionados de un estudio comparativo, con propiedades ópticas altamente reflectivas en los espectros visible e infrarrojo, que permitan la reducción de cargas térmicas en cubiertas.*

1.7.2. Objetivos específicos

En los objetivos específicos se propone lo siguiente:

- Procesar el carbonato de calcio bio-renovable a partir del tratamiento y la manipulación de la microestructura de los exoesqueletos de ostión (*crassostrea gigas*) y caracterizar la estructura cristalográfica
- Caracterizar las propiedades termo-ópticas de los reactivos inorgánicos derivados de la preselección de un estudio comparativo con base en la literatura y definir el óptimo para el dopaje del carbonato de calcio bio-renovable
- Sintetizar los pigmentos inorgánicos a base del carbonato de calcio bio-renovable con base en el diseño del método propuesto e incrementar la reflectancia de estos a partir del dopaje
- Elaborar las muestras prototipo de los recubrimientos fríos mediante el uso de los pigmentos inorgánicos y caracterizar la reflectancia espectral de los mismos por medio de la espectrofotometría UV-VIS- NIR

1.8. Alcances y limitaciones

1.8.1. Alcance

El alcance de la presente investigación se basa en el diseño, elaboración y caracterización de un material frío compuesto por pigmentos inorgánicos a base de carbonato de calcio bio-renovable extraído de exoesqueletos de moluscos desechados por el sector terciario, como estrategia de mitigación y adaptación para la disminución de cargas térmicas en la vivienda vulnerable de México.

1.8.2. Limitaciones

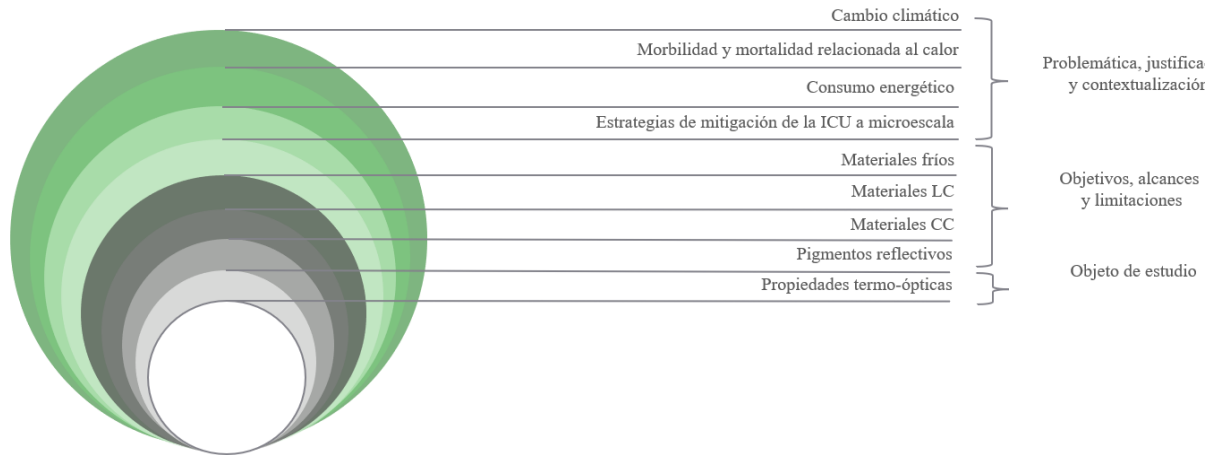
Las limitaciones identificadas en la presente investigación se centran principalmente en la disponibilidad de equipos que permiten el uso de técnicas de espectrofotometría, para la medición de la reflectancia espectral de recubrimientos. El equipo utilizado para dichas técnicas es llamado espectrofotómetro, el cual contienen una esfera de integración que permite el análisis de espectrofotometría en un cierto rango espectral. El espectrofotómetro disponible para el estudio contiene una esfera de integración que abarca un rango de 300 nm a 900 nm, de los cuales solo permitió analizar el rango de 360 nm a 800 nm, debido a las características y el funcionamiento del equipo. Considerando que el rango de interés para el presente estudio es dentro del infrarrojo cercano, el cual comienza a partir de los 750 nm, solamente fue posible analizar 50 nm de este espectro, limitando el análisis de la reflectancia solar de los recubrimientos desarrollados.

A manera de conclusión de las secciones descritas anteriormente, se resumen a través de un diagrama de cebolla en la Figura 8, en donde se integra el objeto de estudio con relación al planteamiento del problema; a partir de una perspectiva deductiva, el presente estudio se encuentra dentro de la problemática general del cambio climático, el cual tiene el propósito de mitigar los efectos del fenómeno de la ICU y su impacto en la morbilidad y mortalidad relacionada al calor y al consumo energético en edificios; la investigación desarrollada busca la implementación de las estrategias de mitigación a microescala, específicamente el empleo de los materiales fríos; los diversos tipos de materiales fríos existentes, contiene pigmentos reflectivos en los espectros VIS e IR, por lo que el objetivo de la investigación es evaluar el

desempeño de estos, y para ello es necesario analizar las propiedades termo-ópticas de estos materiales, por lo que estas propiedades son el objeto de estudio.

Figura 8

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



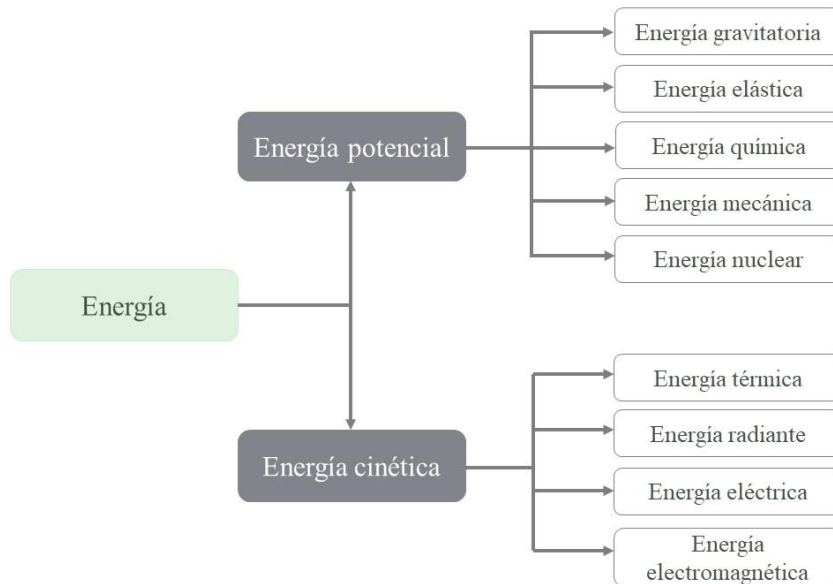
Nota. Elaborada a partir de Morales (2023).

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

2.1. Marco Conceptual

Tomando en cuenta la revisión del estado del arte, se identificaron los conceptos primordiales para el desarrollo del estudio, los cuales están relacionados con la energía. La ciencia encargada del estudio de la energía es la termodinámica, lo cual define aspectos relacionados con el calor y la fuerza. La energía puede ser interpretada como la capacidad para realizar un trabajo y para ejercer cambios (Boles, 2005). La energía se manifiesta de diferentes formas de acuerdo con las acciones y los cambios que puede generar (Lux & Cifuentes, 2015). Existen diferentes tipos de energía los cuales se pueden catalogar en dos clasificaciones: energía potencial y energía cinética (EIA, 2021). La energía potencial hace referencia a una posición determinada que ocupa una masa en el espacio y dentro de esta categoría se encuentra la energía gravitatoria, elástica, química, mecánica y nuclear. Por su parte, la energía cinética es aquella que tienen los cuerpos al estar en movimiento y dentro del grupo se encuentra la energía térmica, radiante, eléctrica y electromagnética Figura 9 (Hervás, 2017; Lux & Cifuentes, 2015). Considerando lo anterior, el marco conceptual de la presente investigación se centra en los siguientes tipos de energía: *energía térmica, radiante y electromagnética*.

Figura 9
Clasificaciones de la energía



2.1.1. Energía térmica

La energía térmica se genera debido al movimiento de las partículas que conforman la materia, lo que significa que cuanto más rápido sea el movimiento, mayor será su energía térmica (Hervás, 2017). Este tipo de energía también puede ser entendido como el “flujo de calor”. A los depósitos de energía térmica se les conoce como “depósitos de calor” debido a que proveen o absorben energía en forma de calor (Boles, 2005).

El inglés James P. Joule en 1843 aborda la teoría sobre la transferencia del calor. Afirma que se da por medio de 3 mecanismos: conducción, convección y radiación. Así mismo, basándose en gran medida en sus experimentos, se reconoce como principio fundamental, la primera ley de la termodinámica. Dicho principio hace referencia a la conservación de la energía total. El incremento en la energía total es igual a la cantidad de transferencia de calor. El calor específico se define como la cantidad de energía requerida para incrementar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia específica y esto dependerá de cómo se ejecute el proceso (Boles, 2005).

2.1.2. Propiedades térmicas de los materiales

Cuando la radiación solar incide sobre una superficie, parte de esta es reflejada y otra es absorbida por la misma, contribuyendo a su calentamiento. El intercambio de energía ocurre entre estas dos superficies cuando una es más caliente que la otra y cuando están de frente (Santamouris & Kolokotsa, 2016). Debido a esto, el desempeño térmico de un material dependerá del tipo de recubrimiento, el grosor, la textura y la durabilidad del mismo al ser expuesto a las condiciones climáticas (Arunraj et al., 2021). Las principales propiedades térmicas de un material son: la conductividad térmica, el calor específico y la densidad de masa (Lira, 2018). Así mismo, existen otras capacidades del material como la resistencia y difusividad térmica (Tabla 2).

Tabla 2
Propiedades térmicas y físicas de los materiales

Propiedad	Simbología	Unidad	Definición
Conductividad térmica	λ	$\frac{W}{(m * K)}$	Propiedad física del material que define la magnitud del flujo de calor entre la superficie de un cuerpo con un espesor de 1m cuando hay una diferencia de un grado (1 °C, 1 K o 1 °F) entre las dos caras del material ¹

Calor específico	c	(J/kg·K)	Propiedad física que mide la cantidad de energía térmica que una unidad de masa necesita para elevar un grado su temperatura ¹
Resistencia térmica	R	(m ² ·K/W)	Es una medida de la capacidad de un material para resistir la transferencia de calor. Se define como la relación entre la diferencia de temperatura a través de un material y la tasa de flujo de calor (potencia térmica) que pasa a través de él.

Nota. Elaborado a partir de Lira, 2018¹.

²Elaborado a partir de Holman, 1999.

2.1.3. Mecanismos de transferencia de calor

El calor es entendido como la transferencia de energía térmica desde un cuerpo de una mayor temperatura a otro de menor temperatura hasta que se logre el equilibrio térmico. Debido a esto, no es posible que el calor se pueda “almacenar” en los cuerpos, ya que siempre está en constante movimiento. El calor es la forma de denominar a los aumentos y pérdidas de energía térmica (Hervás, 2017). De esta manera, el calor se puede propagar de cuatro formas:

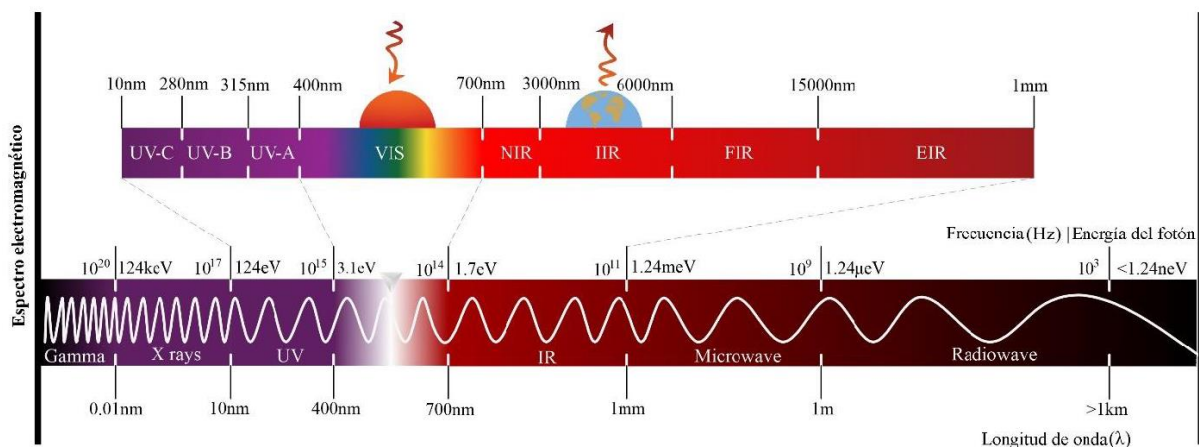
- **Conducción:** Transferencia de calor generado entre dos cuerpos por contacto directo entre sus partículas, cuando existe una diferencia de temperatura entre ambos. No se puede impedir la transferencia de calor entre materiales pero se puede retrasar la velocidad en que se produce (Hervás, 2017). La cantidad de calor propagada depende de las propiedades térmicas, del volumen y del área de la superficie de los materiales (Lira, 2018).
- **Convección:** Transferencia de calor propagado por el movimiento de moléculas, generalmente en fluidos (líquidos o gases) a distinta temperatura. La cantidad de calor transferido depende de la densidad del fluido y del área de las aperturas (Hervás, 2017; Lira, 2018).
- **Radiación:** Transferencia de calor mediante ondas electromagnéticas (principalmente las infrarrojas), que pueden propagarse en el vacío. El calor es propagado principalmente por el Sol. La cantidad de calor transferida está influida por las propiedades ópticas de los materiales transparentes y de la geometría y área de estos materiales o aperturas (Hervás, 2017; Lira, 2018).

- Cambio de fase: Transferencia de calor de un cuerpo a otro cuando hay un cambio de fase y hay liberación de calor latente, él cual se transfiere a otro cuerpo o material (Lira, 2018).

2.1.4. Energía radiante

La radiación es la energía que emite la materia en la forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas (Boles, 2005). Las ondas electromagnéticas son un flujo de energía intercambiado entre el campo eléctrico y el campo magnético, el cual es propagado por el espacio. La velocidad a la que se propagan dichas ondas en el vacío es igual a la velocidad de la luz en el vacío. Así mismo, el espectro electromagnético se puede entender un número de rangos de frecuencias posibles de las ondas electromagnéticas. La radiación electromagnética se conforma por distintos rangos de frecuencias o longitudes: radio (10cm-10m), infrarrojo (1mm-700nm), visible (700nm-400nm), ultravioleta (400nm-10nm), rayos x (10nm-0.01nm) y rayos gama (<10m–11m), así como se muestra en la Figura 10 (Mu, n.d.)

Figura 10
Espectro de la radiación electromagnética



Nota. Obtenida de Morales (2023).

La luz está conformada por fotones que presentan un comportamiento como partículas, las cuales viajan a la velocidad de la luz, en donde su energía depende de su frecuencia. Los fotones son una partícula que transmite la fuerza electromagnética entre las partículas que

contienen cargas eléctricas. De este modo, los fotones son absorbidos y emitidos por dichas partículas cargadas. Tanto los átomos como las moléculas y materiales, interactúan con la radiación electromagnética (o fotones) y dependiendo de la frecuencia se pueden llegar a presentar distintos procesos en donde los núcleos, los electrones o los átomos absorben los fotones y con ello se presenta una transición cuantizada desde un estado de excitación; estos estados están relacionados con un cierto nivel de energía, siendo necesaria una correspondencia entre la energía de los fotones y la diferencia de energía entre ambos estados correspondientes en el proceso (Fontal, 2005). Los diferentes rangos del espectro electromagnético, la longitud de onda, la frecuencia y la energía del fotón vienen descritos en la Tabla 3.

Tabla 3
Regiones del espectro electromagnético

Región	Longitud de onda	Frecuencia (Hz)	Energía del fotón
Rayos gamma	<0.01 nm	$10^{22} - 10^{19}$	10^{10}
Rayos X	0.01 nm-10 nm	$10^{17} - 10^{20}$	10^5
Ultravioleta	10 nm-400 nm	$10^{15} - 10^{17}$	10^3
Visible	400 nm-700 nm	$10^{14} - 10^{15}$	1
Infrarrojo	700 nm-1 mm	$10^{11} - 10^{14}$	10_{-3}
Microondas	1 mm-1 m	$10^9 - 10^{11}$	10_{-5}
Ondas de radio	10cm-10m	$10^3 - 10^9$	10_{-10}

Nota. Elaborada a partir de Fontal (2015).

2.1.5. Radiación visible

El espectro visible se conforma por una pequeña porción dentro del espectro electromagnético (400nm-700nm), es una energía que al estimular el ojo humano genera la sensación de visión, dependiendo de la sensibilidad o percepción de cada individuo. Las ondas electromagnéticas dentro del espectro visible son captadas por el globo ocular. Cada banda del espectro visible produce la percepción de un color distinto, en donde la división entre colores se manifiesta como una transición gradual de uno al otro (Fontal, 2005). La Tabla 4 presenta los rangos de longitud de onda con respecto a cada color.

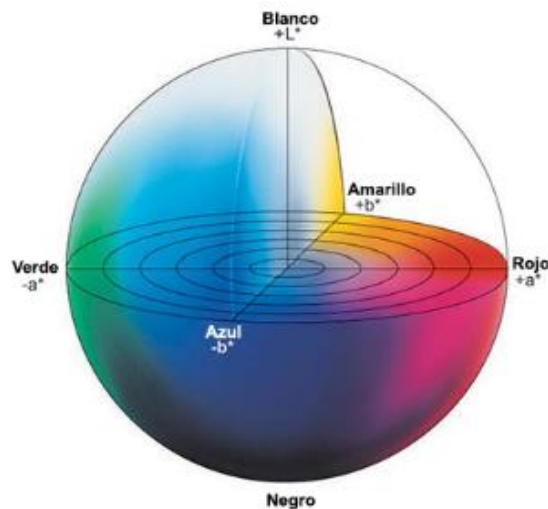
Tabla 4
Longitud de onda con respecto al color

Longitud de onda	Color	Longitud de onda	Color
Rojo	630nm-760nm	Azul	440nm-490nm
Naranja	590nm-630nm	Índigo	420nm-440nm
Amarillo	560nm-590nm	Violeta	380nm-420nm
Verde	490nm-560nm		

Nota. Elaborada a partir de Fontal (2015).

Considerando que el color es una propiedad dentro del espectro electromagnético que puede medirse por su longitud de onda en términos de energía radiante, existe un estándar internacional para su medición conocido como el espacio de color CIELAB (o 1976 L*a*b*). Es un estándar adoptado por la comisión internacional de la iluminación (CIE⁴) en 1976, en donde se definieron espacios de color, considerando CIE XYZ, CIE L*C*h, y CIE L*a*b*, para identificar el color de manera objetiva. Dicho sistema transforma el espectro de reflexión o transmisión de una superficie en un espacio de color tridimensional por medio de la distribución de potencia espectral de la superficie iluminada y las funciones de coincidencia de color de los observadores estándar (Figura 11). El sistema CIE determina un color por medio de tres parámetros tridimensionales: L*, a* y b*. El primer parámetro expresa la luminosidad de transparencia o blanco a negro como el eje vertical, el a* hace referencia a la variación de verde a rojo como el eje x y b* representa de amarillo a azul como el eje z (Carballo-Reyes et al., 2022).

Figura 11
Espacio de color CIELAB, gráfico tridimensional de coordenadas



Nota. Obtenida de Konica Minolta Sensing Americas, Inc. (2023).

⁴ *Commission Internationale d'Eclairage*

El espacio de color $L^*a^*b^*$ actualmente es uno de los espacios más populares por su uniformidad para evaluar el color de una superficie. Se trata de una teoría de color oponente en donde se determina que dos colores no pueden ser rojo y verde o amarillo y azul en el mismo momento. La diferencia de color es entendida como la comparación numérica de una muestra con el estándar. Estas diferencias en coordenadas absolutas de color se le conocen como Delta (Δ); Deltas por L^* (ΔL^*), a^* (Δa^*) y b^* (Δb^*) pueden ser positivas (+) o negativas (-). Por su parte, la diferencia en Delta E (ΔE^*) siempre es positiva. Dichas diferencias son representadas de la siguiente manera:

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

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

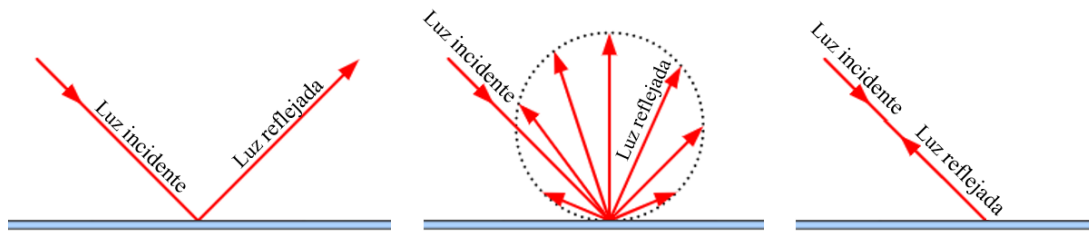
Δb^* = diferencia en amarillo y azul (+ = más amarillo, - = más azul)

ΔE^* = diferencia total de color

2.1.6. *Comportamiento de la luz*

La luz es definida como una porción del espectro electromagnético, la cual está conformada al mismo tiempo por otras radiaciones que no son capaces de ser percibidas por el ojo humano. Cuando la luz visible o alguna otra radiación electromagnética incide en una superficie metálica se genera una reflexión, mientras que, cuando incide en un material transparente o traslucido, sucede una refracción, en donde la luz cambia de dirección dependiendo a su vez del ángulo de incidencia (Fontal, 2005). La reflexión de la luz se ocasiona entre un rayo de luz incidente al llegar a una superficie y un rayo reflejado al salir rebotado después de reflejarse. Así mismo, existen distintos tipos de reflexión. Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie lisa y mantienen la misma dirección, se le conoce como reflexión especular. Mientras que cuando los rayos inciden en superficies irregulares o rugosas, lo que ocasiona que sean reflejados en diferentes direcciones, se le denomina como reflexión difusa (Moreno, 2009). Por otro lado, la retrorreflexión es el fenómeno que ocurre cuando la incidencia de un haz de luz en una superficie se refleja en la misma dirección de su fuente (Rossi et al., 2014). Los diferentes tipos de reflexión de la luz pueden ser observados en Figura 12.

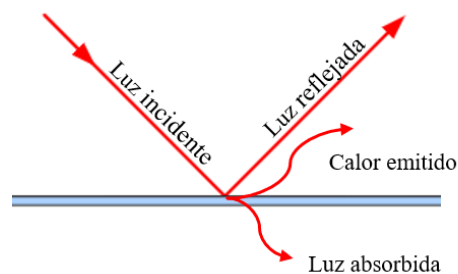
Figura 12
Tipos de reflexión de la luz



Nota. Elaborada a partir de Educaplus (2024).

Otro fenómeno que ocurre cuando la energía del haz de luz convierte en estado de excitación a los átomos o moléculas, es conocido como absorción. La absorción de la luz sucede cuando la energía de la luz que incide en una superficie se transfiere a las moléculas o partículas haciéndolas vibrar, lo que ocasiona que se produzca calor, el cual es emitido desde el material de la superficie como calor (Figura 13) (Aguilera, 2010).

Figura 13
Absorción de la luz



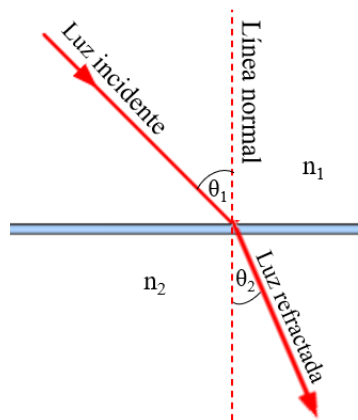
Nota. Elaborada a partir de Morales (2023).

Por otro lado, la refracción de la luz hace referencia en la diferencia de velocidad de la luz en distintos medios. De esta manera, al momento en que un rayo de luz pasa de un material a otro, el mismo presenta un cambio de dirección. Esta característica de la luz está regida por la teoría de Rayleigh, donde se menciona que a mayor índice de refracción, más alta será la reflectancia solar (Moreno, 2009). Dentro del fenómeno de refracción siempre participan los siguientes elementos (Figura 14):

- rayo incidente: rayo de luz que incide en la superficie entre ambos medios
- rayo refractado: rayo que se desvía al traspasar la superficie

- línea normal: línea imaginaria perpendicular a la superficie, que se establece a partir del punto en que ambos rayos coincidan
- ángulo de incidencia: ángulo que se genera entre el rayo incidente y la línea normal, expresado como θ_1
- ángulo de refracción: ángulo que se produce entre el rayo refractado y la línea normal, expresado como θ_2

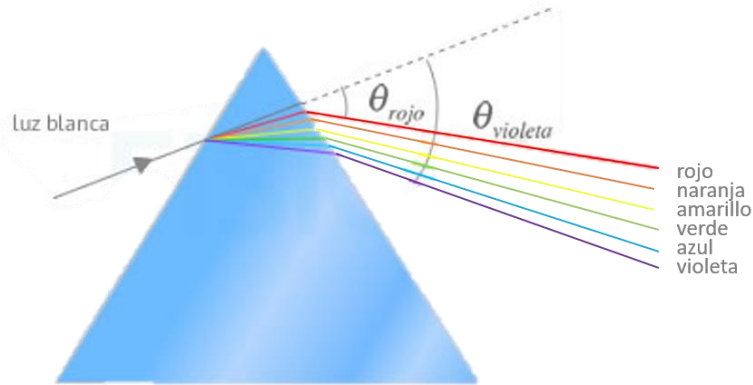
Figura 14
Refracción de la luz



Nota. Elaborada a partir de Significados (2024).

Otra propiedad de la luz es la dispersión. Dicho fenómeno se genera cuando un rayo de luz se refracta en algún material quedando separados los colores que lo constituyen. Un ejemplo muy común de este fenómeno es el Arco Iris. La luz que procede del Sol es conocida como luz blanca, la cual, al llover, se dispersa al incidir sobre las gotas de agua, de esta forma los colores son separados debido a que cada uno de ellos presenta una frecuencia distinta. La dispersión de la luz fue explicada en primera instancia por Newton, por lo cual se le conoce como prisma de Newton (Moreno, 2009). Lo anterior se ejemplifica en la Figura 15.

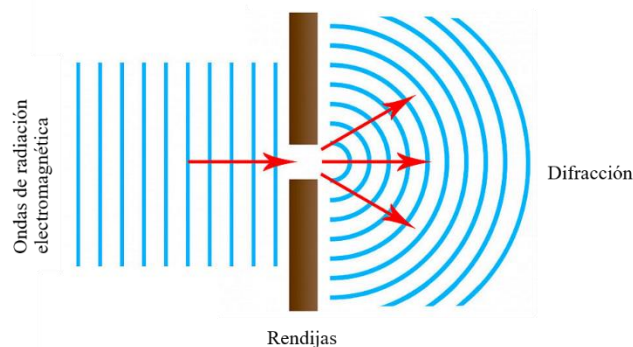
Figura 15
Dispersión de la luz



Nota. Obtenida de Fisicalab (2023).

La difracción es otro fenómeno relacionado con el carácter ondulatorio de la luz que se observa cuando enfrente de las ondas electromagnéticas se presenta un obstáculo como rendija de dimensiones comparables con la respectiva longitud de onda. Al utilizar rendijas rectangulares estrechas a la par de ondas incidentes planas, se genera una distancia amplia, la cual puede relacionarse matemáticamente por medio de la difracción de Fraunhofer, donde el ancho de la rendija corresponde a la longitud de onda con las características del patrón de difracción observado (Figura 16) (Peña & Villamil, 2016).

Figura 16
Difracción de luz



Nota. Elaborada a partir de León (2024) y Morales (2023).

Así como el espectro electromagnético está conformado en gran medida por gran rango de longitudes de onda visibles ante el ojo humano, también se encuentran aquellos que no pueden ser percibidos ante el mismo, denominados espectro ultravioleta e infrarrojo. El último mencionado es el de mayor interés para la presente investigación.

2.1.7. Radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta (UV) es energía radiante invisible dentro de un rango de longitud de onda entre los 100 y 400 nanómetros, clasificada comúnmente en 3 categorías: UV-A (315nm a 400nm), UV-B (280nm a 315nm) y UV-C (10nm a 280nm). Los 3 tipos de radiaciones son emitidos en grandes cantidades por el sol, y a pesar de ser filtrados por la atmósfera, es recomendable protegerse de ellos, ya que ante exposiciones excesivas pueden llegar a producir distintos tipos de daños a la salud humana. Asimismo, entre más corta sea la longitud de onda de la radiación UV, biológicamente causa un daño mayor (Gonzalez et al., 2007).

Los rayos UV-A representan el rango más grande de la radiación ultravioleta que incide sobre la Tierra. Ofrece diversos beneficios como aumento a la inmunidad a ciertas enfermedades, sin embargo, pueden llegar a ocasionar daños profundos en la piel y a provocar un envejecimiento prematuro en la misma. Por su parte, a pesar de que los rayos UV-B inciden en una menor proporción sobre la superficie terrestre, son los de mayor peligro, ya que se filtran parcialmente por la capa de ozono. Esta radiación puede generar enrojecimiento, ampollas e incluso quemaduras de sol de segundo grado. A su vez, también aumenta las posibilidades de un envejecimiento prematuro de la piel a largo plazo. Finalmente, los rayos UV-C en su mayoría son absorbidos por la capa de ozono en la atmósfera, por lo que no alcanzan a entrar a la Tierra. Este tipo de radiación penetra levemente en la piel, pero pueden causar daños a la vista (Gonzalez et al., 2007).

Así como la piel humana puede ser dañada por la radiación ultravioleta, la exposición a materiales conformados por polímeros sintéticos, tales como una amplia variedad de plásticos, fibras sintéticas o recubrimientos, pueden llegar a sufrir ciertos niveles de desgaste. Al ser empleados en exteriores dichos materiales, son degradados por los efectos de la radiación ultravioleta, lo cual puede llegar a implicar una disminución significativa en las propiedades físicas, químicas, térmicas y ópticas. Debido a ello, existen absorbedores de rayos UV y estabilizadores de luz que son añadidos a los materiales para disminuir los efectos de la degradación, y con ello aumentar la resistencia a la intemperie (Everlight Chemical Industrial Corp., 2024).

2.1.8. Radiación infrarroja

La radiación infrarroja fue descubierta por el astrónomo y músico alemán William Herschel. El descubrimiento fue al hacer pasar la radiación a través de un prisma, en donde se observó que la temperatura incrementaba al mover el termómetro del color violeta al color rojo dentro del espectro visible. También, Herschel fue el primero en observar que inclusive la temperatura aumentaba pasando la zona del color rojo. Con ello, fue que se demostró que existían tipos de luz invisibles ante el ojo humano (de Prada Pérez, 2016).

En un principio, Herschel nombró a dicha radiación energía calorífica, a la cual, con el paso del tiempo, se le determinó como radiación infrarroja (infra, significando más allá del rojo). La región de la radiación infrarroja generalmente se divide en cuatro zonas: IR cercano de 700nm a 3000nm ($0.7\mu\text{m}$ - $3\mu\text{m}$), IR intermedio de 3000nm a 6000nm ($3\mu\text{m}$ - $6\mu\text{m}$), IR lejano de 6000nm a 15000nm ($6\mu\text{m}$ - $150\mu\text{m}$) y el IR extremo que va de 15000nm a 1mm ($150\mu\text{m}$ - $1000\mu\text{m}$). Cabe destacar que dicha subdivisión no es de carácter universal, ya que dentro de la literatura hay autores que proponen distintos rangos de zonas. Considerando que el ojo humano presenta una limitante para la percepción de la radiación infrarroja y sus efectos sobre la materia, es necesario el empleo de instrumentos de detección de la misma, como los espectrofotómetros (Mondragon, 2015). A su vez, existen cámaras infrarrojas que permiten observar la distribución de la temperatura de distintas superficie, como se observa en la Figura 17 (Santamouris & Kolokotsa, 2016). Asimismo, mediante la espectroscopia infrarroja por transformadora de Fourier (FT-IR) es posible determinar las estructuras de moléculas con características de absorción de la radiación IR con respecto a su vibración molecular (Manrique & Gutierrez, 2018).

Figura 17
Fotografía de termografía



Nota. Capturada por medio de cámara termográfica FLIR ONE

2.1.9. *Ventana atmosférica*

La atmósfera celeste que se encuentra entre la superficie terrestre y el universo, está compuesta por una mezcla compleja de diversos gases y contaminantes (Zhao et al., 2019). La intensidad de la radiación solar depende en gran medida de las condiciones de la atmósfera, la época del año y el ángulo de incidencia de los rayos de luz sobre la superficie terrestre. Considerando la alta capacidad de absorción del CO₂ y el vapor de agua en la atmósfera, existe una limitación en la cantidad de energía radiativa que penetra en la superficie de la Tierra. La cantidad de incidencia de la radiación solar que alcanza a entrar a la superficie terrestre está relacionada a su vez con la cantidad de polvo y otros tipos de contaminantes atmosféricos (Holman, 1999).

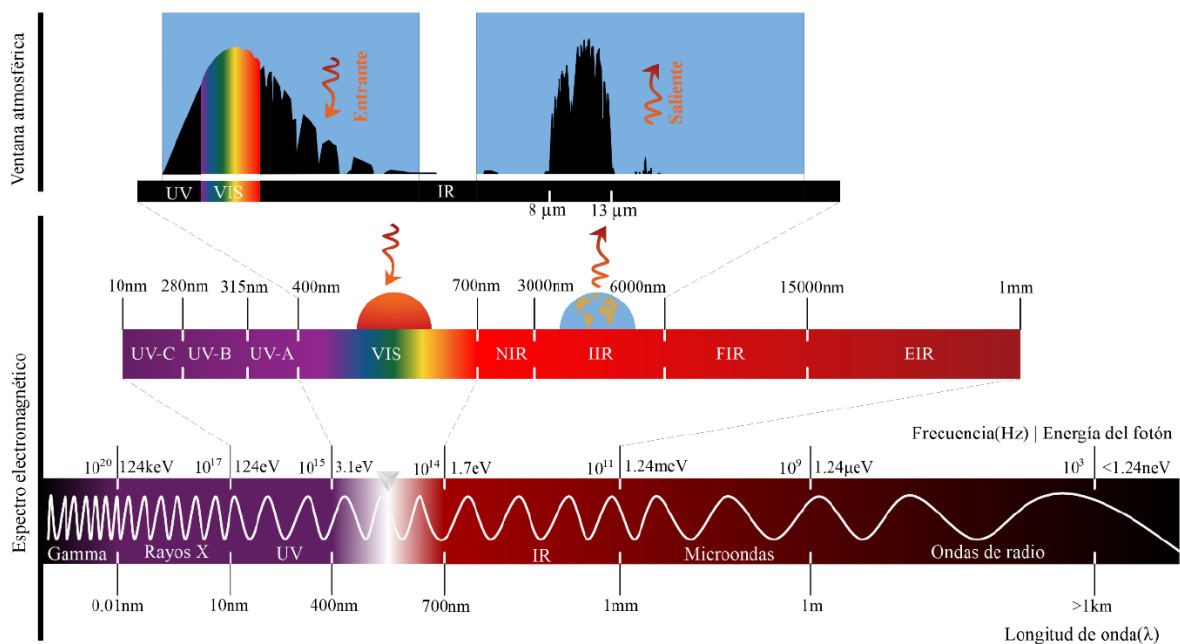
Desde el punto de vista de las propiedades radiativas, la atmósfera debilita la radiación térmica desde la superficie de la Tierra hacia el universo en la mayoría de las longitudes de onda debido a su baja transmitancia. Sin embargo, en la denominada *ventana atmosférica* que se encuentra en el rango de 8μm a 13μm, la atmósfera es altamente transparente para la radiación térmica (Figura 18). Esta ventana atmosférica coincide con la longitud de onda pico de la

radiación térmica de los objetos en la Tierra a una temperatura ambiente típica. Debido a ello, cualquier objeto terrestre que se encuentre orientado hacia el cielo y que presente una alta emisividad en la ventana atmosférica, tiene la capacidad de irradiar calor hacia el espacio exterior, como algunos tipos de materiales fríos (Huang et al., 2020; Zhao et al., 2019).

A su vez, la ventana atmosférica está estrechamente relacionada con la humedad. Tomando en cuenta que, la refrigeración radiativa es una tecnología de enfriamiento pasivo que permite disminuir la temperatura por medio de la emisión del calor (radiación infrarroja), a través de la ventana atmosférica, las regiones que presentan una humedad alta, obtienen los resultados de refrigeración menos deseables (Sakata et al., 2023).

Figura 18

La ventana atmosférica dentro del espectro electromagnético



Nota. Obtenida de Morales (2023).

2.1.10. Propiedades ópticas de los materiales

Para lograr reducir el sobrecalentamiento de una edificación durante el verano, principalmente, la superficie exterior debe tener la capacidad de reflejar la radiación y de transferir la energía a la atmosfera por medio de la radiación térmica en el espectro infrarrojo. Las principales propiedades con las que debe contar un material frío son (Ascione et al., 2018):

a) Reflectancia solar (SR)

b) Emitancia infrarroja (ϵ)

La reflectancia solar determina la habilidad de la superficie de un material para reflejar la radiación solar. El término hace referencia a la reflectancia total de una superficie, considerando la reflectancia hemisférica de la radiación, integrada alrededor del espectro solar, incluyendo la reflexión especular y difusa. Se mide de una escala de 0 a 1 (0%-100%). Mientras que la emitancia infrarroja determina la habilidad de la superficie para liberar el calor absorbido. Especifica que tan bien una superficie irradia energía lejos de sí misma comparado con un cuerpo negro operando en la misma temperatura. La emitancia infrarroja se mide una escala de 0-10 (0%-100%) (Santamouris & Kolokotsa, 2016).

Ambas características (SR y ϵ) de un material, han conformado un solo indicador, conocido como el "Índice de reflectancia solar" (SRI⁵). Es un parámetro que expresa la capacidad de una superficie para rechazar el calor (Ascione et al., 2018). Este es un índice que combina las propiedades radiativas y los efectos de enfriamiento convectivo en un solo esquema. El cálculo de este índice está basado en la normativa internacional ASTM E1980-01, que requieren los valores medidos de la reflectancia solar y la emitancia infrarroja bajo unas condiciones medio ambientales específicas. El SRI tiene un valor de 0 (para una superficie estándar negra) y un 100 (para una superficie estándar blanca). Con ello, se puede reconocer que los materiales muy calientes pueden tener valores negativos y los materiales muy fríos pueden tener valores muy altos arriba de los 100 (Santamouris & Kolokotsa, 2016).

De acuerdo con Santamouris & Kolokotsa, (2016), cuando las propiedades de la superficie, ya fueron determinadas, su desempeño térmico puede ser estimado utilizando la ecuación del balance energético de la superficie expuesta al sol. Para una superficie horizontal (como el techo) se puede utilizar la siguiente Ecuación 1:

Ecuación 1

Balance energético de la superficie expuesta al sol

$$(1 - R)I = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{sky}^4) + h_c(T_s - T_a) - \lambda dt/dx$$

⁵ Solar Reflectance Index, por sus siglas en inglés

I = Insolación (W/m^2)

σ = constante de Stefan-Boltzmann

h_c = coeficiente de convección ($W/m^2 K$)

T_{sky} = Temperatura del cielo (K)

T_{air} = Temperatura del aire (K)

R = reflectancia solar o albedo de una superficie

ϵ = emisividad de la superficie

λ = conductividad térmica de la superficie (W/mK)

dT/dx = gradiente de temperatura (en el eje x)

Existen diversos equipos para medir distintas propiedades ópticas de materiales fríos, de acuerdo con varios autores. Para medir la reflectancia solar de una pintura altamente reflectiva se puede emplear el uso de un reflectómetro (Nutakki y Kazim, 2022). Sin embargo, generalmente se utiliza un espectrofotómetro UV-VIS-NIR para medir la reflectancia solar en los espectros ultravioleta, visible e infrarrojo (Zeng et al., 2018), (Hosseini y Ghasemi, 2020) y (Lee et al., 2021). Al medir la reflectancia solar (R^*) en pigmentos fríos dentro de la longitud de onda de 250nm-2500nm se puede utilizar la siguiente Ecuación 2:

Ecuación 2

Reflectancia solar

$$R = \int_{250}^{2500} r(\lambda) i(\lambda) d(\lambda) / \int_{250}^{2500} i(\lambda) d(\lambda)$$

donde λ es longitud de onda, $r(\lambda)$ es la reflectancia solar obtenida del experimento e $i(\lambda)$ es la irradiancia solar espectral ($W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$), obtenida de la norma ASTM G173.

Así mismo, existen normas internacionales para el cálculo de distintas propiedades ópticas de un material, en las cuales se aplican diferentes ecuaciones. Para el cálculo de la

reflectancia solar total (TSR⁶), se obtiene integrando la reflectancia medida por la irradiancia espectral $E_s(\lambda)$ del sol, como se describe en la norma ASTM 903, utilizando la siguiente Ecuación 3 (Kolås et al., 2019):

Ecuación 3

Reflectancia solar total

$$TSR = \int_{300}^{2500} R(\lambda) E_s(\lambda) d\lambda / \int_{300}^{2500} E_s(\lambda) d\lambda$$

Así mismo, la emitancia IR (infrarroja) (ϵ) se calcula como $\epsilon = 1 - R_T$ donde R_T es la reflectancia total hemisférica. R_T se calcula desde la reflectancia direccional hemisférica $R(\theta)$, en 12 diferentes ángulos, de acuerdo con la siguiente Ecuación 4:

Ecuación 4

Emitancia infrarroja

$$R_T = 2 \int_0^{\pi/2} R(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta$$

El cálculo del SRI y de la temperatura de la superficie se basa en los valores de la TSR y la emitancia IR como lo especifica la normativa ASTM E1980. SRI es expresado como una relación entre la temperatura de la superficie de la muestra T_s y la temperatura de una superficie negra (T_b) y una superficie blanca (T_w) como referencia bajo las mismas condiciones. Para ello, se utiliza la siguiente Ecuación 5:

Ecuación 5

Índice de reflectancia solar

$$SRI = T_b - T_s / T_b - T_w * 100$$

2.2. Marco teórico

2.2.1. Teoría del cuerpo negro perfecto

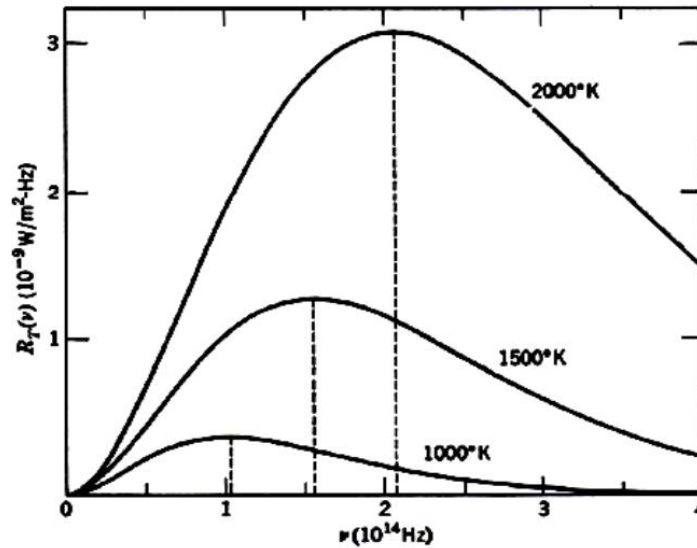
⁶ Total Solar Reflectance, por sus siglas en inglés

Todos los cuerpos emiten energía en forma de ondas electromagnéticas con respecto a su temperatura. Los cuerpos que se encuentran a temperatura ambiente emiten poca energía a longitudes de ondas mayores a 760 nm y por lo mismo son a menor frecuencia. Al contrario, cuando se eleva la temperatura de un objeto este emitirá mayor energía, generando una disminución de las longitudes de onda, y debido a ello, es que se producen cambios de color en estos tipos de cuerpos al aumentar su temperatura. No obstante, los cuerpos no emiten con la misma intensidad en todas las frecuencias o longitudes de ondas. La intensidad de radiación a una longitud de onda determinada de un cuerpo negro no siempre será la misma a una temperatura dada (Duarte et al., 2022).

El cuerpo negro es un cuerpo ideal que tiene la capacidad de absorber toda la cantidad de radiación que recibe y su vez, emitiendo la radiación térmica. Los primeros acercamientos a dicho fenómeno fueron por Thomas Wedgwood en 1792, en donde observó que sin importar la composición química de lo que colocará en hornos, estos al alcanzar la misma temperatura emitían luz roja. Más tarde en 1860, el término cuerpo negro se le atribuyó al científico Gustav Kirchhoff, en donde este cuerpo ideal permite la entrada de toda la radiación que incide hacia el mismo, por lo que su reflectividad y transmisividad son equivalentes a cero y su absorptividad es igual a 1.0 en todas las longitudes de onda y direcciones (Duarte et al., 2022).

Posteriormente, en 1897 el científico Jožef Stefan, descubrió que la potencia emitida por unidad de área a todas las frecuencias es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta (Duarte et al., 2022). Por lo que la distribución espectral de la radiación emitida por un cuerpo negro se le denomina radiancia espectral ($R_T(\nu)$). La cantidad $R_T(\nu)d\nu$ es la energía radiada (por el cuerpo negro a temperatura T) con frecuencias entre ν y $\nu+d\nu$ por unidad de área y por unidad de tiempo. En 1899, Lummer y Pringsheim llevaron a cabo las primeras mediciones precisas por medio de un espectrofotómetro, en donde los lentes y prismas eran transparentes a la radiación del infrarrojo. La Figura 19 muestra la radiancia $R_T(\nu)$ como función de ν medida en los experimentos descritos anteriormente. Las curvas mostradas en esta figura, que corresponden a las funciones de distribución espectral para $T=1500$ K y $T=2000$ K, muestran que la frecuencia $\nu_{m\acute{a}x}$, para la cual se presenta la mayor emisión potencia incrementa conforme aumenta la temperatura del cuerpo negro (Muñoz et al., 2012).

Figura 19
Radiación espectral de un cuerpo negro a diferentes temperaturas



Nota. Obtenida de Muñoz et al. (2012).

La integral de la radiancia espectral $R_T(\nu)$ en función de la frecuencia ν es una función de la temperatura total del cuerpo negro. A esto se le conoce como ley de Stefan, donde σ es igual a $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ y es la constante de Stefan-Boltzmann, indicada en la siguiente Ecuación 6 (Muñoz et al., 2012):

Ecuación 6
Ley de Stefan

$$\int_0^{\infty} R_T(\nu) d\nu = \sigma T^4$$

Durante la misma época, el científico Wilhelm Wien propuso una ley que permite la predicción de la longitud de onda que se emite con máxima potencia con respecto a la temperatura de un cuerpo, la cual tiene relación con la ley de Stefan y se muestra en la siguiente Ecuación 7 (Duarte et al., 2022):

Ecuación 7
Ley de Wein

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Posteriormente, en 1900, Planck propone combinar la ley de Wein con principios de la mecánica estadística y las leyes de Maxwell, obteniendo la siguiente Ecuación 8:

Ecuación 8

Ley de Planck

$$I(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{2hc}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1}$$

A esta ecuación se le conoce como la ley de Planck, donde $I(\lambda)$ es la cantidad de energía por unidad de área, o bien, la intensidad de luz, K es la constante de Stefan-Boltzmann que es igual a $1.38 \times 10^{-23} J.K$, y h es la constante de Planck que vale $6.63 \times 10^{-34} J/s$. Esta ley permite predecir la intensidad de energía irradiada por unidad de área de un cuerpo negro para cada longitud de onda (Duarte et al., 2022).

2.2.2. La base energética de la isla de calor urbano

La energía se manifiesta dentro de una ciudad de diversas maneras, pasando por muchos estados y formas; por ejemplo, combustibles fósiles, electricidad, radiación y calor. Los materiales de construcción, comida, agua y desechos también almacenan energía. El tipo de energía depende de la perspectiva y la aplicación. Los planeadores urbanos y economistas, se enfocan en el flujo de energía que es utilizable para las actividades diarias y en la optimización de esta, considerando como influir en el consumo de energía de una forma administrativa, como, por ejemplo, una regularización para el aislamiento de nuevas edificaciones. Por otro lado, los meteorólogos urbanos, consideran la energía radiativa y la influencia del calor en el clima urbano, su transportación y almacenamiento en la atmósfera, como Presupuesto Energético Urbano (UEB⁷), el cual se origina del calor antropogénico resultante de las emisiones vehiculares, el enfriamiento y calentamiento activo, procesos industriales y el calor metabólico de las personas (Santamouris & Kolokotsa, 2016).

La envolvente de un edificio se encarga de restringir el flujo del calor exterior hacia el interior, con el fin de mejorar el ambiente térmico del espacio. La cantidad de calor que se debe restringir dependerá de las propiedades térmicas del material utilizado como envolvente del

⁷ Urban Energy Balance, por sus siglas en inglés

edificio. En términos generales, este elemento de construcción almacena energía térmica convirtiéndola en forma de calor sensible, aumentando su temperatura. Por lo tanto, el incremento de la temperatura del interior del edificio, también dependerá de los materiales de construcción (Singh et al., 2023).

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

El espectro solar está conformado en su mayoría por la región infrarroja-cercana (NIR) (700nm–2500nm) correspondiendo a un 52%, en un 43% por la visible (400nm–700nm) y el 5% restante por la ultravioleta (UV) (200nm–400nm). La radiación infrarroja-cercana se encuentra entre los 700-2500 nm de longitud de onda (Akbari et al., 2006).

Para lograr reducir el sobrecalentamiento de una edificación durante el verano, principalmente, la superficie exterior debe tener la capacidad de reflejar la radiación y de transferir la energía a la atmósfera por medio de la radiación en el espectro infrarrojo (Ascione et al., 2018).

Los materiales fríos están conformados por pigmentos específicamente diseñados para reflejar la porción cercana al infrarrojo (Rosati et al., 2021b). Los pigmentos son los materiales principales para obtener una alta reflectancia en recubrimientos, la cual es determinada por medio del análisis espectral (Levinson et al., 2005; Levinson et al., 2010). Para lograr que los pigmentos tengan la capacidad de reflejar la energía térmica y reducir las ganancias de calor dentro de la región infrarroja-cercana entre los 700nm-1100 nm, que es en donde se genera mayor calor, es necesario que el tamaño de partícula este entre los 350nm-550nm (Wong et al., 2015).

2.3.1. Análisis bibliométrico de tendencias

Para la elaboración de este análisis, fue necesario minimizar el sesgo y garantizar el nivel de confianza, por lo que, se consideró la implementación de metodologías que comprenden un proceso para recopilar información específica de acuerdo con criterios de elegibilidad y preespecificados. La primera metodología empleada para la revisión de la literatura fue

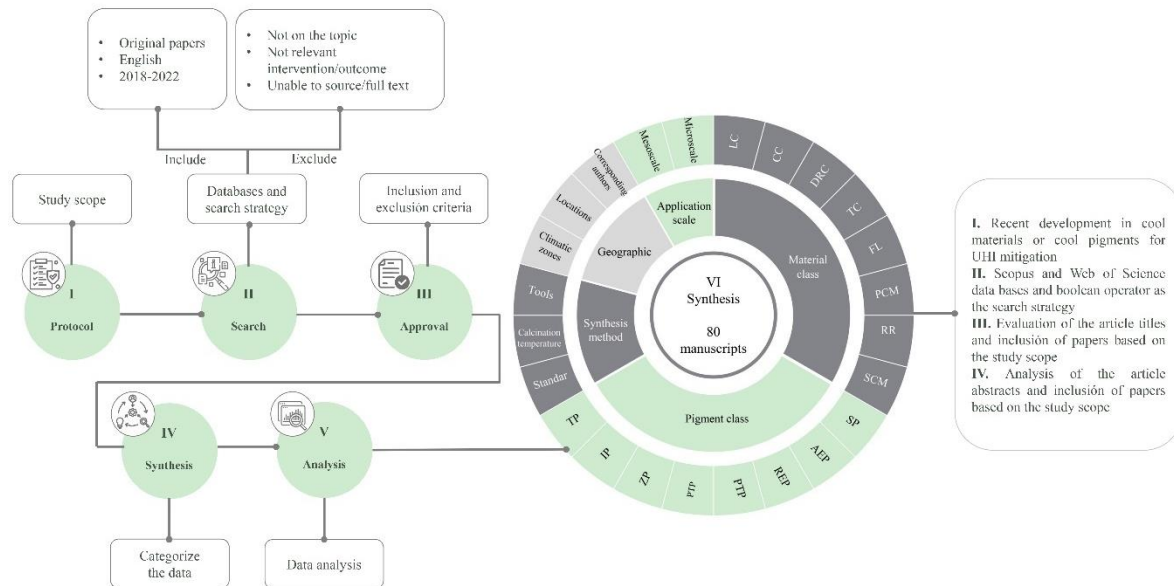
*PSALSAR*⁸, la cual comprende 5 pasos esenciales: i) protocolo, ii) búsqueda, iii) evaluación, iv) síntesis, v) análisis y vi) reporte de resultados (Mengist et al., 2020). Así mismo, se consideró el método *PRISMA*⁹, la cual es una guía de presentación de informes diseñada para abordar la Revisión Sistemática (SR) por medio de una lista de verificación de 27 elementos recomendados (Grimshaw et al., 2021). Para lograr la valoración y síntesis de datos dentro del estado del arte de la SR, se implementó una integración de ambas metodologías, basándose en el protocolo de búsqueda "*PSALSAR*", haciendo una adaptación del método "*PRISMA*" en el paso ii) y vi).

Con el objetivo de realizar una revisión sistemática holística, se definió el alcance del estudio, limitándose a la búsqueda de artículos relacionados con el desarrollo actual de materiales fríos o pigmentos fríos como estrategia de mitigación de la ICU. Posteriormente, se definieron las bases de datos utilizando Scopus de Elsevier y Web of Science de Clarivate. La estrategia de búsqueda implementada, fue por medio de operadores booleanos utilizando palabras clave considerando los conceptos "*Urban Heat Island*", "*Mitigation strategies*", "*Cool materials*", "*Cool pigment*" y "*Development*", conduciendo así un resultado de 741 manuscritos originales. Para implementar una evaluación de calidad para la selección de los estudios obtenidos, se determinaron criterios de inclusión y exclusión. El primer filtro se realizó a partir de los siguientes criterios: *a) publication year*, *b) article type*, *c) publications in English*, *d) subject areas based in the field*, obteniendo un total de 340 manuscritos. Posteriormente, se realizó una síntesis de la información obtenida al categorizar los títulos de los artículos con base en la relevancia de acuerdo con el alcance del estudio, limitándose así, a la obtención de 200 manuscritos. Para la penúltima etapa, se aplicó un análisis descriptivo a partir del resumen de los artículos, identificando las tendencias y las carencias que presentaron, excluyendo aquellos que se encontraban fuera del desarrollo de materiales o pigmentos fríos como técnica de mitigación de la ICU. En total, se revisaron 80 artículos originales, los cuales fueron categorizados por distintas clases y subclases considerando aspectos bibliométricos, geográficos, metodológicos y con relación al tipo de material, como se muestra en la Figura 20.

⁸ Protocol, Search, Appraisal, Synthesis, Analysis, and Report, por sus siglas en inglés

⁹ Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, por sus siglas en inglés

Figura 20
La estrategia de búsqueda de la literatura



Nota. Elaborada a partir de Morales-Inzunza et al., (2023).

2.3.2. Progreso histórico de las tendencias de investigación

El balance térmico urbano está determinado por distintas propiedades y características de los materiales empleados en las ciudades. Las superficies urbanas absorben la radiación solar incidente y la emiten nuevamente en forma de calor por los procesos térmicos conductivos o convectivos directamente en el entorno inmediato (M. Santamouris & Yun, 2020). El índice que permite cuantificar el desempeño térmico de un material frío es llamado “Disminución de la temperatura de la superficie” (DST) (De Masi et al., 2018). Para lograr una reducción óptima del sobrecalentamiento urbano, los materiales fríos deben tener una alta capacidad de reflejar la radiación solar y de emitir la energía a la atmosfera a través de la radiación térmica infrarroja. Estas cualidades están determinadas principalmente por dos propiedades ópticas de un material: la reflectancia solar (SR), la fracción de la energía solar que se refleja; la emitancia térmica (ϵ), la proporción de calor emitido por la superficie mediante radiación térmica en el espectro infrarrojo. Así mismo, ambas propiedades conformar un solo indicador conocido como “índice de reflectancia solar” (SRI), el cual es un único parámetro que determina la capacidad de un material para rechazar la radiación solar (Ascione et al., 2018).

Existen diversos tipos de materiales fríos en la actualidad, y así mismo ha habido diversas clasificaciones conforme su desarrollo avanza. Considerando una visualización de la evolución de las tendencias de investigación en donde se evaluaron el número de publicaciones anuales recientes sobre materiales fríos, se obtuvieron las siguientes 7 clasificaciones: materiales de color claro (LC), materiales con color (CC), de enfriamiento radiativo diurno (DRC), retroreflectivo (RR), termocrómico (TC), fluorescente (FL) y cambio de fase (PCM). Los materiales de color claro se caracterizan por presentar una alta reflectancia en el espectro VIS (400nm a 700nm) conformados por materiales naturales y artificiales. Por su parte, los materiales con color son altamente reflectivos en el espectro infrarrojo (700nm a 1mm), conformados a base de pigmentos reflectivos en el espectro IR, compuestos con nanopartículas y con microesferas de vidrio huecas. Los materiales de enfriamiento radiativo están conformados por estructuras fotónicas multicapa, metamateriales de estructura fotónica 2D-3D y recubrimientos a base de pigmentos reflectivos en el espectro IR y compuestos con nanopartículas (Morales-Inzunza et al., 2023). Así mismo, estos materiales tienen la capacidad tener una reflectancia solar y emisividad en la ventana atmosférica (8 μ m -13 μ m) (Feng et al., 2022). Por otro lado, están los materiales fluorescentes, basados en el uso de puntos cuánticos, siendo nanomateriales conformados por nano-cristales o compuestos de bulto. Los materiales retrorreflectivos son aquellos que reflejan la radiación solar en la misma dirección en la que incide y están conformados por compuestos por esferas de vidrio, esferas de bario y láminas con estructura de prisma (Vakilinezhad & Khabir, 2023). A su vez, están los materiales termocrómicos, que permiten un cambio en su color a medida que su temperatura aumenta o disminuye, y pueden ser a base de colorantes y componentes altamente reflectantes (Cheng et al., 2022). Por último, están los materiales de cambio de fase, capaces de absorber o liberar calor durante un cambio de estado sólido a líquido o viceversa, subdivididos en materiales orgánicos, inorgánicos y eutécticos (Sha et al., 2022).

A partir de la RS realizada, entre los años 2018-2023, sobre el desarrollo y empleo de pigmentos NIR para la elaboración de materiales fríos, los materiales con color representaron un 41.25%, seguido de los materiales de color claro en un 21.25%. Los materiales de enfriamiento radiativo diurno ocuparon el tercer lugar de los materiales más desarrollados en un 11.25%. Por su parte, los materiales fluorescentes, retrorreflectivos, termocrómicos y de cambio de fase, conformaron cada uno menos del 8%. Así mismo, el empleo o desarrollo de pigmentos

reflectivos NIR conformaron el 86.25% de los materiales fríos estudiados. Debido a ello, es que el avance científico se enfoca cada vez más en la síntesis de diversos pigmentos reflectivos NIR con el empleo de diversos compuestos inorgánicos, con distintos tamaños de partícula, para el desarrollo de materiales fríos y con ello aumentar la reflectancia solar y la emitancia térmica.

2.3.3. Clasificación de pigmentos en recubrimientos

Los pigmentos se pueden clasificar desde distintos aspectos de acuerdo con la composición química, el origen, las propiedades funcionales o desde el punto de vista de manufactura Figura 21. Así mismo, se pueden subclasificar en distintas categorías según la literatura. Desde el aspecto químico se pueden clasificar en orgánicos e inorgánicos. Los orgánicos son más susceptibles a la decoloración cuando se exponen a la luz, y se utilizan más en textiles o plásticos. Los inorgánicos como los óxidos metálicos, sales o minerales, son sustancias formadas por pequeñas partículas insolubles en disolventes, con una alta estabilidad química y térmica. El desempeño óptico de estos pigmentos depende de las partículas, su tamaño, forma y concentración de volumen (Sheethu et al., 2019). Generalmente, para lograr que los pigmentos tengan la capacidad de reflejar la energía térmica y reducir las ganancias de calor dentro de la región infrarroja-cercana entre los 700nm-1100nm, es necesario que el tamaño de partícula este entre los 350nm-550nm (Ianoş et al., 2022; Wong et al., 2015; Zeng et al., 2018). Considerando la clasificación basada en su origen, los pigmentos se pueden clasificar en naturales y sintéticos. Así mismo, los pigmentos naturales pueden ser clasificados en pigmentos naturales minerales y pigmentos biológicos. Los pigmentos naturales minerales son cinabrio, arcilla, rejalgam, verde de malaquita y carbonato de calcio pesado. Los pigmentos biológicos extraídos de animales incluyen carmines, polvo de escamas naturales y también derivados de plantas que incluyen garcinia, rojo de alizarina e índigo (Sheethu et al., 2019). Por su parte, los pigmentos sintéticos son artificiales, como el dióxido de titanio, el litopón, el amarillo de cromo y plomo, el azul de hierro, entre otros (Berardi et al., 2020; Sheethu et al., 2019). El rosa grande, el amarillo parejo y la quinacridona, pertenecen a los pigmentos orgánicos sintéticos (Sheethu et al., 2019).

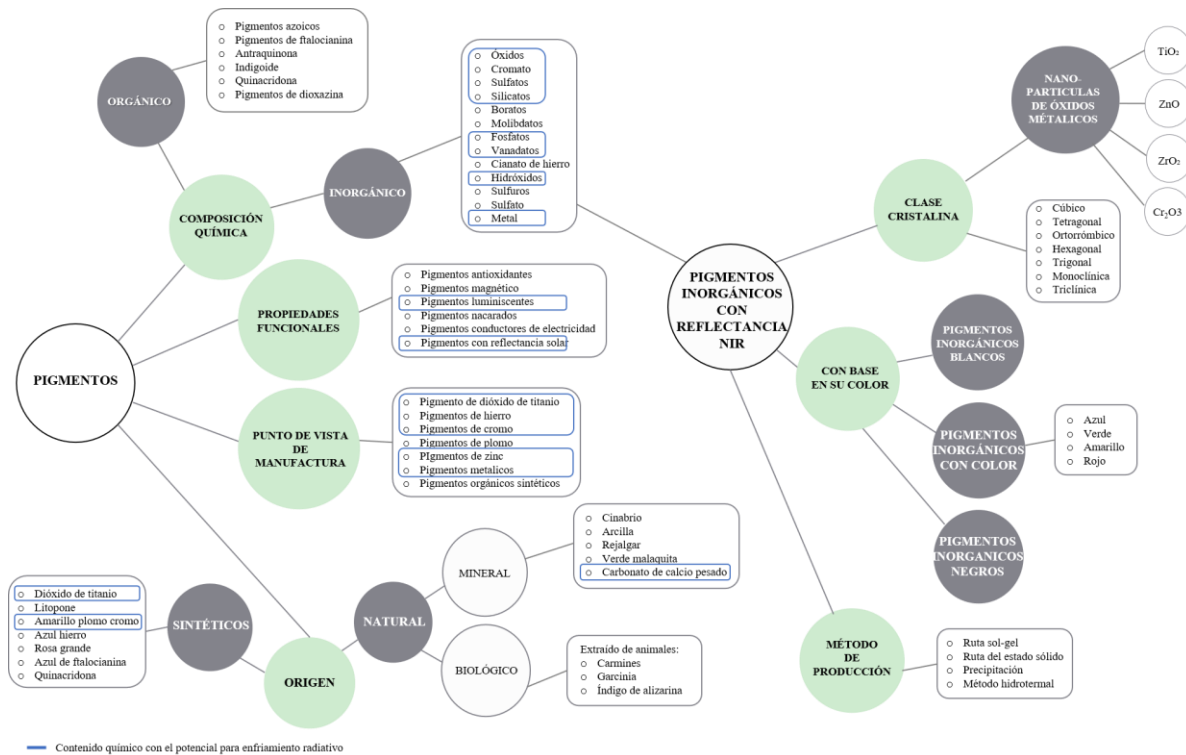
Nuevamente, los pigmentos pueden ser clasificados con base en sus propiedades funcionales, tales como pigmentos antioxidantes, pigmentos magnéticos, pigmentos luminiscentes, pigmentos nacarados, pigmentos conductores de electricidad y pigmentos reflectivos NIR (Sheethu et al., 2019). Comúnmente, los pigmentos NIR se elaboran con la

mezcla de compuestos reflectivos y agentes de color como los óxidos metálicos de transición (Tang et al., 2023). La reducción del tamaño de partículas de los materiales los vuelve nanomateriales, lo cual al alterarlos se modifica su comportamiento físico, químico y biológico. Existen diversas características favorables de los nanomateriales, como su estabilidad química, alta capacidad de absorción y la posibilidad de modificar su morfología. Las propiedades ópticas como la emisividad y la absorción, están relacionadas con las transiciones electrónicas entre los niveles de energía. La nanotecnología ha empezado a formar parte del desarrollo de materiales de construcción innovadores en torno a la reducción de cargas térmicas en el ambiente urbano (Veloso et al., 2021). El tamaño de las partículas de los materiales tiene una relación directa con la reflectancia solar obtenida. En algunos casos, la morfología de las partículas puede generar un doble mecanismo de dispersión, a través de la dispersión de Rayleigh a la luz en el rango de longitud de onda de 100nm-300nm, en donde el tamaño de partícula es menor o igual a una décima parte de la longitud de onda de la luz y a través de la dispersión de Mie a la luz entre 0.3 μ m-1.0 μ m, en donde el tamaño de partículas es aproximadamente igual a la longitud de onda de la luz. La dispersión Mie y Rayleigh pueden trabajar en conjunto para mejorar la reflexión de las partículas en el rango espectral de 0.2 μ m-2.5 μ m (Huang et al., 2020).

Dentro de esta última clasificación, comúnmente se vuelven a subclasificar los pigmentos NIR por color, por clase cristalina o por método de síntesis, como se muestra en la Figura 21 (Rosati et al., 2021c; Sheethu et al., 2019; Veloso et al., 2021). Sin embargo, estas clasificaciones no separan el uso de los diversos compuestos químicos empleados, lo cual limita el entendimiento de las combinaciones químicas o dopajes necesarios para la elaboración de pigmentos con una alta reflectancia NIR y emitancia térmica, con relación al tipo de material frío en el que se busca implementarlos y su desempeño al aplicarlos como recubrimientos fríos urbanos. Por otro lado, existe otra clasificación desde el punto de vista de manufactura, en donde se propone agrupar los pigmentos con relación los metales transicionales o postransicionales empleados. Esta clasificación los agrupa por pigmentos de titanio, pigmentos de hierro, pigmentos de cromo, pigmentos de plomo, pigmentos de zinc, pigmentos metálicos y pigmentos orgánicos sintéticos. Esta última clasificación es comúnmente empleada en los procesos de industrialización (Sheethu et al., 2019). La clasificación desde el punto de vista de manufactura propone un primer acercamiento a la categorización de estos pigmentos a partir de su composición química, sin embargo, existen nuevos pigmentos a partir de los compuestos

químicos formados por los elementos lantánidos y por metales alcalinotérreos. Así mismo, existen los pigmentos especiales conformados principalmente por sílice (SiO₂) o por puntos cuánticos. Por lo que, para lograr una integración de estos pigmentos y obtener un panorama más amplio de la composición química y desempeño termo-óptico para su aplicación en superficies urbanas y reducción de la temperatura superficial, como estrategia de mitigación de la ICU, se propone una clasificación multiobjetivo a partir de lo siguiente: pigmentos de titanio, pigmento de hierro, pigmentos de zinc, pigmentos de metales postransicionales, pigmentos de metales alcalinotérreos, pigmentos lantánidos y pigmentos especiales (Tabla 5).

Figura 21
Clasificación de pigmentos en recubrimientos



Nota. Clasificación a partir de Sheethu et al. (2019), Rosati et al. (2021c) y Veloso et al. (2021).

A partir de la clasificación multiobjetivo propuesta, se agruparon el 86.25% de los estudios obtenidos en la RS, ya que, solamente en esos artículos, se especificaba el o los compuestos químicos empleados para la elaboración de pigmentos reflectivos NIR. Los pigmentos de metales alcalinotérreos (AEP) representaron la mayoría de los compuestos empleados en los estudios analizados con un 18.75%, seguido de los pigmentos de titanio (TP) con un 17.5%. Por su parte, se encontró un 12.5% de estudios con pigmentos especiales (SP) y un 11.25% en donde se emplearon o desarrollaron pigmentos de hierro (IP) en su totalidad o en

conjunto con otros compuestos químicos. Por otro lado, tanto los pigmentos postransicionales (PTP) como los de zinc (ZP) representaron un 10% en la RS, demostrando su desarrollo con otros compuestos químicos en conjunto. Por último, los pigmentos lantánidos (REP) representaron únicamente el 5% de los estudios, ya que son a base de compuestos complejos de obtener y de desarrollar. Así mismo, considerando la clasificación multipropósito de los diferentes tipos de pigmentos, se realizó una correlación entre las clasificaciones de materiales fríos que se pueden desarrollar a base de estos como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5

Viabilidad multiobjetivo de los tipos de pigmentos para el desarrollo de materiales fríos

Viabilidad multiobjetivo	Tipo de material frío y clasificación de pigmentos	CC	LC	PCM	DRC	FL	RR	TC
Alta	Pigmentos alcalinotérreos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Media	Pigmentos especiales	✓	✓	✓	✓	✓		✓
	Pigmentos de titanio	✓	✓		✓	✓		✓
Baja	Pigmentos de hierro	✓						✓
	Pigmentos lantánidos	✓				✓		
	Pigmentos de zinc	✓	✓					
	Pigmentos de metales postransicionales	✓			✓			

Nota. Elaborada a partir de Morales-Inzunza et al., (2023).

2.3.4. Pigmentos de titanio

En los pigmentos a base de titanio, el TiO_2 es uno de los óxidos metálicos mayormente utilizado en la elaboración de pigmentos blancos para el desarrollo de materiales fríos, principalmente en materiales de color claro (Sameera et al., 2019). El desarrollo de una pintura acrílica a base de cuatro pigmentos termocrómicos se logró con el empleo solamente de TiO_2 . La reflectancia solar de la pintura es de 0.88, la reflectancia VIS de 0.91 y la emisividad térmica de 0.9, demostrando su eficiencia para su aplicación en techos y en fachadas (Berardi et al., 2020). Así mismo, únicamente con el uso de TiO_2 , se fabricó un pigmento compuesto (PGT), alcanzando una reflectancia NIR de 86.6%. y reduciendo la temperatura superficial como recubrimiento entre $1.5^{\circ}C-2.6^{\circ}C$ (Cao et al., 2023). Por su parte, al estudiar el impacto de material frío compuesto con nanopartículas de TiO_2 para su aplicación en fachadas urbanas, se

identificó que presenta un valor de albedo de 0.9, lo cual reduce la temperatura fisiológicamente equivalente (PET) en 0.5°C (Gholami et al., 2023).

Por su parte, también se han desarrollado pigmentos fríos utilizando el TiO_2 en conjunto con CuO (Dias et al., 2023; Gao et al., 2020). Con el empleo del TiO_2 y CuO se diseñó un recubrimiento de capa doble utilizando partículas de propiedades suplementarias para lograr tanto el rendimiento térmico como el estético. Se utilizaron partículas TiO_2 para lograr el acabado blanco en la capa superior y las partículas de CuO fueron empleadas en la capa inferior. La radiación solar incidente se reflejó principalmente en las partículas de TiO_2 y, por lo tanto, se transmitió menos radiación a la capa inferior y la interacción con las partículas de CuO , lo que daría como resultado solo una pequeña disminución de la reflectancia espectral. Con ello, se obtuvo una reflectancia solar total de 48%, siendo la más baja reportada en los materiales con este tipo de pigmentos (Gao et al., 2020).

Así mismo, se han desarrollado materiales fríos con la combinación de TiO_2 y otros óxidos metálicos como CaCO_3 , Al_2O_3 y Ca_2SiO_4 , reutilizando escoria de hornos industriales, debido a su alta emisividad 0.95 en el rango de onda en $8\mu\text{m}$ – $13\mu\text{m}$. Se empleó una capa superior blanca altamente reflectiva y una capa inferior gris con una alta emisividad. Utilizando el material propuesto, la temperatura bajo 6.2°C , comparada con el concreto, sin ningún recubrimiento, al estar situado directamente a la luz solar (Wu et al., 2020). Por otro lado, combinando el TiO_2 con otros óxidos metálicos como SiO_2 , AlO y FeO , se obtuvieron materiales con color, de diferentes colores, como amarillo, azul, rojo, verde y negro (Zheng et al., 2020). Por su parte, al utilizar dióxido de titanio, carbonato de calcio y magnesio en un material frío de color claro, se realizó una comparativa de la reflectancia de la radiación solar, entre morteros aplicados después de 3 años de exposición a las condiciones climáticas exteriores, para demostrar que el tratamiento del TiO_2 , en forma de polvo (adición) y en suspensión (recubrimiento), presentaron una diferencia en la reflectancia solar de 8.5%, prácticamente manteniendo el mismo valor inicial a pesar del envejecimiento (Dantas et al., 2022).

2.3.5. Pigmentos de hierro

Los pigmentos a base de hierro se caracterizan por presentar diferentes tonalidades de rojo, para la elaboración de materiales fríos con color. La utilización de nano- TiO_2 y Fe_2O_3 , mezclando esferas de vidrio huecas, para la elaboración de un pigmento rojo, con un bajo brillo

y una alta reflectividad, redujo la temperatura de la superficie exterior de un edificio residencial efectivamente, ya que la temperatura máxima superficial cambio entre 6°C-8°C. El brillo del recubrimiento se redujo en un 50%, logrando los requerimientos de confort y seguridad para evitar deslumbramiento (Rong et al., 2020). Así mismo, se ha utilizado FeO_2 como composición principal de pigmentos inorgánicos reflectivos. Para lograr una reflectancia solar óptima, se utilizó en conjunto el TiO_2 como material de relleno. Con ello, se consiguió fabricar un pavimento permeable reflectivo con una reflectancia solar de 60% (Zheng et al., 2020). La combinación de nano partículas de TiO_2 y Fe_2O_3 , también fue empleada en la elaboración de un pigmento frío con una reflectancia solar total de 62.7% y una reflectancia NIR de 97.9% (Lee et al., 2021).

El óxido férrico se ha utilizado en conjunto con diversos compuestos químicos para el desarrollo de pigmentos reflectivos NIR. Con la incorporación de óxido de silicio (SiO_2), incluido el dióxido de titanio (TiO_2), el óxido de cromo verduoso (Cr_2O_3) y el óxido férrico rojizo (Fe_2O_3), se ha podido conseguir un material frío de apariencia no blanca, para evitar deslumbramiento. De manera comparativa, el Cr_2O_3 presentó una alta reflectancia solar y una propiedad de enfriamiento como rutilo TiO_2 , que fue superior que la de Fe_2O_3 . Después de introducir el SiO_2 , la reflectancia en la región VIS incrementó un 67.9%. Con la incorporación simultánea de SiO_2 y Cr_2O_3 , la muestra poseía una reflectancia en el infrarrojo cercano del 73.7 %, y valores SRI superiores a 70. La reflectancia solar total representó un 64.8%, una emisividad infrarroja de 0.79 y una emisividad térmica de 0.61-0.67. Con ello se logró mantener la temperatura inferior a 26 °C, siendo la de la superficie exterior (Qi et al., 2022). Por otro lado, con la combinación de dos pigmentos NIR inorgánicos reflectivos, de color amarillo y negro, se obtuvo una pintura acrílica. La mezcla de pintura fue aplicada sobre paneles de acero. El pigmento negro se conformó de $\text{Cr}_{1.3}\text{Fe}_{0.7}\text{O}_3$. El pigmento amarillo consistió de un alto contenido de TiO_2 y una pequeña concentración de O_2 . El pigmento amarillo demostró reducir la temperatura de la superficie negra en un 12°C al aumentar el porcentaje de contenido de los compuestos (Rossi et al., 2020).

Así bien, el uso de Fe_2O_4 , en conjunto con Co, Ni, Zn y Mn, por distintos métodos de síntesis, demostró un gran potencial para su aplicación en pigmentos reflectivos NIR y fotoluminiscentes debido a su estabilidad química y baja toxicidad (Dippong et al., 2021). Así como el FeO_2 ha presentado su potencial para el desarrollo de pigmentos reflectivos NIR con el

empleo de otros compuestos químicos en conjunto, también se han fabricado materiales fríos solamente con su incorporación. Con el uso de FeO_2 , se han elaborado recubrimientos fríos de color rojo y café con una alta reflectancia NIR (Rossi et al., 2020).

2.3.6. Pigmentos de zinc

Con el empleo ZnO se han desarrollado múltiples pigmentos reflectivos NIR para su implementación en materiales fríos con color. Por su parte, Primo et al., (2019), sintetizaron pigmentos verdes a base de ZnO con menor contenido de Co. Se comprobó que dichos pigmentos verdes presentan una excelente reflectancia solar total mayor al 30% en polvo, y al ser dispersos en pintura, se presentó un incremento, manteniéndose superior al 50%. Así mismo, con el empleo en conjunto de Zn y menor contenido de Co, se consiguió a su vez, un pigmento frío verde, con una reflectancia muy similar, de 33.20% (Zhou et al., 2020). Por su parte, para también desarrollar un pigmento reflectivo de color verde, se utilizó ZnO y YInO_3 y con ello se obtuvo una reflectancia NIR de 75.5% para su aplicación en cubiertas (Fedel et al., 2023).

Por otro lado, también se han desarrollado pigmentos reflectivos azules con el empleo de ZnO , consiguiendo una reflectancia solar total de 74.21% y una reflectancia NIR de 87.64%. Las tonalidades de azul obtenidas fueron ocre, cian y azul profundo (Rosati et al., 2021a). Así mismo, con el empleo del zinc, se desarrolló un pigmento para un material frío de color azul, con exhibe una alta reflectancia solar en el infrarrojo cercano, mayor al 60% (de Oliveira et al., 2023).

Por su parte, al sintetizar los nanomateriales ZnAl_2O_4 se puede obtener una alta reflectancia solar comparada con otros a base solamente de TiO_2 , con el objetivo de poder ser empleados como una alternativa de pigmentos blancos no-tóxicos para reducir el calentamiento en edificios con su empleo en materiales de color claro. Así mismo, el empleo de recubrimientos fríos blancos de una sola capa permite el enfriamiento en techos de concreto armado, permitiendo conseguir una reflectancia solar total hasta de un 85%, al calcinar los reactivos químicos a 1100°C . (Sameera et al., 2019). Por su parte, el empleo de ZnTiO_3 , permitió el desarrollo de un pigmento reflectivo NIR para techos y fachadas con una reflectancia solar total de 81.2%, una reflectancia en el NIR de 81.2%, en el UV de 27.4% y en el VIS de 82.8% (Wang et al., 2023).

2.3.7. Pigmentos de metales postransicionales

Los pigmentos dentro de esta categoría están conformados por elementos postransicionales que permiten el desarrollo de materiales fríos con color. Con el BiVO_4 (vanadato de bismuto), se han podido desarrollar pigmentos postransicionales para su aplicación en techos de edificios con una reflectancia NIR de 70% (Yuan et al., 2018). Así mismo, con el empleo en conjunto de BiVO_4 y ZrO_2 , se desarrolló por medio de una ruta de síntesis de bajo costo para aplicaciones sustentables. Con dicho pigmento, se alcanzó una reflectancia NIR de 82%, demostrando su efectividad para el desarrollo de materiales fríos con color (Riyas et al., 2023).

Así mismo, el empleo de Al es comúnmente para la elaboración de pigmentos postransicionales. La preparación de pigmentos reflectivos NIR con $\text{CaAl}_{12}\text{O}_9$, utilizando mineralizadores (ZnO , TiO_2), y su aplicación sobre láminas de aluminio, redujo la temperatura superficial a 15.1°C (Ianoş et al., 2022). Por su parte, se han desarrollado múltiples pigmentos a base de Al con una baja absorción y en el NIR de color negro, rojo, naranja y amarillo, para su aplicación en edificios. La caracterización de estos pigmentos demostró una reflectancia solar total de los pigmentos entre el 0.37-0.53, una reflectancia NIR entre el 0.60-0.66 y una emitancia infrarroja entre el 0.68-0.85 (Kolås et al., 2019). Por su parte, con el empleo de Al_2O_3 se desarrollaron pigmentos amarillos, magenta y azules que permitieron un material de enfriamiento radiativo diurno, debido a su alta reflectancia solar total del 89%. Así mismo, estos pigmentos presentaron un enfriamiento del 1.75°C , 2.67°C y 4.31°C mayor, que otras pinturas del mismo color (Son et al., 2023).

2.3.8. Pigmentos especiales

Dentro de los pigmentos especiales se encuentran aquellos con propiedades innovadoras. Un caso de ellos son los pigmentos luminiscentes, que presentan efectos ópticos basados en su capacidad para absorber la radiación solar y emitirla en luz con una longitud de onda mayor, que puede ser con un retardo temporal (fosforescencia) o sin retardo temporal (fluorescencia). La emisión de la luz comúnmente es en el rango VIS (Pfaff, 2022). Para construir el ahorro energético en las edificaciones, se han implementado pigmentos fosforescentes y fluorescentes a partir del flúor (F) y el fósforo (P). Los resultados obtenidos en la caracterización de los pigmentos, demostraron que los pigmentos fosforescentes presentan valores de luminancia más altos pero que tienden a decaer rápidamente. No obstante, las proporciones adecuadas de la combinación de los pigmentos fosforescentes y fluorescentes emiten una luminancia razonable

con un resplandor más prolongado. La eficacia de estos pigmentos contribuye a su desempeño como solución para mitigación del sobrecalentamiento urbano (Chiatti et al., 2023). Así mismo, se ha conseguido el desarrollo de materiales fluorescentes con el empleo de puntos cuánticos. Estos pigmentos se han implementado en la incorporación de un recubrimiento frío sobre una teja cerámica, alcanzando una reflectancia NIR de 93% y una reducción de la temperatura superficial de 2.5°C (Garshasbi et al., 2020). Así bien, en otro material, al ajustar las propiedades fluorescentes y ópticas de los puntos cuánticos a nano-escala, se logró mejorar el rechazo del calor en un material frío. El tamaño de partícula de los nano-materiales fue entre 835nm-985nm. La reflectancia solar total del recubrimiento presentó un 44% y una emitancia térmica de 0.9 (Garshasbi et al., 2022).

Con el empleo de SiO₂, se ha permitido el desarrollo de materiales de enfriamiento radiativo de bajo costo para su aplicación en techos fríos. Este compuesto por sí solo, permitió una reflectancia solar total de hasta 0.97 y una emitancia infrarroja de hasta 0.89 en un material frío. Con ello se logró reducir la temperatura superficial hasta 12°C (Carlosena et al., 2021). Así mismo, su empleo permite alcanzar una emisividad térmica en la ventana atmosférica (8-13µm) reduciendo así, la temperatura superficial hasta 4.7°C (Feng et al., 2022). De igual forma, combinando el empleo de sílice con sodio, para obtener siliceto de sodio (Na₂SiO₃), para su empleo en un material DRC, se logró reducir la temperatura de una cubierta entre 8°C y 12°C. Por otro lado, utilizando aerogel de sílice, se logró conseguir la elaboración de un material de cambio de fase. Con su aplicación en edificios residenciales se consiguió un ahorro energético mensual de 2,510 kW (El-Awadly & Abdel-Rehim, 2021).

2.3.9. Pigmentos lantánidos

Dentro de los compuestos lantánidos, CeO₂ ha sido de los mayormente empleados en múltiples estudios. Al dopar hierro y tungsteno con lantano y cerio, se logró desarrollar un material frío con color con una reflectancia solar NIR de 71.01% (J. Chen et al., 2018). Así mismo, a partir de óxido de cesio, praseodimio, neodimio y erbio, se logró obtener una alta reflectancia solar NIR del 95.28%, también para la elaboración de un material frío con color (Xiao et al., 2021). Por otra parte, con el desarrollo de un pigmento inorgánico frío a base de HE-RE₆MoO₁₂, se logró elaborar un material frío aislante con color, en donde se comparó la conductividad térmica de los pigmentos de HE-Re₆MoO₁₂, siendo de 1.05-1.16 Wm⁻¹ K⁻¹, lo

cual fue un 40%-15% menor que el compuesto RE_6MoO_{12} . La reflectancia solar máxima obtenida fue de 96.10% y la reflectancia en el NIR fue de 98%. Con ello, se concluyó que el material frío analizado presenta características necesarias para su aplicación en la obtención de una eficiencia energética en edificios (Zheng et al., 2023). Así mismo, los pigmentos lantánidos presentan el potencial para desarrollar materiales fluorescentes. A partir de aluminato de estroncio dopado con europio se logró desarrollar un material fluorescente con una reflectancia solar total de 0.41 y una emitancia térmica de 0.87 (Chiatti et al., 2022).

2.3.10. Pigmentos de metales alcalinotérreos

A partir de estos pigmentos, se pueden desarrollar materiales fríos de color claro, con color, de enfriamiento radiativo diurno, fluorescentes, de cambio de fase, y los únicos que permitieron la elaboración de materiales retrorreflectivos dentro de la RS. Uno de los compuestos más destacados basados en elementos alcalinotérreos es el $BaSO_4$. Con la combinación de partículas de $BaSO_4$, $CaCO_3$ y SiO_2 se logró elaborar un material de enfriamiento radiativo diurno. El material demostró una reflectancia de 97.6%. Así mismo, en una prueba exterior, la temperatura promedio durante el día fue de 8.3 °C, mucho menor que la temperatura del aire y 5.5 °C menor que las pinturas blancas comerciales (Dong et al., 2022). Por otro lado, solamente con el empleo de $BaSO_4$, se ha conseguido desarrollar un material de cambio de fase y otro de enfriamiento radiativo diurno. Con el desarrollo del material de cambio de fase para pinturas en techos fríos, se consiguió una reflectancia solar total de 0.813 (Atiganyanun et al., 2023). Por su parte, con el material de enfriamiento radiativo diurno, se alcanzó una reflectancia solar aún mayor, de 97.6% y una emitancia térmica idónea de 0.94 (Yang et al., 2023).

Por su parte, el empleo de $BaTiO_3$ ha permitido el desarrollo de dos materiales retrorreflectivos para su aplicación en entornos urbanos. Con uno de estos materiales retrorreflectivos a base de titanato de bario, para su aplicación en cañones urbanos, se alcanzó una reflectancia solar de hasta 39% (Morini et al., 2018). El otro material retrorreflectivo, se desarrolló a partir de $BaTiO_3$ y Al, consiguiendo una reflectancia de 50.6% (Castellani et al., 2020). Así mismo, este compuesto, ha permitido el desarrollo de un material de color claro para su aplicación en edificios y con ello reducir las cargas térmicas. Este material presentó una reflectancia NIR de 76.14% y una reducción de la temperatura superficial de 10 °C (Xiang & Zhang, 2018).

El carbonato de calcio (CaCO_3) es un compuesto químico inorgánico natural que ha permitido el desarrollo de materiales fríos, en conjunto con otros compuestos o por sí solo (Dong et al., 2022; Li et al., 2020; Mayta et al., 2023; Tang et al., 2023; Wu et al., 2020). Por sí solo, se logró desarrollar una pintura acrílica blanca para un material de enfriamiento radiativo, para su aplicación en techos de edificios. Con una concentración de 60% CaCO_3 , y un tamaño de partícula de 1,744-408.4 μm de largo y 500nm-95.9nm en diámetro, se logró alcanzar una alta reflectancia solar total de 95% y una alta emitancia térmica de 0.94 en la ventana atmosférica. Con ello, fue posible mantener debajo de la temperatura ambiente 10°C durante la noche y al menos 1.7°C en el pico más alto de la radiación solar en un edificio (Li et al., 2020). Por otro lado, el desarrollo de pigmentos termocrómicos, se ha podido llevar a cabo a partir de carbonato de calcio de alta pureza, para la síntesis de KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, H_2O , CaSO_4 y NaOH . Las muestras de los pigmentos presentaron un cambio de color al alcanzar la temperatura de 31°C . Su aplicación en materiales a base de cemento representó que para lograr una buena estabilidad en ambos materiales es necesario una baja concentración de iones de potasio (Perez et al., 2020).

Así mismo, se ha podido desarrollar materiales fluorescentes a partir de cristales alcalinotérreos dopados con elementos lantánidos. Con ello, se consiguió una absorbancia solar total de 0.023-0.218, reduciendo así la temperatura superficial en 0.5°C (Fabiani et al., 2022). A su vez, el desarrollo de materiales fríos de color claro, se ha podido por medio de pigmentos a base de fluoruro de calcio, con un tamaño de partícula entre 58 nm-1000nm, obteniendo una reflectancia solar total de 0.98, y con alginato de calcio, en donde se logró reducir la temperatura superficial por 13°C (Huang et al., 2020; Ji et al., 2022).

2.3.11. Métodos de síntesis de pigmentos inorgánicos

Existen diversos métodos de síntesis para la producción de pigmentos inorgánicos NIR, y dependiendo del tipo de método es el tamaño de partícula obtenido, lo cual influye directamente en las propiedades ópticas (Velooso et al., 2021). Dentro de los métodos mayormente empleados en la revisión de la literatura, destacan los siguientes: método de reacción en estado sólido (SSR), método sol-gel (SG), método de precipitación (P), método co-precipitación (CP), método hidrotermal (H), método de deposición química líquida (QLD), método de ultrasonificación (U) método de gelatinización (G), método de combustión (CO) y método de molino de bolas (BM). Tomando en cuenta la revisión sistemática, solamente el 33.75% de los artículos reportaron el

uso de uno de estos métodos para la síntesis de pigmentos inorgánicos reflectivos NIR. Con el método de reacción en estado sólido, se desarrollaron pigmentos de titanio, alcalinotérreos y lantánidos, solamente para la elaboración de materiales CC. La temperatura de calcinado más baja reportada para este método fue de 700°C, mientras que la más alta fue de 1600°C, y los periodos fueron entre 4 a 44 horas. Con este método, se consiguió un tamaño de partícula entre 0.1µm -5µm, y se logró alcanzar una TSR de 0.96 y una reflectancia NIR de 0.98 con pigmentos lantánidos (Tang et al., 2023; Ullah et al., 2019; Xiao et al., 2021; Zheng et al., 2023). Por otro lado, con el método sol-gel, se sintetizaron pigmentos de hierro y zinc para el desarrollo de CC y LC, mientras que con la síntesis de pigmentos alcalinotérreos se elaboró un PCM. El rango de temperatura de calcinado para este método oscila entre 60-1100°C con un periodo máximo de 24 horas y mínimo de 2 horas. Solamente en dos estudios, se reportó el tamaño de partícula obtenido, el cual fue de 25nm-30nm con un pigmento de zinc, y un diámetro de 0.56µm± 0.07µm con un pigmento alcalinotérreo. Con el método sol-gel, se logró obtener en los estudios una TSR entre 0.63-0.85 y una reflectancia NIR entre 0.75-0.87. Solamente un artículo reportó el valor de emitancia térmica, siendo de 0.57 con un pigmento de hierro (Dippong et al., 2021; Fedel et al., 2023; Rosati et al., 2021a; Sameera et al., 2019; Wang et al., 2023).

En cuanto al método de precipitación, dentro de la RS se desarrollaron pigmentos de hierro y metales postransicionales para elaborar materiales CC. Este método también implica un calcinado, en donde se manejó una temperatura entre 300-1100 °C y un periodo entre 3-6 horas. Con ello, se obtuvo un tamaño de partícula entre los 20nm y 24 nm. Ninguno de los artículos en este método reportó la emitancia térmica, sin embargo, se consiguió una reflectancia solar total máxima de 0.83 y una reflectancia en el infrarrojo cercano de 0.97 (Lee et al., 2021; Riyas et al., 2023; Elakkiya & Sumathi, 2022). Por su parte, con el método de co-precipitación, fue posible elaborar pigmentos de zinc y de hierro, y de igual forma, se desarrollaron solamente materiales CC. Este método también implica un calcinado, y dentro de la revisión de los manuscritos se encontró que se utiliza un rango entre 700°C-1050°C por 30 min a 4 horas, obteniendo así un tamaño de partícula entre 3 µm-20µm. Con el método de co-precipitación, se reportó solamente una TSR hasta 0.70 y una reflectancia NIR mínima de 0.60 y máxima de 0.87, mientras que no hubo evidencia del valor de emitancia térmica (de Oliveira et al., 2023; Elakkiya & Sumathi, 2022; Zhang et al., 2022). Para la síntesis de pigmentos especiales, el único método común reportado fue el método hidrotermal, para la elaboración de CC material, con un

calcinado a 1000°C por 3 horas y un tamaño de partícula de 223 nm ±12nm. Sin embargo, ninguna propiedad óptica fue reportada (Hosseini & Ghasemi, 2020). Por otro lado, con este método se desarrolló un pigmento alcalinotérreo, elaborando así un LC material, obteniendo un tamaño de partícula de 58nm-1000nm y una TSR de 0.98 (Huang et al., 2020).

Por otro lado, el método de deposición química líquida fue utilizado para la síntesis de pigmentos postransicionales para la elaboración de materiales CC. Este método no requiere ningún proceso de calcinación, pero se puede obtener un tamaño de partícula entre 2-120 μm y con ello obtener una reflectancia NIR de hasta 0.95 (Gao et al., 2018). De igual forma, el método ultrasonicación no implica un proceso de calcinación. Con este método se pudieron elaborar dos materiales DRC, por medio de pigmentos de titanio y alcalinotérreos, utilizando dióxido de titanio, sílice y carbonato de calcio. Utilizando el método de ultrasonicación, se obtuvo una TSR mayor a 0.95 en ambos materiales, y solamente con el empleo de CaCO₃ se reportó un tamaño de partícula de 1,744μm-408.4μm y 500nm-95.9nm de diámetro (Fan et al., 2023; Li et al., 2020). En cuanto al método de gelatinización y de combustión, solamente se reportó la síntesis de un pigmento de por cada uno, para la elaboración de materiales LC. Por su parte, con el método de molino de bolas se elaboró un material CC y un LC. Los 3 métodos utilizaron un rango de temperatura oscilando entre 600-1550°C. Con estos métodos se obtuvo una TSR máxima de 0.71 y la reflectancia NIR más alta fue de 0.75. Además, el tamaño de partícula obtenido fue entre 50nm-450nm. La Tabla 6 muestra la correlación de los métodos de síntesis empleados para el desarrollo de pigmentos con el objetivo de elaborar distintos materiales fríos.

Tabla 6
Métodos de síntesis para pigmentos fríos

Método de síntesis	Tipo de pigmento	Tipo de material	Compuesto	Calcinación temperatura	tiempo	Tamaño de partícula	Valor de las propiedades ópticas	Referencia
Reacción en estado sólido (SSR)	TP	CC	Na ₂ Ti ₃ O ₇	700°C, 800°C	44hrs	100nm y 1μm	0.94 ¹	(Ullah et al., 2019)
	AEP		Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH	900°C	24hrs	4 μm-5μm	0.63 - 0.91 ²	(Tang et al., 2023)
	REP		LiRE(MoO ₄ +δ) ₂	800°C	220min	2μm	0.95 ¹	(Xiao et al., 2021)
			RE ₆ MoO ₁₂	1600°C	4hrs	NM	0.65 - 0.96 ¹ 0.81 - 0.98 ²	(Zheng et al., 2023)
Sol-gel (SG)	IP ^a		MFe ₂ O ₄ (M = Co, Ni, Zn, Mn, Cu)	900°C	12hrs	NM	0.63 ¹	(Dippong et al., 2021)
	ZP		YIn _{0.9} Mn _{0.1} O ₃ -ZnO	550°C, 800°C y 850°C	NM	NM	0.74 ¹ 0.87 ²	(Rosati et al., 2021)

			YInO ₃ -ZnO	550°C, 650°C, 750°C, 800°C y 850°C	2hrs	NM	0.75 ²	(Fedel et al., 2023)
		LC	ZnAl ₂ O ₄ y TiO ₂	600°C, 700°C 800°C y 1100°C	6hrs	25nm-30nm	0.85 ¹ 0.86 ²	(Sameera et al., 2019)
			ZnTiO ₃	600°C, 700°C 800°C, 850°C y 900°C	3hrs	NM	0.79 ¹ 0.81 ²	(Wang et al., 2023)
	AEP	PCM	BaSO ₄	60°C	24hrs	Diametro de 0.56µm±0.07µm	0.81 ¹	(Atiganynun et al., 2023)
Precipitación (P)	IP	CC	Fe ₂ O ₃ /TiO ₂	500°C a 800°C	3hrs	20nm-30nm	0.67 ¹ 0.97 ²	(Lee at el., 2021)
	PTP		YPO ₄ , Bi, V	300°C, 500°C y 900°C a 1100°C	6hrs	98nm	0.83 ¹	(Elakkiya and sumathi., 2022)
			BiVO ₄ /ZrO ₂	600°C	6hrs	193nm-247nm	0.96 ²	(Riyas et al., 2023)
Co-precipitación (CP)	ZP	CC	ZnS _x Se _z /ZrSiO ₄	1050°C	30min	3-10µm	0.70 ¹ 0.87 ²	(Zhang et al., 2022)
			Zn _{1-x} Co _x O	1000°C	NM	60nm-100nm	0.33 ²	(Zhou et al., 2020)
			ZnAl ₂ O ₄ :Co, Nd	1000°C	1hrs	20 µm	0.81 ²	(Oliveira et al., 2023)
	IP		FePO ₄ , V, Bi	700°C	4hrs	NM	0.60 ²	(Elakkiya and sumathi., 2022)
Hydro-thermal (H)	AEP	LC	Ca _{0.5} Mg _{10.5} (HPO ₃) ₈ (OH) ₃ F ₃	NM	NM	58nm-1000nm	0.98 ¹	(Huang et al., 2020)
	SP	CC	MgAl-LDH@SiO ₂ @CoAl ₂ O ₄	1000°C	3hrs	223nm±12nm	NM	(Hosseini & Ghasemi., 2020)
Deposición química líquida (QLD)	PTP		BiOBr _{1-x} I _x	NM	NM	2 µm-4µm	0.95 ²	(Gao et al., 2018)
			BiOCl _{1-x} I _x	NM	NM	120µm	0.94 ²	(Gao et al., 2018)
Ultra-sonicación (U)	TP	DRC	TiO ₂ , SiO ₂	NM	NM	NM	0.97 ¹	(Fan et al., 2023)
	AEP		CaCO ₃	NM	NM	1,744-408.4µm y 500-95.9nm de diametro	0.95 ¹	(Li et al., 2020)
Gelatini-zación (G)	ZP	CC	ZnO y Co	600°C, 800°C y 1000°C	NM	50 nm	0.50 ¹ 0.39 ²	(Primo et al., 2019)
Combustión (CO)	PTP		CaAl ₂ O ₉	1000°C 1300°C-1550°C	3hrs 12hrs	360nm y 450nm	0.71 ¹	(Ianos et al., 2022)
	TP		TiNiY	650°C	5hrs	150nm a 450nm	0.75 ²	(Zeng et al., 2018)



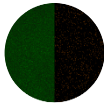



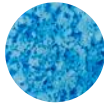



Molino de bolas (BM)	LC	TiO ₂	700°C-1500°C	1hr	100 nm	0.522 ¹	(Cao et al., 2023)
----------------------	----	------------------	--------------	-----	--------	--------------------	--------------------




Tipo de pigmento: TP (pigmentos de titanio), IP (pigmentos de hierro), ZP (pigmentos de zinc), PTP (pigmentos de metales postransicionales), REP (pigmentos lantánidos), AEP (pigmentos alcalinotérreos), SP (pigmentos especiales) **Tipo de material:** LC (color claro), CC (color frío), RR (retroreflectivos), DRC (enfriamiento radiativo diurno), TC (termocrómico), PCM (material de cambio de fase), FL (Fluorescente), SCM (material súper frío) **Valor de las propiedades ópticas:** reflectancia solar total¹ y reflectancia NIR². NM (no mencionado)

2.3.12. Evaluación del impacto energético con la aplicación de pigmentos fríos

Con el uso de pigmentos de titanio, se logró disminuir la demanda de refrigeración en 17.2-54.5%, con un material termocrómico aplicado en un edificio educacional en Toronto (Berardi et al., 2020). Además, con el empleo de materiales fríos con color aplicados en edificios residenciales, se consiguió un ahorro energético anual del 12.9% con el uso de pigmentos de hierro, y con el uso de pigmentos a base de zinc, se logró reducir el consumo energético en refrigeración por 2.138 kWh/m² (Rong et al., 2020). Por otro lado, con el empleo de una pintura acrílica a base de carbonato de calcio, para el desarrollo de un material de enfriamiento radiativo, se demostró un ahorro de energía de 70-105 Wh/m² por día, suponiendo que la eficiencia media de la red de corriente alterna (AC), sea de 15, y considerando una irradiación solar total de 5,000 Wh/m² por día (Li et al., 2020). Tomando en cuenta, otro material a base de pigmentos alcalinotérreos, aplicados en un material frío de color claro en el techo de una casa residencial de tamaño medio, se reduce a la mitad el consumo energético, comparado con otra casa con las mismas características, al mantener la temperatura interior a 20°C (Ji et al., 2022). Por último, con el empleo de los pigmentos especiales, también se ha logrado conseguir un ahorro energético. Con estos pigmentos, empleados en materiales de cambio de fase en edificios residenciales, se consiguió un ahorro mensual de 2510 (kW), mientras que en un material termocrómico aplicado en ventanas en un edificio de oficina, se obtuvo un ahorro de energía de hasta 324.6 MJ m⁻² (Wang et al., 2021). La Tabla 7 muestra la correlación de los tipos de pigmentos empleados en la elaboración de materiales fríos, el tipo de aplicación, los valores de las propiedades ópticas y la disminución de la temperatura de distintas superficies urbanas con su empleo, y finalmente, el ahorro energético obtenido.

Tabla 7
Impacto energético obtenido con la implementación de pigmentos fríos

Tipo de pigmento	Compuesto	Tipo de material	Color de muestra	Aplicación	Valor de propiedad es ópticas			Reducción de temperatura de superficie de máxima (° C)	Impacto energético	Referencia
					TSR	R _{NIR}	ε			
Pigmentos de titanio	TiO ₂ , CaMg(CO ₃) ₂	LC		muros	0.85	NM	0.55 - 0.80	NM	8.5%	(Dantas, 2022)
	TiO ₂	TC		muros/ techos	0.88	0.45	0.90	25°C en techos 15°C-20°C en muros	8.9% (reducción de la demanda energética para refrigeración)	(Berardi, 2020)
Pigmentos de hierro	SiO ₂ , TiO ₂ , Cr ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	CC		muros	0.64	0.73	0.61 - 0.67	7°C	NM	(Qi, 2022)
	Fe ₂ O ₃ , TiO ₂	CC		muros	0.62	0.97	NM	7.8°C	23.8%	(Lee, 2021)
Pigmentos de zinc	ZnSxSe/ ZrSiO ₄	CC		muros	0.70	0.87	NM	7.2°C	2.138 kWh/m ² (reducción en el enfriamiento anual)	(Zhang, 2022)
	ZnTiO ₃	LC		muros/ techos	0.79	0.81	NM	6.8°C	1.8 kWh/m ² (reducción en el consumo energético)	(Wang, 2023)
Pigmentos postransicionales	CaAl ₁₂ O ₉	CC		NM	0.71	NM	NM	15.1°C	NM	(Ianos, 2022)
	Al	CC		muros/ techos	0.37 - 0.53	0.60 - 0.66	0.68 - 0.85	11.5°C	NM	(Kolås, 2019)
Pigmentos alcalino-térreos	CaCO ₃	DRC		techos	0.95	0.70	0.94	10°C por la noche 1.7°C	40-75 Wh/m ² (Daily)	(Li, 2020)
	BaSO ₄	DRC		muros	0.97	0.96	0.94	8.9°C	10 kw (poder de enfriamiento)	(Yang, 2023)

Pigmentos lantánidos	RE ₆ MoO ₁₂	CC		muros, techos	0.65 - 0.96	0.81- 0.98	1.05 -1.16	18.39°C	NM	(Zheng, 2023)
	LiRE(MoO ₄ ⁺ δ) ₂	CC		muros, techos	NM	0.95	0.60	10 °C	NM	(Xiao, 2021)
Pigmentos especiales	SiO ₂	DRC		techos	0.70- 0.97	0.78	0.34 -0.89	1.7°C - 12 °C	21% (reducción en el consumo energético)	(Carlosena, 2021)
	QDs	FL	NM	techos	0.44	NM	0.90	NM	NM	(Garshasbi, 2022)

Tipo de material: LC (Color claro), CC (Color frío), DRC (Enfriamiento radiativo diurno), TC (Termocrómico), FL (Fluorescente) **Método de síntesis:** SSR (Reacción en estado sólido), SG (Método Sol-Gel), P (Método de precipitación), CP (Método de co-precipitación), U (Ultrasonificación), CO (Método de combustión), NM (No se menciona)

2.4. Técnicas de caracterización

2.4.1. Espectrofotometría de reflectancia difusa

Existen diversos métodos para mediar la reflectancia solar o la emitancia infrarroja de una superficie. Los principales son por medio del Consulado Europeo de Techos Fríos (ECRC¹⁰) y el Consulado de la Valuación de Techos Fríos de Estados Unidos Americanos (CRRC¹¹) los cuales conllevan estándares específicos y técnicos. La reflectancia solar, dependiendo del material y la aplicación específica, puede ser medida por medio de un espectrofotómetro, un reflectómetro y con un piranómetro. El primer método involucra un espectrofotómetro equipado con una esfera integrada. Este método puede medir el total de la reflectancia hemisférica espectral, ya que integra una esfera que recolecta tanto la radiación especular como la difusa, en un área pequeña (aproximadamente de 0.1cm²) en una muestra plana y uniforme, por medio de un rango espectral aproximado de 250nm a 2500nm. La medición de la reflectancia solar con

¹⁰ European Cool Roofs Council, por sus siglas en inglés

¹¹ Cool Roof Rating Council, por sus siglas en inglés

un reflectómetro solar portable es por medio de una superficie plana y uniforme de unos cuantos centímetros cuadrados. Este equipo mide la reflectancia hemisférica cercana-normal al iluminar una superficie con una luz difusa y una luz sensorial reflejada en una incidencia cercana-normal. Para las mediciones en sitio (superficies grandes) de la reflectancia solar, se puede utilizar un piranómetro. Este procedimiento requiere el montaje del piranómetro en un tripie a una altura de 50cm por encima de la superficie para minimizar el efecto del sombreado (Santamouris & Kolokotsa, 2016).

2.4.2. Termografía infrarroja

Para medir la emitancia infrarroja de una superficie se puede utilizar equipos portables (emisómetros) que pueden medir la emitancia hemisférica en un rango de 5-80 μm , aproximadamente. Por otro lado, existen lámparas infrarrojas para poder simular la radiación solar y obtener resultados en laboratorio. Rosati et al. (2021) realizaron un estudio para comparar la efectividad de 3 diferentes fuentes de radiación (una lámpara emisora infrarroja incandescente, una de halógeno de tungsteno y una de arco de xenón) en la evaluación del comportamiento térmico reflectivo de recubrimientos fríos en techos. Las evaluaciones térmicas se compararon con el desempeño obtenido en la exposición natural de la luz solar. De esta manera se determinó que instrumento es el mejor simulador del sol en términos de temperatura y emisiones espectrales. Con ello, se obtuvo que la lámpara de arco de xenón es la que cumple con las exigencias solicitadas. Zhang et al. (2022), Rong et al. (2020) y Lee et al., (2021) utilizaron lámparas infrarrojas para simular la luz solar y con ello representar visualmente la distribución de la temperatura de la superficie de recubrimientos fríos. De esa forma, se pudo determinar el desempeño de los materiales en la reflectancia NIR.

Para poder evaluar el desempeño térmico de una superficie en donde un material frío fue aplicado, la temperatura de la superficie debe ser medida. Para ello, se pueden utilizar distintos sensores. Al momento de colocar el sensor en la superficie, este no debe estar expuesto directamente a la radiación incidente y las características ópticas de la cara superior del sensor deben ser similares a las de la superficie analizada. A su vez, se puede utilizar un termómetro infrarrojo para medir la temperatura de la superficie y calcular un valor promedio para medir una superficie más grande (como un techo). También se puede utilizar una cámara infrarroja

para poder observar la distribución de la temperatura de la superficie de las muestras y así mismo, representar las diferencias de temperatura entre estas (Santamouris & Kolokotsa, 2016).

2.4.3. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

La espectroscopía infrarroja es una técnica que permite el análisis de la absorción o emisión de energía radiante que es generada por la interacción entre la radiación y el material estudiado. Esta técnica está basada en el hecho de que las moléculas pueden rotar y vibrar a distintas frecuencias (modos comunes vibracionales). Una molécula puede tener la capacidad de absorber la energía de fotones en el rango del espectro IR cuando exista una diferencia en el momento bipolar de la molécula mientras se presenta un movimiento vibracional rotacional y cuando la frecuencia relacionada con la radiación resuena con este movimiento (Piqué & Vazquéz, 2012). Los componentes de los enlaces químicos presentan movimientos vibracionales con frecuencias naturales en el rango de frecuencias del infrarrojo, los cuales se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8
Longitud de onda para distintos rangos del espectro infrarrojo

Rango del espectro IR	Longitud de onda (cm ⁻¹)
Lejano	10 a 650
Medio	650 a 4000
Próximo	4000 a 12500

Nota. Elaborada a partir de Piqué & Vazquéz (2012).

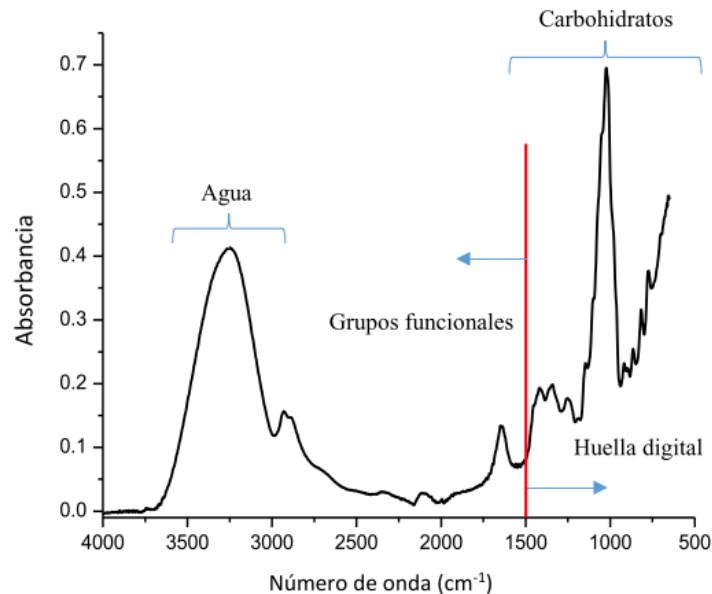
Existen modos vibracionales que producen oscilaciones que pueden entrar en resonancia con un haz de luz del IR. Lo anterior, genera un intercambio de energía entre el haz y las moléculas asociadas. Así mismo, existe un comportamiento propio de cada enlace con un tipo atómico, un entorno químico y una concentración de enlaces determinados. Por lo que, dentro del espectro IR, es posible que se manifiesten bandas asociadas a la gran mayoría de los compuestos moleculares. Cada una de estas bandas corresponde a un movimiento de vibración de uno de los enlaces dentro de una molécula, los cuales en conjunto constituyen a la huella dactilar del compuesto. Lo anterior implica que, cada compuesto presentará un comportamiento particular frente a la radiación de infrarrojos, lo que asegura la eficacia de la espectroscopía IR (Piqué & Vazquéz, 2012).

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR¹²), provee una medición espectral detallada de la emitancia en función de la longitud de onda, λ . Cabe mencionar que muchas incertidumbres están involucradas al medir la emisividad o la absorptividad, como las variables de temperatura y la geometría de la superficie (Santamouris & Kolokotsa, 2016). Los resultados obtenidos en este tipo de análisis están dados por el espectro infrarrojo, el cual se subdivide en zonas principales para la interpretación de los datos obtenidos. La Figura 22 muestra el espectro infrarrojo de la miel de abeja como ejemplo, en donde se observa las diferentes zonas en las que se subdivide dicho espectro (Cortéz, 2020). En este ejemplo se muestran los resultados obtenidos de la absorbancia, sin embargo, esta subdivisión de zonas también se hace al medir la transmitancia en FT-IR, en donde los picos se muestran de manera inversa.

En la gráfica obtenida por los resultados del FT-IR, el eje de las X's indica la intensidad de la radiación infrarroja con respecto a cierto número de longitud de onda (cm^{-1}) y en el eje de las Y's, indica la intensidad de la radiación infrarroja absorbida o transmitida. En términos generales, el espectro infrarrojo se subdivide en dos grandes partes. La primera zona está entre los 4000cm^{-1} - 1500cm^{-1} , en donde los picos se generan por vibraciones de enlaces presentes en las moléculas, denominadas como grupos funcionales. La segunda zona se encuentra entre los 1500cm^{-1} - 500cm^{-1} , denominada como la región de la huella digital o dactilar, en donde se presentan varias vibraciones de enlaces presentes en la estructura de una o varias moléculas, siendo estructuras únicas de cada molécula o grupo de moléculas (Cortéz, 2020).

¹² Fourier Transform Infrared Spectroscopy, por sus siglas en inglés

Figura 22
Espectro infrarrojo de la miel de abeja



Nota. Obtenida de Cortéz, (2020).

2.4.4. Espectrofotometría para análisis de absorbancia UV-VIS

La absorbancia es una medida de la radiación que absorbe una sustancia cuando sobre la misma inciden las ondas electromagnéticas. La absorbancia varía según la composición y la concentración de los elementos en una muestra, generalmente medida en la química analítica para la caracterización de líquidos y gases. Al medir la absorbancia a una longitud de onda específica se le determina como colorimetría a dicha técnica, mientras que al usar todas las longitudes de onda del espectro electromagnético se le nombra espectrofotometría. La absorbancia se puede calcular con relación a las intensidades de la luz transmitida y recibida por la muestra. La interacción de la longitud de onda absorbida por la muestra depende de cómo es el acople de la radiación electromagnética con la estructura molecular del sistema (Salgado & Vargas, 2014).

Al momento en que la luz interacciona con la superficie de algún material se pueden presentar los siguientes procesos: Reflexión (I_R), Absorción (I_A) y Transmisión (I_T), los cuales están fundamentados en la conservación de la energía a través de la siguiente Ecuación 9:

Ecuación 9

Cálculo de la absorbancia

$$I_0 = I_R + I_T + I_A$$

2.4.5. Análisis de difracción de rayos X (XRD)

La difracción de rayos x (XRD¹³) es una herramienta utilizada para el análisis de la composición de minerales, aleaciones, metales, materiales catalíticos, ferroeléctricos y luminiscentes, entre otros más. Es un análisis empleado comúnmente en el estudio de materiales en distintas nanociencias, ya que la información obtenida por el difractograma permite determinar la estructura cristalina y la composición de un material, así como el tamaño de grano. Este difractograma se conforma por reflexiones (picos) relacionados a las distancias de dimensiones nanométricas entre familias de planos de átomos (Aparicio & Carvajal, 2010).

Los principales componentes de un difractómetro, son el tubo de rayos x con ánodo de cobra, el cual contiene un sistema cerrado de enfriamiento (agua), rejillas, monocromador y un detector. El detector está conformado por xenón, un tipo de gas necesario para detectar la radiación de longitud de onda larga. Los rayos x generados en el tubo, están en una ampolla al vacío que mantiene al electrodo positivo (ánodo) y al negativo (cátodo). El cátodo a su vez, contiene un filamento de tungsteno en donde se trasladan los electrones, generados por una diferencia de potencial de 45,000 voltios, que hacen contacto con el blanco de cobre. Estos electrones producen los rayos x de fondo que atraviesan por una ventana de berilio que da el paso a los rayos x. Con esto, se obtiene la información acerca del sistema cristalino al que corresponde el compuesto y los parámetros de celda, que es la unidad mínima con que se organiza un cristal. Con las intensidades de las reflexiones es que se obtiene la distribución de los átomos dentro de la celda (análisis estructural). La geometría de los picos o máximos de difracción, son lo que finalmente determinan el tamaño de los cristales (Aparicio & Carvajal, 2010).

¹³ X-Ray Diffraction, por sus siglas en inglés

2.4.6. *Análisis mecano-óptico de topografía (AFM)*

La Microscopia de Fuerza Atómica (AFM¹⁴) es una técnica que se basa en la construcción de imágenes digitales con la medición de las fuerzas de atracción y de repulsión entre los átomos de una punta y los de la superficie analizada. Para llevar a cabo la medición, la punta se coloca en el extremo libre un cantiléver. Las fuerzas entre la punta y la superficie de la muestra provocan que el cantiléver se flexione. Un detector media la deflexión a medida que la muestra pasa por la parte inferior de la punta. Esta deflexión es la que se envía como señal de entrada a un circuito retro-alimentación que mueve el escáner en donde se encuentra la muestra hacia arriba o hacia abajo, manteniendo la deflexión del cantiléver constante, lo cual hace referencia a la topografía de la muestra (Guerrero et al., 2000).

El AFM permite el análisis de muestras conductoras y no conductoras, así como sus propiedades espaciales, mecánicas, eléctricas y térmicas. Con ello se puede determinar la topografía de las muestras a nanoescala o a escala atómica, con resolución del orden de Angstroms. Una de las ventajas de esta técnica es que permite analizar la muestra sin necesidad de un secado, deshidratación o deposición en otros materiales previamente (Yaringaño, 2020).

2.5. **Marco normativo**

En México la normatividad está basada en Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de carácter obligatorio, elaboradas por Dependencias del Gobierno Federal, mientras que las Normas Mexicanas (NMX) son de ámbito primordialmente voluntario, las cuales son promovidas por la Secretaría de Economía y el sector privado, a través de los Organismos Nacionales de Normalización (Franco, 2019). En cuanto a los estándares internacionales, la norma 90.1. de la Sociedad Americana de Ingenieros para la Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE¹⁵), es una referencia para los códigos energéticos de los edificios en Estados Unidos y una base fundamental para los códigos normativos mundiales desde hace más

¹⁴ Atomic Force Microscopy, por sus siglas en inglés

¹⁵ American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, por sus siglas en inglés

de 35 años. Así mismo, la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM¹⁶) es considerada un estándar a nivel internacional para el sector de la construcción.

Tomando en cuanto la revisión sistemática realizada en el marco referencial, se identificaron su vez las normas y estándares considerados por los autores en la elaboración y evaluación de materiales fríos. La Tabla 9 muestra la normativa mayormente empleada en dicha revisión. Dentro de las más destacadas se encuentran: ASTM E903, ASTM G173-03, ASTM E891-87 y ASTM G159-98. La norma ASTM E903 es un Método de prueba estándar para absorción, reflectancia y transmitancia solar de materiales mediante esferas integradoras. El estándar ASTM G173-03 son tablas estándar para las irradiancias espectrales solares de referencia: normal directa y hemisférica en una superficie inclinada de 37°. Por su parte, la normativa ASTM E981 presenta Tablas de Irradiancia Espectral Solar Normal Directa Terrestre Tablas de Masa de Aire 1.5. Por último, la norma ASTM G159-98 son tablas estándar para referencias de la irradiación espectral solar en masa de aire 1.5: directa normal y hemisférica para una superficie inclinada de 37°.

Tabla 9
Estándares internacionales en materiales fríos

Autores	Tipo de material	Estándar	Tipo de estudio
(Kolås et al., 2019)	Pigmento frío	ASTM E903, ASTM G173 y ASTM E1980	Laboratorio
(Sameera et al., 2019)	Pigmento frío	ASTM G173-03	Laboratorio
(T. Zhang et al., 2022)	Pigmento frío	ASTM G159-98	Laboratorio/ Simulación
(Chiatti et al., 2022)	Pigmento fotoluminiscente	ASTM E903, ASTM G173 y ASTM E1980	Laboratorio
(Garshasbi et al., 2022)	Puntos cuánticos	ASTM E 903-12	Laboratorio
(J. Zheng et al., 2023)	Pigmento frío	ASTM E981-87 y G173-03	Laboratorio

¹⁶ American Society for Testing and Materials, por sus siglas en inglés

CAPÍTULO 3. MÉTODO

3. Método

3.1. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación conforma el plan estratégico para obtener la información necesaria y con ello contestar las preguntas de investigación y lograr el cumplimiento de los objetivos proyectados. Por lo que, es necesario que el diseño sea preciso, medible y concreto (Hernández et al., 2014).

Tomando en cuenta el presente estudio, la investigación fue de tipo experimental, a partir de una experimentación pura debido a que para constatar la hipótesis fue necesaria la manipulación de las variables mediante los diferentes tamaños de partícula y las relaciones molares de los compuestos inorgánicos para la elaboración de muestras prototipo, características propias de las investigaciones experimentales.

Con respecto al enfoque de la investigación, se optó por un enfoque cuantitativo considerando que los resultados esperados, debían reportarse mediante ciertas longitudes de onda dentro del espectro electromagnético (nm) y como un valor de temperatura (°C). La Figura 23 representa las precisiones metodológicas mencionadas.

Figura 23
Precisiones metodológicas

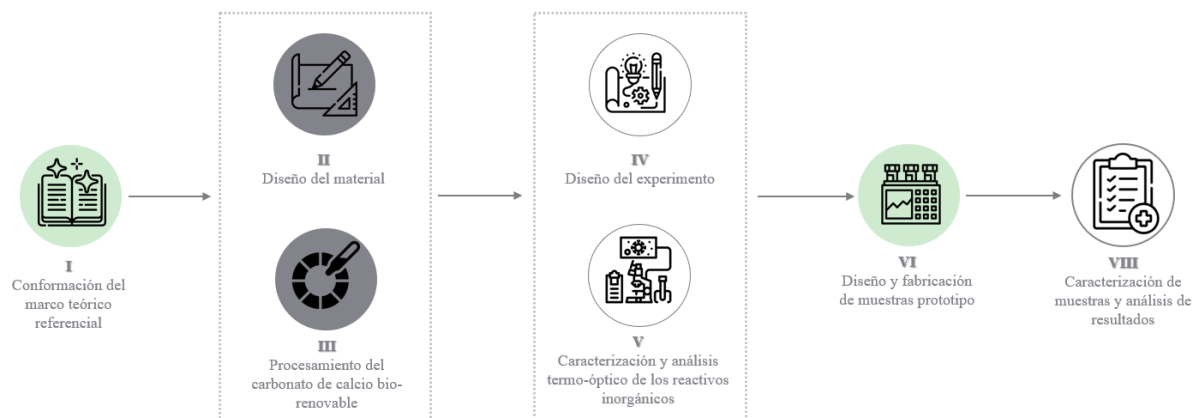


Nota. Elaborada a partir de Morales (2023).

3.1.1. Procedimiento metodológico

El procedimiento metodológico de la presente investigación se conformó por ocho etapas principales. La secuencia cronológica para la realización de cada etapa inició con la conformación del marco teórico (etapa I), el diseño del material (etapa II), el procesamiento del carbonato de calcio bio-renovable (etapa III), el diseño del experimento (etapa IV), la caracterización y análisis termo-óptico de los reactivos inorgánicos (etapa V), el diseño y la fabricación de las muestras prototipo (etapa VI) y, para concluir, caracterización de muestras y análisis de resultados (etapa VII). Lo anterior se representa de forma esquemática en la Figura 24.

Figura 24
Secuencia cronológica del proceso metodológico



Cada etapa contempla una serie de pasos necesarios para el cumplimiento de los objetivos de la investigación. En la etapa I se llevó a cabo: a) la búsqueda de bases de datos, b) la selección y obtención de manuscritos originales pertinentes al estudio, c) la revisión sistemática de la literatura, d) el análisis de tendencias y e) la identificación de las disciplinas que explican la ciencia de los materiales. Con lo anterior, fue posible la elaboración de un marco referencial sólido, con el objetivo de lograr una toma de decisión acertada en las siguientes etapas.

En la etapa II se realizó: a) la definición del elemento urbano arquitectónico, b) la identificación y selección de los compuestos inorgánicos naturales como subproducto del sector terciario en ciudades costeras y c) la identificación y selección de los reactivos inorgánicos para el dopaje del compuesto bio-renovable. Considerando lo anterior, se obtuvo la información necesaria para determinar las características de un material prototipo.

El procesamiento del carbonato de calcio bio-renovable, el cual es la etapa III, se conforma de las siguientes acciones: a) el tratamiento de los exoesqueletos de los moluscos y b) manipulación de la microestructura de CaCO_3 , c) un análisis de difracción de rayos x y d) un análisis mecano-óptico de topografía.

Dentro de la etapa IV en el diseño del experimento se ejecutaron las siguientes actividades: a) el diseño del protocolo para el análisis de la composición química y microestructura, b) el diseño del protocolo para el análisis termo-óptico de los reactivos inorgánicos, c) el diseño del protocolo para la síntesis de los pigmentos inorgánicos y la fabricación de las muestras prototipo y d) el diseño del protocolo para análisis espectrofotometría los recubrimientos fríos.

En la etapa V se desarrolló la caracterización de los reactivos inorgánicos por medio de los siguientes análisis: a) un análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, b) un análisis de absorbancia en espectrofotometría, c) un análisis térmico y d) un análisis de termografía infrarroja.

Para la etapa VI, una de las más importantes, se procedió con el diseño y fabricación de las muestras prototipo por medio de las siguientes actividades: a) la síntesis de los pigmentos inorgánicos a base de CaCO_3 bio-renovable, d) el dopaje del CaCO_3 con Fe_2O_3 , c) la composición de los recubrimientos fríos y finalmente, d) la deposición de los mismos. Finalmente, en la etapa VII, se realizó la caracterización de las muestras prototipo y el análisis de los resultados por medio de a) un análisis de reflectancia en espectrofotometría de los recubrimientos fríos.

Los procesos desarrollados en cada una de las siete etapas de la investigación mencionadas con anterioridad se encuentran descritos en la Tabla 10, de igual forma los instrumentos y las herramientas pertinentes para su ejecución.

Tabla 10
Proceso metodológico de la investigación

Etapas	Procesos	Instrumentos/herramientas
Etapa I. Conformación de marco teórico referencial	a) Búsqueda de base de datos b) Selección de manuscritos originales c) Revisión sistemática de la literatura d) Análisis de tendencias e) Ciencia de materiales: estructura, propiedades, procesos, composición y desempeño	<ul style="list-style-type: none"> • Base de datos Scopus • Base de datos Web of Science •
Etapa II. Diseño del material	a) Definición del elemento urbano arquitectónico b) Identificación y selección de los compuestos inorgánicos naturales como subproducto del sector terciario en ciudades costeras c) Estudio comparativo de reactivos inorgánicos para dopaje del compuesto bio-renovable	<ul style="list-style-type: none"> • Base de datos Scopus • Base de datos Web of Science • Base de datos de Google Scholar
Etapa III. Procesamiento del carbonato de calcio bio-renovable	a) Tratamiento de los exoesqueletos de los moluscos como subproducto b) Manipulación de la microestructura de CaCO_3 c) Análisis de difracción de rayos x d) Análisis mecano-óptico de topografía	<ul style="list-style-type: none"> • Cepillo • Molino • Varilla 1/2" • Horno de sinterización tubular • Mortero de ágata • Difractómetro de rayos X (XRD) • Microscopio de fuerza atómica (AFM) • 1) y 2)
Etapa IV. Diseño del experimento	a) Diseño del protocolo para análisis de la composición química y microestructura b) Diseño del protocolo para análisis termo-óptico c) Diseño del protocolo para la síntesis de los pigmentos inorgánicos y la fabricación de muestras prototipo d) Diseño del protocolo para análisis de espectrofotometría	
Etapa V. Caracterización y análisis termo-óptico de los reactivos inorgánicos	a) Análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier b) Análisis de absorbancia en espectrofotometría c) Análisis térmico d) Análisis de termografía infrarroja	<ul style="list-style-type: none"> • Impresora 3D • Espectrómetro • Espectrofotómetro UV-VIS • Caracterizador térmico • Cámara termográfica • 2) y 3)
Etapa VI. Diseño y fabricación de muestras prototipo	a) Síntesis de los pigmentos inorgánicos a base de CaCO_3 bio-renovable b) Dopaje del CaCO_3 con Fe_2O_3 c) Composición de los recubrimientos fríos d) Deposición de los recubrimientos fríos	<ul style="list-style-type: none"> • Cortadora CNC • Sonicador • Balanza de precisión • Termoplató digital • Instrumento de recubrimiento por centrifugado

Etapa VII. Caracterización de muestras y análisis de resultados	a) Análisis de reflectancia difusa en espectrofotometría	<ul style="list-style-type: none"> • Espectrofotómetro UV-VIS-NIR • Esfera de integración
--	---	---

Nota.

- 1) Software de análisis mecano-óptico Nano surf Easyscan 2
- 2) Software de hojas de cálculo Microsoft Excel
- 3) Software de análisis de imágenes radiométricas FLIR tools

3.2. Diseño del experimento

3.2.1. Objeto y variables de estudio

Una investigación experimental se caracteriza por realizarse en condiciones controladas, considerando únicamente las variables que serán manipuladas como lo permite la situación. Los experimentos en laboratorio deben de crear una situación identificada y definida para observar el comportamiento de las variables. Debido a esto, es que ese tipo de investigaciones se basan en el análisis de las relaciones entre una o más variables independientes y una o más dependientes, y bien los efectos generados de las primeras sobre las segundas (Hernández et al., 2014). El objeto de estudio de la presente investigación fue las propiedades termo-ópticas de recubrimientos fríos a base de carbonato de calcio bio-renovable.

Por lo tanto, al realizar la revisión de la literatura propia del tema, se identificó la tendencia por el análisis de las propiedades ópticas en el estudio de los materiales fríos: reflectancia espectral y la emitancia NIR, correlacionadas con el tamaño de partícula y las proporciones molares de los compuestos inorgánicos en la síntesis de pigmentos reflectivos en la elaboración de recubrimientos fríos.

Considerando lo anterior, se identificaron las variables de la investigación por medio del proceso de operacionalización de variables, como se muestra en la Tabla 11, las variables independientes están conformadas por el tamaño de partícula y la relación molar de los compuestos inorgánicos en la síntesis de los pigmentos reflectivos, así como la concentración de los mismos en el diseño de recubrimientos fríos. Por su parte, las variables independientes corresponden a las propiedades ópticas de las muestras prototipo: reflectancia espectral y emitancia térmica.

Tabla 11
Operacionalización de variables

Variable-Indicador	Tipo de variable	Unidad de medición	Instrumento de medición
Tamaño de partícula	Independiente	µm	Microscopio de fuerza atómica
Relación molar de los compuestos	Independiente	M	Balanza de precisión
Cantidad de reactivos en los compuestos	Independiente	%	Balanza de precisión
Concentraciones de partículas en los compuestos (dopaje)	Dependiente	a.u.	XRD
Reflectancia espectral	Dependiente	%	Espectrofotómetro UV-VIS-NIR
Emitancia térmica	Dependiente	%	Cámara termográfica

3.2.2. Área de estudio: ambiente de laboratorio y aplicación final

3.2.2.1. Descripción

México es uno de los países en las últimas décadas en donde se ha aumentado las tasas de morbilidad y mortalidad en ciudades debido a los efectos del cambio climático, principalmente en Cwb (clima subtropical de altiplano), según la clasificación climática de Köppen-Geiger (Aghamohammadi & Santamouris, 2022; Riojas-Rodriguez et al., 2006).

Por su parte, una de las regiones vulnerables al cambio climático es el estado de Baja California. De acuerdo con las predicciones, se estima que el estado de Baja California presentará una reducción del 10 al 20% en su precipitación total anual. Por otro lado, se estima que la temperatura media anual aumentará entre 1.5°C a 2.5°C en los siguiente 50 años, y por consecuente acentuando algunos fenómenos atípicos en la zona. El estado de Baja California se localiza al Noroeste de México en la Península de Baja California, colindando al Oeste con el Océano Pacífico y al Este por el Mar de Cortés. Tiene una expansión territorial aproximada de 71,756 km² y cuenta con una población alrededor de 3 millones de habitantes (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de Baja California, 2012).

Por su parte, Ensenada es uno de los 5 municipios que comprenden al estado de Baja California, localizada en la parte noroeste del litoral del Océano Pacífico de México, al norte de

la península en lo que se conoce como el Corredor Costero Tijuana-Ensenada, caracterizado por una acelerada expansión de áreas urbanas (Padilla & Muñoz, 2012). Su ubicación geográfica está entre los paralelos 27° 59' y 32° 24' de latitud norte; los meridianos 112° 44' y 116° 54' de longitud oeste; altitud entre 0 y 1 900 m. La ciudad presenta una extensión de 13,128.84 km² de superficie, lo que representa el 18.4% del territorio del estado y cuenta con una densidad poblacional 33.8 habitantes/km² (COPLADEM, 2022). Cuenta con 443,807 habitantes y 171,203 viviendas (INEGI, 2024). La ciudad de Ensenada, se caracteriza por presentar una condición climática tipo semiárido templado-frío (BSk) de acuerdo con la clasificación climática de Köppen-Geiger (Climate Data, n.d.).

El municipio ha presentado en los últimos años un acelerado crecimiento urbano, principalmente hacia las zonas periféricas de la ciudad. Como consecuencia, los casos de morbilidad y mortalidad incrementaron en sus habitantes derivados de las olas de calor en el municipio (Aghamohammadi & Santamouris, 2022). La ciudad se encuentra dentro de la clasificación de LCZ en *lightweight lowrise*, que implica una mezcla densa de edificios de un solo nivel, con pocos o inexistentes árboles, cobertura del suelo duro y empleo de materiales de construcción ligeros (madera, metal corrugado, paja).

Considerando la acelerada expansión territorial de la ciudad de Ensenada, el incremento de las tasas de morbilidad y mortalidad en sus habitantes derivadas de las condiciones climáticas, la falta de vegetación y que los materiales empleados en ciudades forman parte del balance térmico urbano, la investigación propone un estudio a micro escala con el empleo de recubrimientos fríos.

3.2.2.2. *Caracterización climática y/o contextual*

En el municipio de Ensenada, la temperatura media anual es de 17.6°C; la media del mes cálido es de 25.1 °C en septiembre y la media del mes frío es de 13.9°C en diciembre. Sin embargo, la máxima extrema de septiembre puede alcanzar los 36.3°C. Otro aspecto característico de Ensenada es que la humedad relativa media anual se encuentra por arriba del rango de confort en un 73.5%. Por su parte, la radiación solar total máxima promedio en la ciudad es generalmente todo el año, ya que presenta registros superiores a los 700.0 w/m², superando la zona aceptable de confort (Comisión Nacional del Agua, 2022).

Gran parte del producto del consumo energético generado es debido al uso de sistemas de climatización activos en viviendas para mantener condiciones ambientales de confort (SMADS, 2012). Con base en Hernández-Pérez et al. (2014) mencionan que los recubrimientos fríos son beneficiosos en climas con mayor cantidad de radiación solar, como los de las regiones mediterráneas. Tomando en cuenta, el municipio de Ensenada presenta una alta exposición a la radiación solar, y que los habitantes de la ciudad de Ensenada no se encuentran expuestos constantemente a temperaturas altas, lo que implica una baja adaptabilidad a esta exposición, y que la tendencia indica que las temperaturas máximas promedio vayan en aumento, es importante considerar estrategias de mitigación de la ICU que permita reducir las cargas térmicas en edificios. Debido a ello, es que en la investigación desarrollada se plantea la elaboración de materiales fríos con una reflectancia en el rango espectral que disminuya dichas cargas.

3.2.3. Definición de la unidad de análisis

La unidad de análisis es aquella que indica que es lo que será medido, es decir, a lo que se le aplicará el instrumento de medición (Hernández et al., 2014). Por lo que en la presente investigación la unidad de análisis identificada es la película del recubrimiento frío desarrollado mediante las técnicas de deposición por centrifugado en un sustrato de acero galvanizado que simula las condiciones de una cubierta de lámina, como perteneciente a la vivienda vulnerable, ya que el objetivo principal de la investigación es caracterizarla y con ello identificar la reflectancia espectral y emitancia infrarroja.

Por lo que, los criterios de selección de la unidad de análisis fueron definidos durante la etapa II de la investigación en el diseño del material. Para ello se realizaron 3 acciones primordiales: a) la definición del elemento urbano arquitectónico, b) la identificación y selección de los compuestos inorgánicos naturales como subproducto del sector terciario en ciudades costeras y c) la identificación y selección de los reactivos inorgánicos para el dopaje de lo compuesto bio-renovable. Dichas acciones están descritas en los siguientes apartados.

3.2.3.1. Diseño del material (criterios de selección de la unidad de análisis)

a) Definición del elemento urbano arquitectónico

En las envolventes de los edificios, los techos son considerados una de las partes con mayor importancia debido a que el 50% de las cargas térmicas son absorbidas por este elemento arquitectónico. Por el contrario, un techo frío refleja la radiación solar incidente y emite el calor, caracterizado por dos propiedades ópticas: reflectancia y alta emisividad infrarroja (Rawat et al., 2022). Por lo que, al emplear tecnología de techos fríos se puede lograr reducir las cargas térmicas de un edificio y con ello disminuir el consumo de energía para equipos de climatización.

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020, en México existen alrededor de 35 mil viviendas particulares habitadas, construidas con diversos materiales. A nivel nacional, los techos de las viviendas están conformados por losas de concreto (79%), láminas de acero galvanizado (17%), de madera y con materiales de desecho, palma, paja y teja (2%) (INEGI, 2020). Por otro lado, tomando en cuenta los criterios establecidos por la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI), el indicador de calidad de la vivienda está determinado por dos aspectos: el material de construcción y sus espacios. Considerando lo anterior, la población en situación de carencia por calidad y espacios cuenta con una vivienda con techo de lámina (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONVAL), 2010).

A pesar de que la mayoría de las viviendas en México están construidas por techos de concreto, las cargas térmicas que inciden en los techos de láminas de acero galvanizado y son absorbidas al interior de las viviendas son superiores, debido a la diferencia de valores en las propiedades térmicas de ambos materiales (Tabla 12). Así mismo, las viviendas con techos de lámina son consideradas dentro del sector vulnerable. Debido a estos factores, es que en la presente investigación se optó por caracterizar el material propuesto sobre sustratos de acero galvanizado y evaluar la disminución de cargas térmicas para su aplicación en viviendas con techos de láminas.

Tabla 12
Propiedades térmicas de materiales de construcción

Material	Espesor (mm)	Conductividad (W/m*K)	Calor específico (kJ/kg*K)	Resistencia (K*m ² /W)
Acero	1.5	45	419	3.5x10 ⁻⁵
Concreto	50	0.36	837	0.14

Nota. Elaborada a partir de Hirsch (2009).

b) *Identificación y selección de los compuestos inorgánicos naturales como subproducto del sector terciario en ciudades costeras*

El ostión (*crassostrea gigas*) es el tercer producto pesquero con mayor disponibilidad en el sector terciario de Ensenada (Maldonado, 2017). Por consiguiente, el constante aumento del consumo del ostión, genera un incremento en el desecho de los exoesqueletos del molusco. Por cada kilogramo de ostión consumido mundialmente, entre 370gr-700gr de desperdicio de exoesqueletos son generados (Mo et al., 2018).


De acuerdo con diversos estudios que, reutilizado los exoesqueletos de diversos moluscos para la elaboración de concretos, se ha identificado que algunas especies de ostiones, mejillones y almejas están compuestas principalmente de forma natural por carbonato de calcio (CaCO_3), en donde la fase mineral es calcita. Así mismo, la composición química principal de los exoesqueletos de los ostiones consiste de óxido de calcio (CaO) y puede variar entre un 48.0% y 86.8%. La diferencia del contenido de CaO , identificada por algunos autores, es debido a la temperatura de calcinación (500°C - 950°C) a la que los exoesqueletos de ostión son sometidos (Mo et al., 2018).

La obtención de los exoesqueletos del ostión (*crassostrea gigas*) fue por medio de un establecimiento comercial local, en donde fue posible disponer de 2 kg de materia prima. Debido a que los exoesqueletos son obtenidos como subproducto de desecho, es necesario que sean sometidos a un tratamiento de limpieza previamente. Las formas más comunes de limpieza de dichos exoesqueletos, para su reutilización en materiales de construcción, involucra un lavado con agua y secado al sol con el uso de cepillos domésticos para quitar las impurezas. Para la molienda, diversos autores reportan el uso de diferentes tipos de trituradoras, como molino de bolas, compactadores y martillos (Eziefula et al., 2018).

La composición química principal de diversos exoesqueletos de moluscos, incluyendo ostiones, es por la formación natural del carbonato de calcio (CaCO_3), en donde la fase mineral es calcita. Así mismo, los exoesqueletos de moluscos se conforman por óxido de calcio (CaO), con pequeñas fracciones de otros óxidos. El aumento del contenido de CaO encontrado por investigadores depende de la temperatura a la que son calcinados los exoesqueletos, generalmente entre un rango de 500°C – $1,000^\circ\text{C}$ (Mo et al., 2018). Debido a ello fue que se

sometió a un proceso de calcinación el carbonato de calcio bio-renovable. Las especificaciones técnicas del horno de sinterización tubular vienen descritas en la Tabla 13.

Tabla 13
Especificaciones técnicas del horno de sinterización tubular

Nombre del equipo	Especificaciones técnicas		Imagen de referencia
Lindberg Blue, <i>Thermo Scientific</i>	Marca	Thermo Scientific	
	Temperatura máxima	1500°C	
	Capacidad	17 L	
	Multisegmento	Controller / multiprograma	
	Consumo de energía	5900W	

c) Estudio comparativo de reactivos inorgánicos para dopaje del compuesto bio-renovable

La identificación de los reactivos inorgánicos, fue a través de la revisión de la literatura, en donde se encontraron 42 investigaciones que reportaban las propiedades ópticas reflectivas de diversos compuestos químicos inorgánicos (apéndice 2), dentro de un rango espectral determinado, para la elaboración de materiales fríos. Las propiedades ópticas reportadas en los estudios fueron la reflectancia solar total (TSR), reflectancia NIR y emisividad térmica. La Tabla 14 muestra los compuestos químicos mayormente empleados en el estudio de materiales fríos. La descripción completa de los todos los compuestos químicos identificados en la revisión sistemática, se encuentra en la sección de apéndices, en el presente documento.

Los compuestos químicos mayormente utilizados en la elaboración de materiales fríos son óxidos metálicos, los cuales presentan una amplia aplicación en diversos campos. En la investigación reciente se han logrado nuevos progresos en el área de electrocatalizadores. Los óxidos metálicos dopados pueden formar mejores materiales electrocatalíticos. Esta atribución permite incrementar la reflectancia NIR de los pigmentos para la elaboración de materiales fríos. Debido a ello, es que recientemente se han desarrollado diversos pigmentos fríos a partir del dopaje de compuestos químicos con óxidos metálicos (Zhou et al., 2020).

Una vez identificados los compuestos químicos empleados en materiales fríos, un factor determinante para la selección, fue la disponibilidad local y alcance de los mismos para la

presente investigación. Por lo que, fueron seleccionados los siguientes reactivos inorgánicos: carbonato de bario (BaCO_3), óxido de zinc (ZnO), dióxido de manganeso (MnO_2) y óxido férrico (Fe_2O_3).

Tabla 14

Estudio comparativo de reactivos químicos empleados en recubrimientos fríos

Autores	Compuesto químico	Formula química	Valor de reflectancia	Emisividad térmica
(Atiganyanun et al., 2023)	Sulfato de bario	BaSO_4	0.81 ¹	N/E
(Yang et al., 2023)			0.97 ¹	0.68-0.86
(Xiang & Zhang, 2018)	Titanato de bario	BaTiO_3	0.76 ²	N/E
(Morini et al., 2018)			0.39 ¹	N/E
(L. Yuan et al., 2018)	Vanadato de bismuto	BiVO_4	0.70 ²	N/E
(Riyas et al., 2023)			0.82 ²	N/E
(Li et al., 2020)	Carbonato de calcio	CaCO_3	0.95 ¹	0.94 en la ventana atmosférica
(C. H. Wu et al., 2020)			N/E	0.95 en la ventana atmosférica
(X. Zhang et al., 2022)	Óxido férrico	Fe_2O_3	0.70 ¹	N/E
(Dippong et al., 2021)			0.62 ¹	N/E
(Rong et al., 2020)	Sílice	SiO_2	0.97 ²	N/E
(Carlosena et al., 2021)			0.76-0.92 ¹	N/E
(Feng et al., 2022)	Sílice	SiO_2	0.87-0.92 ²	0.34 y 0.90
(Qi et al., 2022)			0.7 y 0.97 ¹	8-25 μm (ventana atmosférica)
(Berardi et al., 2020)	Dióxido de titanio	TiO_2	N/E	0.79
(D. Gao et al., 2020)			0.64 ¹	0.9
(Fan et al., 2023)	Dióxido de titanio	TiO_2	0.73 ²	N/E
(Fedel et al., 2023)			0.88 ¹	0.973
(Rosati et al., 2021a)	Óxido de zinc	ZnO	0.48 ¹	N/E
(Primo et al., 2019)			0.91 ¹	N/E
	Óxido de zinc	ZnO	0.75 ²	N/E
			0.74 ¹	N/E
	Óxido de zinc	ZnO	0.87 ²	N/E
			0.50 ¹	N/E
	Óxido de zinc	ZnO	0.39 ²	N/E

Nota. Valor de reflectancia: reflectancia solar total¹ y reflectancia NIR²

3.2.3.2. Caracterización de la unidad de análisis

En este apartado se describen los protocolos metodológicos pertinentes para la caracterización de la unidad de análisis, que en la presente investigación es el recubrimiento frío desarrollado. Dicha sección conforma la etapa IV de la investigación en el diseño del experimento. Previamente a la caracterización de la unidad de análisis, fueron requeridos diversos análisis tanto de los compuestos bio-renovables obtenidos, como de los reactivos

inorgánicos seleccionados para el dopaje del carbonato de calcio. Debido a esto, es que en el presente apartado se describe el diseño de los siguientes protocolos: a) el protocolo para el análisis de la composición química y microestructura, b) el protocolo para el análisis termo-óptico, c) el protocolo para la síntesis de los pigmentos inorgánicos y la fabricación de las muestras prototipo y d) el protocolo para el análisis de espectrofotometría.

a) Diseño del protocolo para análisis de la composición química y microestructura

Para analizar la composición química y la microestructura del carbonato de calcio bio-renovable, obtenido de los exoesqueletos del ostión (*crassostrea gigas*), y del óxido de calcio, como producto del sometimiento al proceso de calcinación, se realizó un análisis de difracción de rayos x y un análisis mecano-óptico de topografía. Para el primer análisis, se empleó un difractómetro de rayos x, utilizando un difractómetro de rayos X *D2 PHASER*, marca Bruker, con el objetivo de corroborar la composición de fase y la estructura cristalográfica del CaCO_3 y el CaO . Para el segundo análisis, se utilizó un microscopio de fuerza atómica *Easyscan 2*, marca *Nanosurf*, para la medición del tamaño de partícula del CaCO_3 a escala nanométrica. Para ambas mediciones, se manejaron en polvo los compuestos inorgánicos bio-renovables. El diseño del protocolo para el análisis de ambas técnicas se muestra en la Figura 25. Las especificaciones técnicas de los dos equipos vienen presentadas en Tabla 15.

Figura 25

Protocolo para análisis de la composición química y la microestructura

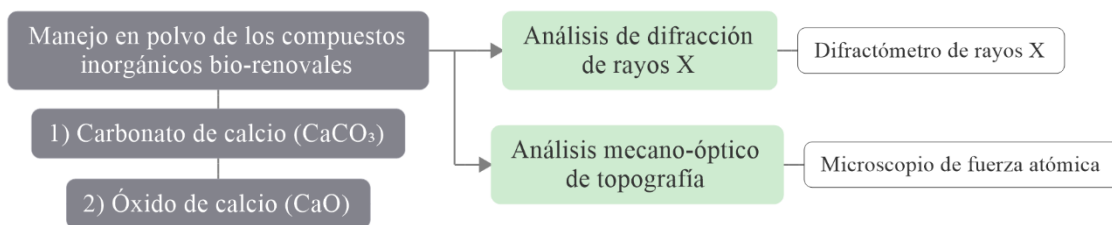




Tabla 15

Especificaciones técnicas de los equipos para análisis de la composición química y microestructura

Nombre del equipo	Especificaciones técnicas	Imagen de referencia
Difractómetro de rayos X <i>D2 PHASER</i> , <i>Bruker</i>	Goniómetro Plataformas de muestras Plataformas de BTS 150/500	Theta Rotatoria individual o de 6 posiciones Cámaras de Temperatura para difracción de polvo

	Tamaño	61x60x70 cm – (Alto x Ancho x Profundo)	
Microscopio de fuerza atómica <i>Nanosurf Easyscan 2</i>	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	

b) Diseño del protocolo para análisis termo-óptico

A partir de la revisión de la literatura descrita en el capítulo 2 y considerando los criterios de selección de la unidad de análisis, descritos en la sección 3.2.3.2 del inciso c), de la presente investigación, se procedió a la caracterización de los reactivos inorgánicos para posteriormente realizar el dopaje del compuesto bio-renovable (CaCO_3), con el objetivo de incrementar su reflectancia espectral. Así mismo, en de la caracterización termo-óptica se consideró el carbonato de calcio y el óxido de calcio bio-renovables para evaluar su desempeño termo-óptico y realizar un análisis comparativo con los reactivos seleccionados. Los reactivos inorgánicos seleccionados para la caracterización termo-óptica fueron: carbonato de bario (BaCO_3), óxido de zinc (ZnO), dióxido de manganeso (MnO_2) y óxido férrico (Fe_2O_3).

Las técnicas de caracterización termo-óptica de los reactivos fueron por medio de los siguientes análisis: espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, absorbancia en espectrofotometría, análisis térmico y de termografía infrarroja. El manejo de los reactivos fue necesario a partir del estado correspondiente del mismo en polvo o solución, según el equipo de medición. El protocolo para el análisis termo-óptico de los reactivos inorgánicos está descrito en la Figura 26 y las especificaciones técnicas de los equipos requeridos se encuentran en la Tabla 16. La descripción a detalle de los análisis se presenta en el apartado de resultados dentro del capítulo 4 de la presente investigación.

Figura 26
 Protocolo para análisis termo-óptico de los reactivos inorgánicos

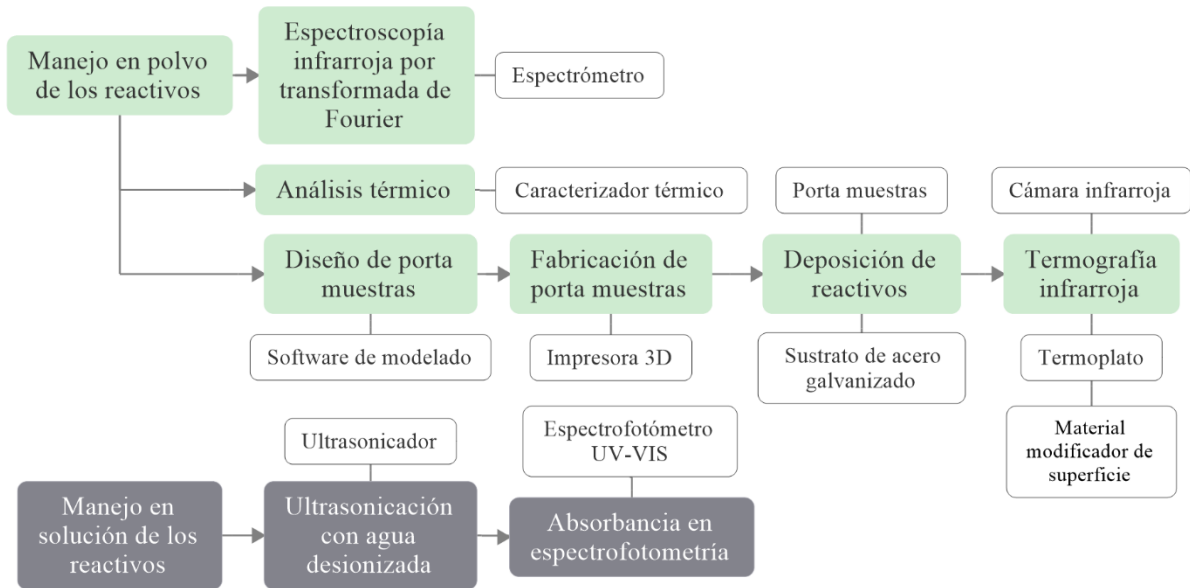







Tabla 16

Especificaciones técnicas de los equipos del protocolo para análisis termo-óptico de los reactivos

Nombre del equipo	Especificaciones técnicas	Imagen de referencia	
Espectrómetro <i>Spectrum Two,</i> <i>Perkin Elmer</i>	Rango de operación Longitud de onda Rango de longitud de onda Tipo de detector	5 - 45 °C 8 8,300 – 350 cm ⁻¹ LiTaO3	
Caracterizador térmico <i>KD2-PRO,</i> <i>Decagon Devices, Inc.</i>	Sensor Rango Sensor SH-1	SH-1 (1.3 mm ø x 3 cm largo y 6 mm de espacio libre) 0.02 a 2.00 W (m*K) (conductividad térmica) 50 a 5,000 °C * cm/W (resistencia térmica) 0.1 a 1.0 mm ² /s (difusividad) 0.5 a 4.0 mJ/(m ³ K) (calor específico volumétrico)	
Impresora 3D <i>Prusa i3 MK3S</i>	Entorno operativo Sensor Volumen de construcción Altura de la capa Diámetro de filamento Materiales compatibles	-50 a +150 °C SH-1 (1.3 mm ø x 3 cm largo y 6 mm de espacio libre) 25×21×21 cm 0.05 - 0.35 mm 1.75 mm 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	
Cámara infrarroja <i>FLIR ONE</i>	Resolución térmica Rango de temperatura del objeto Teléfono Precisión	160 x 120 -20°C — 120°C (-4°F — 248°F) y 0°C — 400°C (32°F — 752°F) Android ±3 °C o ±5 %, típico Porcentaje de la diferencia entre la temperatura ambiente y de la escena. Se aplica 60 segundos tras el inicio cuando la unidad está entre 15 y 35 °C y la escena está entre 5 y 120 °C	
Espectrofotómetro UV-VIS <i>GENESYS 10S,</i> <i>Thermo Scientific Serie</i>	Diseño óptico Ancho de banda espectral Fuente de luz Fotometría: Rango de linealidad	Doble haz – Detector interno de referencia 1,8 nm Lámpara flash de xenón Hasta 3,5 A a 260 nm	

c) *Diseño del protocolo para la síntesis de los pigmentos inorgánicos y la fabricación de muestras prototipo*


















El diseño de la síntesis de los pigmentos inorgánicos fue a partir de la revisión sistemática desarrollada en el capítulo 2 de la presente investigación, en donde se identificaron los métodos utilizados en la síntesis de pigmentos reflectivos NIR para la elaboración de recubrimientos fríos. Una vez identificados los diversos métodos empleados, se distinguieron aquellos que utilizaran los compuestos químicos analizados en la presente investigación y que presentaran los instrumentos disponibles para los métodos de síntesis y las técnicas de caracterización para el presente estudio. Los estudios identificados se muestran en la Tabla 17.

A partir de lo anterior, fue que se identificaron los siguientes métodos de síntesis de pigmentos reflectivos NIR: ultrasonicación, precipitación, sol-gel y gelatinización. Tomando en cuenta que en el estudio de Fedel et al. (2023) y de Primo et al. (2019) se realizó un dopaje del óxido de zinc para aumentar la reflectancia NIR en pigmentos fríos, fue que se consideró la misma técnica para la síntesis de los pigmentos inorgánicos. En dichos métodos, se identificaron a su vez, los solventes empleados en la síntesis de los pigmentos: dimetilformamida, agua desionizada, ácido cítrico, acetona y agua destilada. Así mismo, considerando dichos estudios, se identificaron las siguientes técnicas de caracterización termo-óptica: termografía infrarroja (cámara infrarroja), análisis de reflectancia en espectrofotometría (espectrofotómetro UV-VIS-NIR), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) y difracción de rayos X (XRD).

Una vez diseñado el método de síntesis de los pigmentos inorgánicos, considerando una selección de pasos de cada uno de los métodos identificados y tomando en cuenta la disponibilidad de los instrumentos y solventes, se procedió a la fabricación de las muestras prototipo. Inicialmente, fue necesario la definición de la composición de la matriz acrílica. Para ello, se tomó como referencia el estudio de Li et al. (2020), en donde se utiliza una concentración de partículas de CaCO_3 en un 60% en una matriz acrílica para la elaboración de un recubrimiento frío.

Tabla 17

Métodos de síntesis de pigmentos y técnicas de caracterización termo-óptica

Autores	Método y compuestos	Solvente	Ruta				
Li et al. (2020)	Ultrasonicación (CaCO ₃)	DMF	1) CaCO ₃ + Dimetilformamida (DMF)	2) 10 min sonicación 	3) Matriz acrílica + mezcla	4) Mezcla vertida en molde y secado por la noche hasta desaparecer el disolvente	5) Caracterización en cámara IR, SEM, FT-IR y espectrofotómetro 
Wu et al. (2017)	Precipitación (CaCO ₃ , Na ₂ CO ₃ , NaOH y CaCl ₂)	Agua desionizada	1) Mezcla mecánica por 3 min: 10.65 g Na ₂ CO ₃ + 0.40 g NaOH + 22.42 g CaCl ₂ + 1.47 g citrato de sodio + 50 ml de agua desionizada		2) Separación centrifuga de la suspensión y lavado en ultrasonicación con agua 3 veces	3) Secado en horno a 608 °C por 12 hr 	4) Caracterización en XRD, FT-IR, SEM 
Fedel et al. (2023)	Sol-gel (YInO ₃ -ZnO)	Ácido cítrico	Óxido de itrio, óxido de indio, óxido de zinc y cobre + ácido nítrico 1) Mezclado a 800 rpm por 6 hr a 80 °C	2) Molienda de gel seco en mortero 3) Calcinado 850 °C 	4) Pasta de polimetacrilato de metilo (PMMA) disuelta en acetona y ultrasonicación por 10 min 	5) Tratamiento de sustratos 6) Aplicación de pintura en un aplicador de películas automático 	7) Comparación con recubrimiento blanco con TiO ₂ 8) Caracterización en espectrofotómetro 
Rosati et al. (2021)	Sol-gel (YIn _{0.9} Mn _{0.103} -ZnO)	Acetona	1) PMMA disuelto en acetona + pigmentos	2) Mezcla en ultrasonicación por 10 min 	3) Tratamiento de sustratos de aluminio 	4) Aplicación de pintura en un aplicador de películas automático 	5) Caracterización en espectrofotómetro 
Primo et al. (2019)	Gelatinización (ZnO y Co)	Agua destilada	1) Mezcla mecánica de pigmentos con agua destilada por 4 hr. 2) Tamizado	3) Mezclado de pigmentos con cobalto + solución de zinc por 60 min a 600 rpm 	4) Calcinado en horno a 800 °C 	5) Molienda de sólidos en mortero 6) Aplicación de polvos en pintura blanca comercial 	7) Caracterización en XRF, XRD, SEM y espectrofotómetro 

Para la caracterización de la unidad de análisis, se definió la técnica de deposición del recubrimiento frío y la de espectrofotometría para la medición de las longitudes de onda en la reflectancia espectral del material. La selección de los equipos fue considerando la disponibilidad de los mismos para la presente investigación, los cuales fueron un instrumento de recubrimiento por centrifugado (Tabla 19) y un espectrofotómetro UV-VIS-NIR. Tomando en cuenta dichos equipos y los criterios de selección de la unidad de análisis, descritos en la sección 3.2.3.1 del inciso a), del presente documento, fue que el sustrato de acero galvanizado debía contar con las siguientes características:

- Las dimensiones del sustrato debían ser superiores al área de apertura de la esfera de integración del espectrofotómetro ($\varnothing 3/4''$)
- Las dimensiones debían ser superiores a la plataforma giratoria del instrumento de recubrimiento por centrifugado ($\varnothing 45$ mm)
- El sustrato debía representar el material de los techos de la vivienda vulnerable en México y las propiedades que generan un aumento en las cargas térmicas de la misma

La composición química del sustrato de acero galvanizado seleccionado, está conformada por una capa de zinc. El revestimiento de zinc en la lámina en frío es la galvanización, lo que impide que el acero se oxide. Otros compuestos químicos que conforman el sustrato son el carbón (C), silicio (Si), manganeso (Mn), fosforo (P), azufre (S) y titanio (Ti) en diferentes proporciones, como se muestra en la Tabla 18 (GNEESTEEL, 2021). El diámetro definido para los sustratos fue de 45 mm con un espesor de 1.5 mm. El corte de los mismos fue realizado mediante una máquina de corte de CNC.

Tabla 18
Composición química del acero galvanizado

C	Si	Mn	P	S	Ti
≤0.10	≤0.50	≤0.60	≤0.10	≤0.030	≤0.020

Finalmente, el diseño del método de síntesis de los pigmentos inorgánicos y la fabricación de las muestras prototipo vienen descritas a través del protocolo representando en la Figura 27. Cabe destacar que, debido a que se realizaron diversos pigmentos inorgánicos, las especificaciones de las estimaciones de masa y los tiempos de agitación, tratamiento de

sustratos, deposición y secado pueden variar y, por lo tanto, vienen descritos en el capítulo 4 de la sección de resultados. Por su parte, las especificaciones técnicas de los equipos utilizados para la síntesis de los pigmentos inorgánicos y la fabricación de las muestras prototipo vienen descritas en la Tabla 19.

Figura 27

Protocolo para la síntesis de pigmentos inorgánicos y la fabricación de muestras prototipo

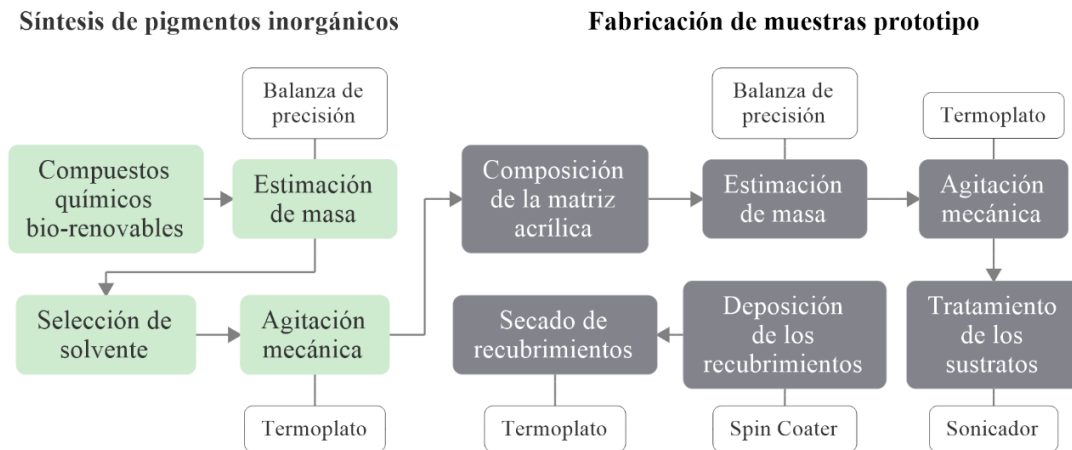




Tabla 19

Especificaciones técnicas de los equipos del protocolo de síntesis de pigmentos y fabricación de muestras

Nombre del equipo	Especificaciones técnicas	Imagen de referencia
Balanza de precisión <i>PA163, OHAUS</i>	Capacidad máxima 162 g Sensibilidad 1 mg Tiempo de estabilización 2 s Entorno de trabajo 10 °C – 30 °C, 80 % HR, sin condensación	
Termoplato con agitador magnético, <i>SH-2</i>	Capacidad 2 litros Temperatura máxima 49 a 350 C° Tiempo de elevación de temperatura 20-30 minutos Velocidad de agitación 100-1600 RPM Capacidad del tanque 1.89 L	

Sonicador ultrasónico <i>1510, Branson</i>	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
Instrumento de recubrimiento por centrifugado <i>Spin Coater, WS-650MZ- 23NPPB</i>	Máxima velocidad de rotación	12000 rpm (para obleas de ø100mm)
	Vacío requerido	25–28"
	CDA requerido	60-70 PSI
	Máxima velocidad de rotación	12000 rpm (para obleas de ø100mm)



d) *Diseño del protocolo para análisis de espectrofotometría*

La medición de la reflectancia difusa de las muestras prototipo fue iniciando con el encendido y calibración automática del espectrofotómetro empleado, en el cual se empleó una muestra de referencia cuya reflectancia es conocida; posterior al calibrado, el equipo tomó la primera medición automáticamente con la muestra de referencia, quedando registrada durante todo el tiempo de medición del resto de las muestras. Manualmente, se programó el rango de longitud de onda, los intervalos de medición y la velocidad de medición. El diseño del protocolo para la medición se encuentra descrito en la Figura 28. El equipo empleado para la medición de espectrofotometría fue por medio de un espectrofotómetro UV-VIS-NIR de la marca *Perkin Elmer*, modelo 330 y una esfera de integración de ø10 cm de la marca Hitachi, modelo 4001541 (Tabla 20).

Figura 28

Protocolo para análisis de espectrofotometría

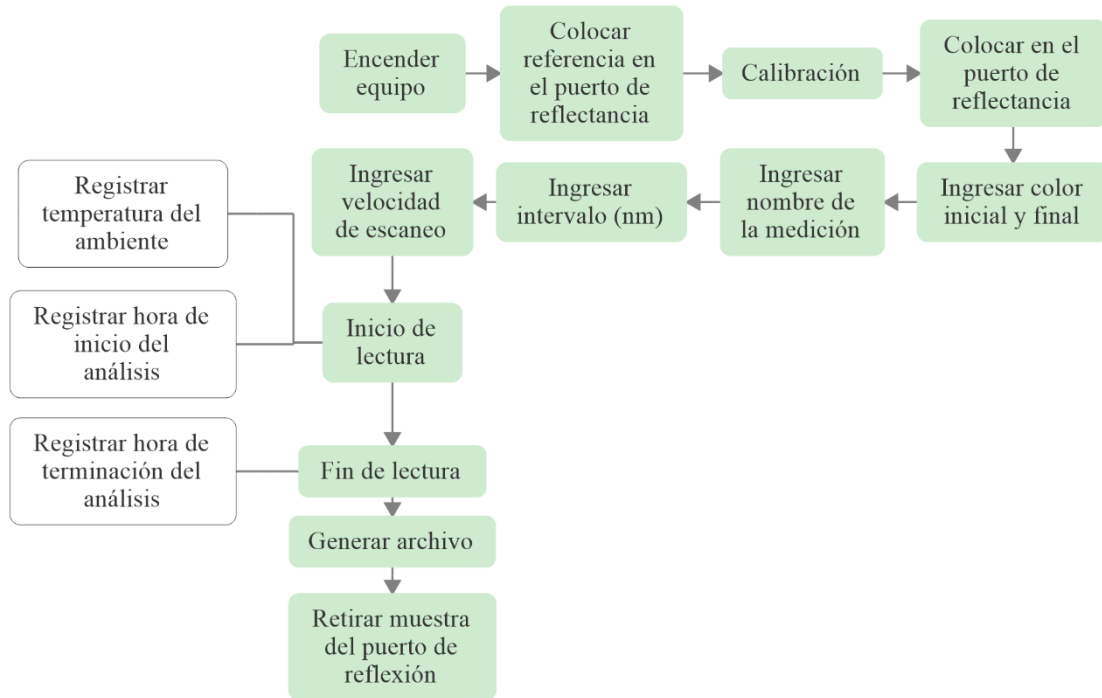




Tabla 20
Equipo utilizado para análisis de espectrofotometría

Instrumentos	Imagen de referencia
Espectrofotómetro UV-VIS-NIR Perkin Elmer 330	
Esfera de integración ø10 cm, Hitachi, modelo 4001541	

3.2.3.3. Prueba piloto

Las primeras prácticas para la elaboración de los recubrimientos fríos fueron por medio de 3 pruebas piloto. La primera prueba fue utilizando el carbonato de calcio bio-renovable natural extraído de los exoesqueletos de ostión, la segunda fue por medio de un carbonato de calcio comercial y la tercera prueba por con el óxido de calcio obtenido posterior del proceso de calcinación al que fue sometido el carbonato de calcio bio-renovable. La matriz acrílica empleada fue un recubrimiento frío elastomérico acrílico comercial que se utiliza en cubiertas y muros, denominado APOC 252 Sunwhite y cuyas especificaciones técnicas vienen descritas en la Tabla 25. El sustrato empleado para las pruebas preliminares fue de aluminio con un diámetro de 45 mm con un espesor de 1.5 mm, al igual que las dimensiones del sustrato de acero galvanizado empleado para las pruebas finales. El corte de los mismos fue realizado mediante una máquina de corte de CNC. El tratamiento de limpieza de los sustratos fue colocándolos en un vaso precipitado con etanol y colocándolos en un baño ultrasónico por 10 minutos. La deposición de los recubrimientos fue utilizando la técnica de deposición por centrifugado utilizando un equipo denominado spin coating. Las especificaciones técnicas de todos los equipos e instrumentos para la prueba piloto vienen descritas en la Tabla 19.

La primera prueba consistió en utilizar solamente 5% del CaCO_3 comercial con relación a la matriz acrílica para observar la consistencia final del material al realizar la deposición. Para la segunda prueba se decidió aumentar la proporción a 20% pero esta vez utilizando el carbonato de calcio bio-renovable. Para la última prueba se optó por aumentar la proporción a 40% al emplear el CaO . La mezcla de todos los compuestos y la matriz acrílica fue utilizando un agitador magnético en un termoplato. La deposición del primer material fue a 500 rpm en el spin coating y debido a que las siguientes muestras presentaron una granulometría mayor fue necesario aumentar a 800 rpm para la deposición de las siguientes 2 pruebas. Los 3 material depositados en el sustrato de aluminio fueron secados en un plato caliente. Con el resultado final de los materiales en seco se pudo observar que la granulometría tanto del carbonato de calcio bio-renovable y el óxido de calcio sobresalía del sustrato, por lo que en las pruebas finales fue necesario el empleo de un mortero para disminuir el tamaño hasta obtener partículas a una escala nanométrica. El proceso experimental llevado a cabo para la realización de la prueba piloto se encuentra descrito en la Figura 29.

Figura 29
Prueba piloto para la fabricación de muestras prototipo



CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4. Resultados

4.1. *Procesamiento del carbonato de calcio bio-renovable*

La obtención del compuesto inorgánico de exoesqueletos de ostión fue a partir de la identificación y selección de los residuos generados por el sector terciario en la ciudad de Ensenada, Baja California, como subproducto. Dichos criterios de selección parten de la sección 3.2.3.2 en el inciso b del presente documento. A partir de lo anterior, fue que se seleccionó el uso de los exoesqueletos de ostión (*crassostrea gigas*) para el procesamiento del carbonato de calcio bio-renovable, por medio de 2 etapas primordiales, las cuales serán descritas en los siguientes apartados.

4.1.1. *Tratamiento de los exoesqueletos de crassostrea gigas*

El tratamiento de limpieza de los exoesqueletos de ostión, implicó un lavado manual, colocándolos en una cubeta con agua por 1 hora. Se utilizó un cepillo domestico para limpiar cada uno de los exoesqueletos con agua de grifo. Finalmente, los exoesqueletos se sometieron a un secado al sol directamente por 2 horas. El tratamiento de limpieza se encuentra representado en la Figura 30.

Figura 30

Tratamiento de limpieza de los exoesqueletos de ostión



Para el tratamiento de trituración, se diseñó un molino tubular de acero, soldado a una placa de acero y recubierto con una pintura en aerosol de color negro mate. La molienda se realizó manualmente, colocando los exoesqueletos dentro del molino aplicando presión con una varilla de acero de ½”, hasta triturar completamente la materia. El producto final fue la obtención en polvo de los exoesqueletos. El tratamiento de molienda se encuentra representado en la Figura 31.

Figura 31

Tratamiento de trituración de los exoesqueletos de ostión



4.1.2. Manipulación de la microestructura de CaCO_3

La manipulación de la microestructura de las partículas de carbonato de calcio fue con el objetivo aumentar la reflectancia espectral de los pigmentos inorgánicos posteriormente. Los exoesqueletos de ostión triturados fueron tamizados a 3mm para disminuir la granulometría del carbonato de calcio, hasta resultar en un polvo fino y posteriormente, fueron separados 500gr, para destinar la mitad de ese peso al proceso de calcinación. Los 250gr de carbonato de calcio en polvo fueron sometidos a 900°C por 2 horas en un horno tubular. Con ello se realizó la molienda en un mortero de ágata de los dos polvos por separado (calcinado y sin calcinar) para disminuir el tamaño de la granulometría y obtener las nano-partículas de CaCO_3 y CaO . La calcinación y la molienda se encuentran representadas en la Figura 32. El proceso químico obtenido con el sometimiento del CaCO_3 a elevadas temperatura para la obtención de CaO , se encuentra descrito en la Tabla 21.

Figura 32
Manipulación de la microestructura del carbonato de calcio

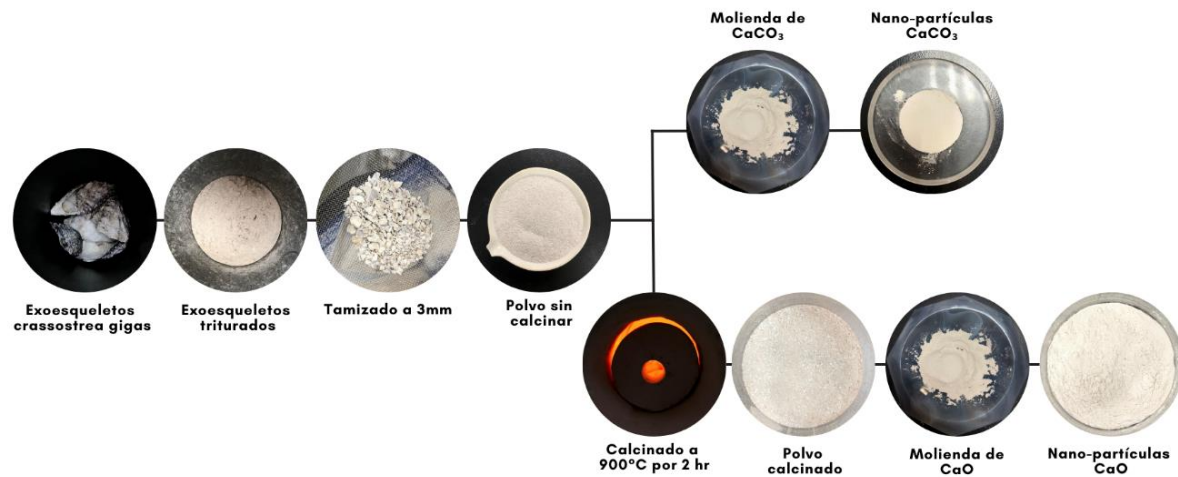


Tabla 21
Proceso químico desarrollado para la obtención del óxido de calcio

Proceso químico	Descripción
$CaCO_3 + 900^\circ C \rightarrow CaO + CO_2 \uparrow$	Carbonato de Calcio ($CaCO_3$) sometido a $900^\circ C$, se transforma en óxido de calcio (CaO), al tiempo que desprende bióxido de carbono (CO_2).
$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + \text{calor} \uparrow$	Óxido de calcio (CaO) al agregarle agua (H_2O) se transforma en hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$). En la hidratación del CaO se desprende calor.
$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \uparrow$	Hidróxido de calcio al tomar bióxido de carbono (CO_2) se vuelve a endurecer en carbonato de calcio ($CaCO_3$), al tiempo que pierde agua (H_2O) por evaporación.

Nota. Elaborada a partir de Roux, (2010).

4.2. Análisis de difracción de rayos X

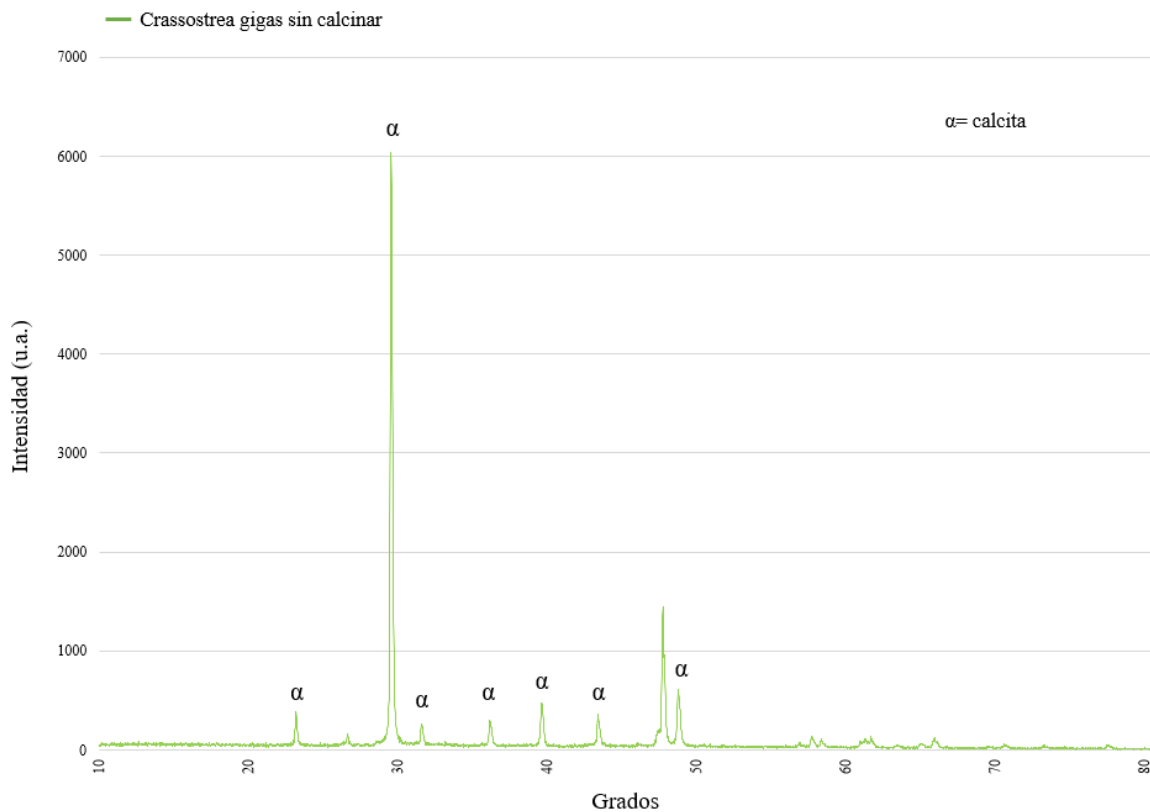
La composición de fase y la estructura cristalográfica de los productos bio-renovables obtenidos a partir de los exoesqueletos de ostión (*crassostrea gigas*) se establecieron a partir de patrones de difracción de rayos X (XRD), utilizando un difractómetro de rayos X D2 PHASER, marca Bruker, donde las especificaciones se describen en la Tabla 15. Para ello se caracterizaron

2 muestras, la primera fue de los exoesqueletos sin calcinar y la segunda fue de los mismos posteriormente al proceso de calcinación.

4.2.1. Estructura cristalográfica de *crassostrea gigas* sin calcinar

La Figura 33 muestra el análisis de difracción de rayos X del polvo de los exoesqueletos de *crassostrea gigas* sin calcinar. Se encontró que los principales picos característicos a 23.11, 29.44, 31.47, 35.99, 39.45, 43.18 y 48.54 indican la presencia de calcita, una de las fases minerales del carbonato de calcio (CaCO_3), corroborando así, su presencia en el polvo obtenido sin sometimiento al proceso de calcinación.

Figura 33
Análisis XRD de exoesqueletos de *crassostrea gigas* sin calcinar

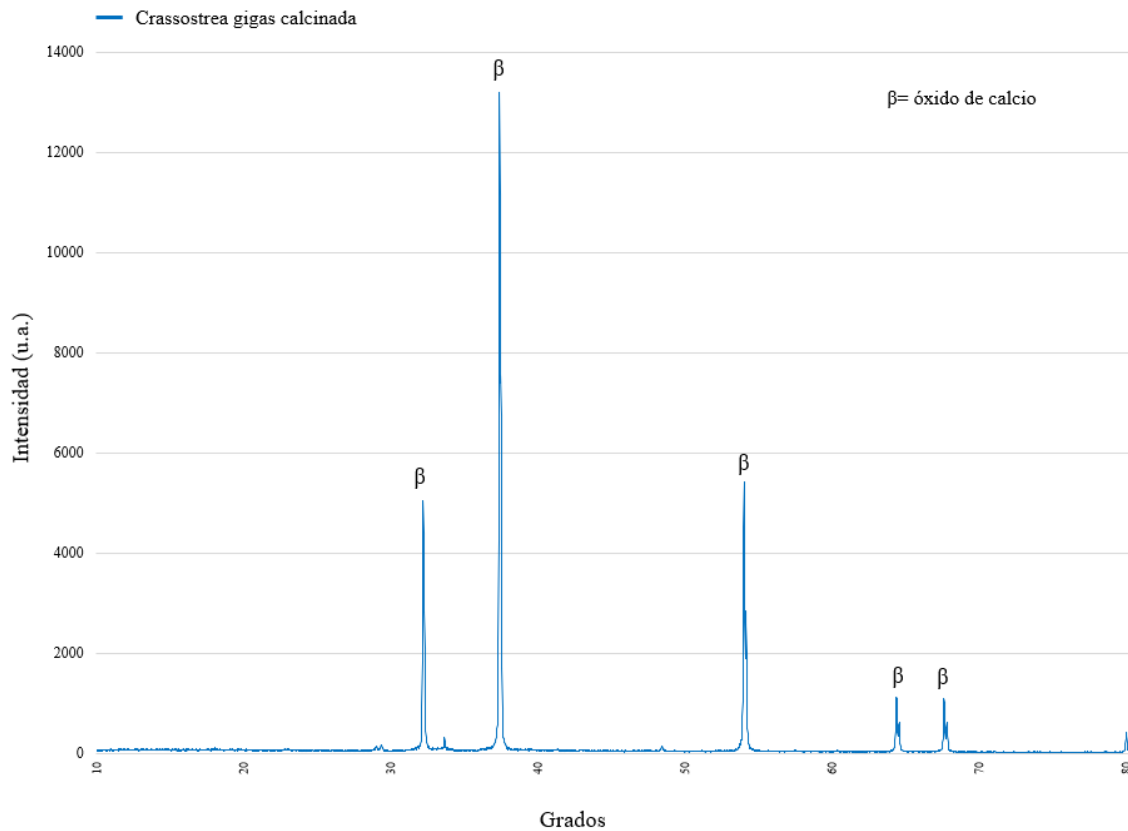


4.2.2. Estructura cristalográfica de *crassostrea gigas* calcinada

Los resultados de la fase cristalina de los exoesqueletos de *crassostrea gigas* posterior al sometimiento del tratamiento de calcinación se muestran la Figura 34. De acuerdo con la difracción de rayos X, los picos característicos obtenidos a 32.05, 37.20, 53.71, 64.01 y 67.23

corresponden a la presencia de óxido de calcio. Con base en el patrón XRD obtenido, se puede concluir que, con el tratamiento de calcinación realizado al polvo de los exoesqueletos, se logró modificar la estructura cristalina, indicando una posible diferencia en la reflectancia solar en los pigmentos inorgánicos a desarrollar.

Figura 34
Análisis XRD de exoesqueletos de *crassostrea gigas* calcinada



4.3. Análisis mecano-óptico de topografía

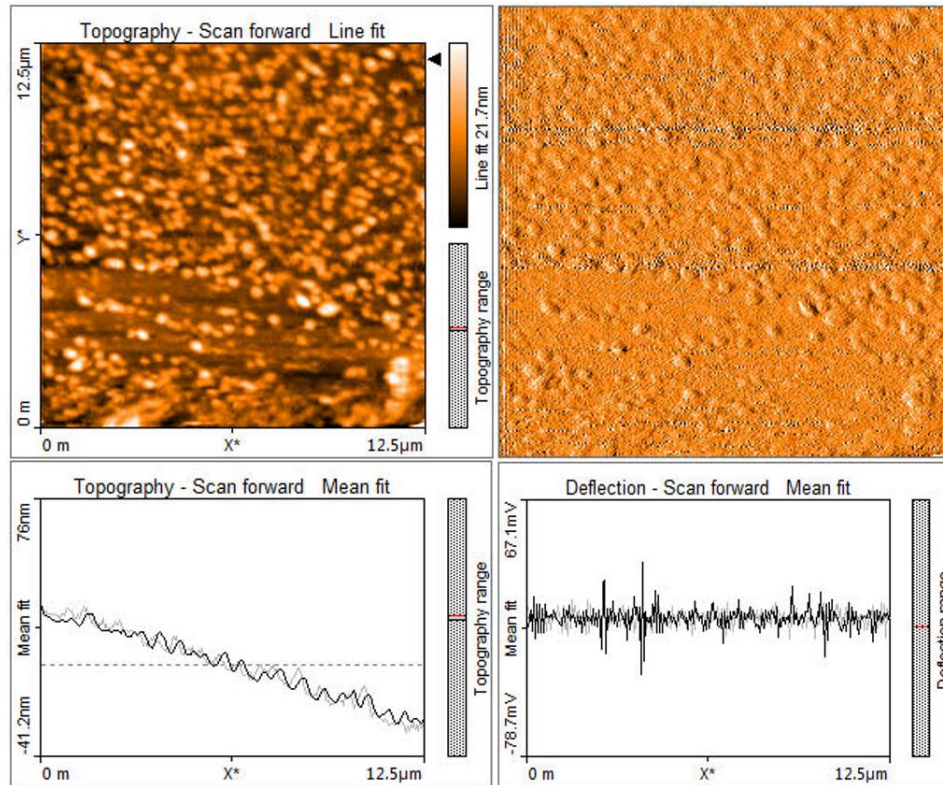
El presente análisis se realizó a partir de la lectura de la superficie de la muestra de carbonato de calcio bio-renovable a escala nanométrica, con el objetivo de evaluar su topografía y el tamaño de partícula obtenido. Las mediciones se llevaron por medio del análisis AFM, utilizando un cantiléver con una punta de 48 Newtons por fuerza dinámica y la escala fue de 12.5, ya que permitía la apreciación del tamaño de partícula del mineral. El proceso de medición se observa en la Figura 35. El equipo utilizado para el análisis mecano-óptico de topografía, fue el microscopio de fuerza atómica *Easyscan 2*, marca *Nanosurf*. Las especificaciones técnicas del equipo vienen descritas en la Tabla 15.

Figura 35
Análisis de muestra CaCO_3 mediante la técnica AFM



Para poder llevar a cabo el análisis mecano-óptico de la topografía de la muestra de carbonato de calcio bio-renovable, se disolvió el mineral en acetona. El barrido realizado de la muestra, permitió observar un tamaño de partícula de 250 nm a 400 nm (Figura 36). De acuerdo con la literatura, para lograr que los pigmentos inorgánicos tengan la capacidad de reflejar la energía térmica, generalmente, el tamaño de partícula de los reactivos oscila entre 350 nm a 550 nm (Wong et al., 2015). Considerando los resultados obtenidos, el tamaño de las nano-partículas de carbonato de calcio bio-renovable, se encuentran dentro del rango necesario para lograr una alta reflectancia NIR.








Figura 36
Topografía de la muestra de CaCO_3



4.4. Caracterización y análisis termo-óptico de los reactivos inorgánicos

La caracterización de los reactivos se realizó para conocer el desempeño térmico y óptico de los mismos para posteriormente seleccionar el óptimo para el dopaje del carbonato de calcio bio-renovable, con el objetivo de aumentar la reflectancia solar. La selección de los reactivos inorgánicos se describe a detalle dentro de la sección 3.2.3.2 en el inciso c de la presente investigación. Los reactivos inorgánicos seleccionados para la caracterización termo-óptica fueron: carbonato de bario (BaCO_3), óxido de zinc (ZnO), dióxido de manganeso (MnO_2) y óxido férrico (Fe_2O_3). Las especificaciones de los reactivos se encuentran en la Tabla 22. Así mismo, en la caracterización se incluyó el carbonato de calcio (CaCO_3) y el óxido de calcio (CaO) bio-renovables, obtenidos a partir de los exoesqueletos de ostión (*crassostrea gigas*).

Tabla 22
Especificaciones de los reactivos inorgánicos

Reactivo inorgánico	Formula química	Pureza	Toxicidad	Riesgos	Contenido	Imagen
Carbonato de bario	BaCO ₃	99.0%	Nocivo en caso de ingestión	Moderado a la salud 		
Óxido de zinc	ZnO	n/e	Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos	Moderado a la salud 		
Dióxido de manganeso	MnO ₂	86.94%	Nocivo en caso de ingestión o inhalación	Puede provocar daños tras exposiciones prolongadas 		
Óxido férrico	Fe ₂ O ₃	96%	n/e	No es una sustancia o mezcla peligrosa		

Las técnicas de caracterización realizadas a los reactivos fueron: análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, análisis de absorbancia en espectrofotometría, análisis térmico y análisis de termografía infrarroja. Dichos análisis forman parte de la etapa V del proceso metodológico en la investigación (Tabla 10) y son descritos en los siguientes apartados.

4.4.1. Análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

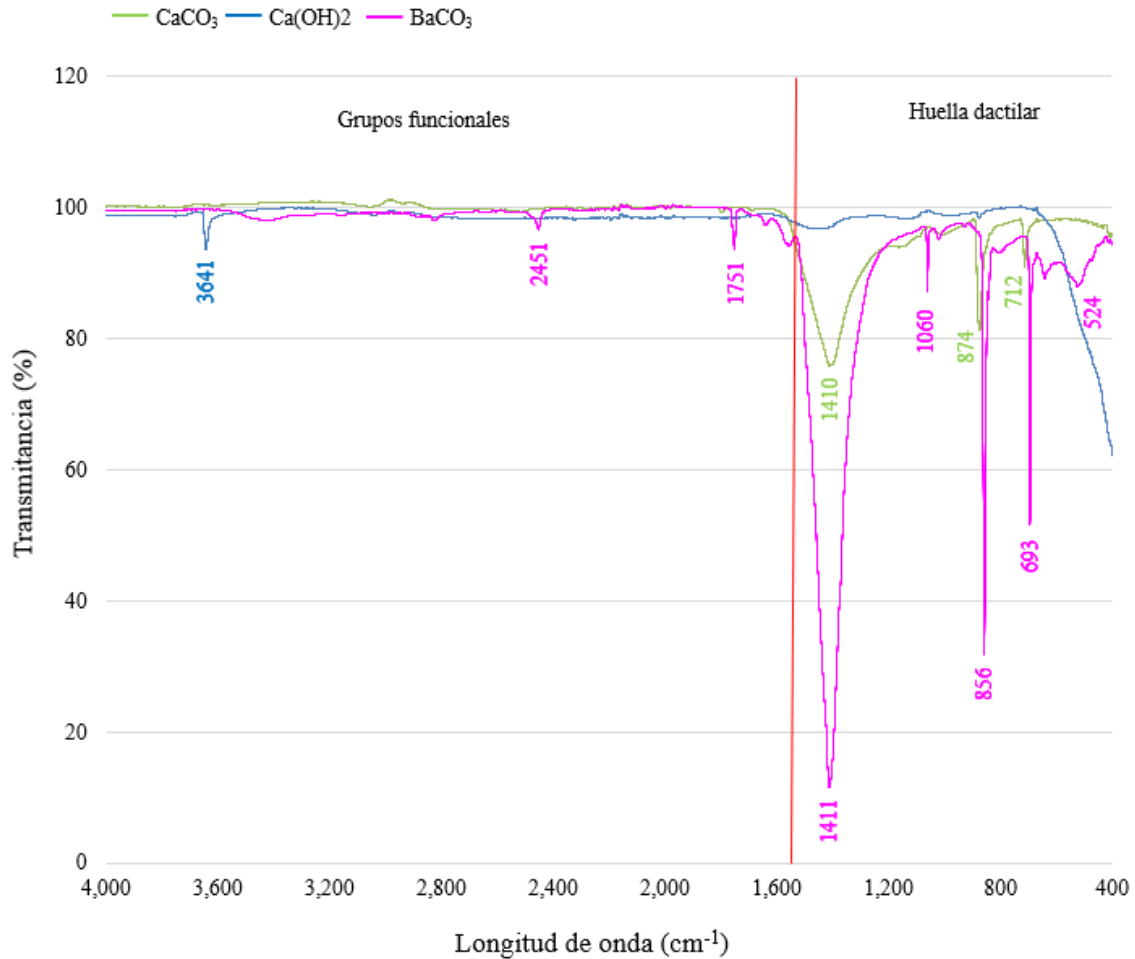
El análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier se llevó a cabo por medio de un espectrómetro *Spectrum Two, Perkin Elmer*, cuyas especificaciones técnicas vienen

descritas en la Tabla 16. Las mediciones de la transmitancia espectral de los reactivos inorgánicos fueron en polvo. La Figura 37 muestra los resultados obtenidos de los compuestos bio-renovables (CaCO_3 y CaO) y del carbonato de calcio (BaCO_3). Una de las ventajas de la espectroscopía IR es que permite la diferenciación entre las distintas fases minerales del CaCO_3 : calcita, aragonita y vaterita (Trezza & Scian, 2013). Mientras que la Figura 38 muestra la transmitancia espectral solamente de los óxidos metálicos.

En la Figura 37, se observa que al hacer la medición del CaCO_3 posterior al tratamiento de calcinación, se presenta un pico a los 3641cm^{-1} , indicando la presencia de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), otro tipo de carbonato, y siendo el único pico dentro de la zona de grupos funcionales. Este pico o banda se encuentra relacionado con el enlace de estiramiento del agua O-H. Por su parte, la medición del CaCO_3 en estado natural, presentó picos en la huella dactilar, siendo producto de varios tipos de vibraciones de enlace. Se muestra una frecuencia de vibración en el primero pico a los 1410cm^{-1} , con una intensidad muy fuerte, correspondiendo a la fase mineral calcita. El segundo pico fue a los 874cm^{-1} , con una intensidad fuerte, indicando la presencia de calcita y vaterita. El último pico fue a los 712cm^{-1} , presentando una intensidad fuerte, el cual corresponde nuevamente a calcita, siendo la fase mineral predominante en este compuesto bio-renovable. Por otro lado, la medición del BaCO_3 , arrojó picos tanto en la zona de grupos funcionales como en la huella dactilar. El primer pico fue a los 2451cm^{-1} , haciendo referencia a enlaces triples. El segundo pico se presentó a los 1751cm^{-1} , donde se generan enlaces dobles de vibración $\text{C}=\text{C}$ y $\text{C}=\text{O}$, correspondiendo este último a el grupo carbonilo. El resto de las bandas se encontraron en la huella dactilar, presentándose a 1411cm^{-1} , 1060cm^{-1} , 856cm^{-1} , 693cm^{-1} y 524cm^{-1} , representando uniones de enlaces simples.

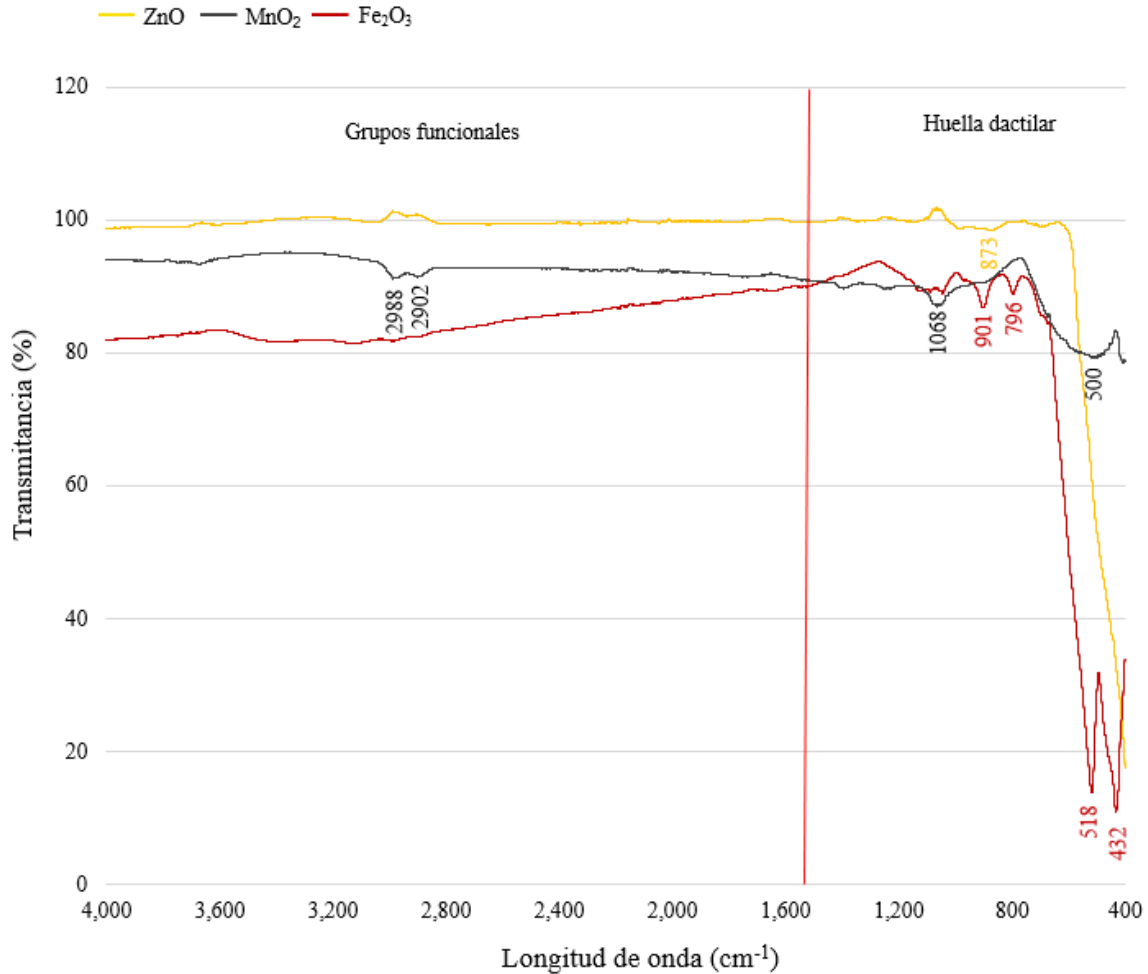
Figura 37

Transmitancia espectral de carbonatos en FT-IR



En la Figura 38 se muestran las frecuencias de vibración de los óxidos metálicos ZnO , MnO_2 y Fe_2O_3 . El ZnO solo presentó un pico en la huella dactilar a los 873cm^{-1} , representando la presencia de un enlace de unión simple. Por su parte, la medición del MnO_2 indicó dos picos en la zona de grupos funcionales y dos picos en la huella dactilar. Los primeros picos se obtuvieron a los 2988cm^{-1} y 2902cm^{-1} , en donde se presenta el enlace de estiramiento C-H. Los picos en la huella dactilar fueron a los 1068cm^{-1} y 500cm^{-1} , representando la unión de enlaces simples. Por último, el Fe_2O_3 solamente presento picos o bandas en la huella dactilar a los 901cm^{-1} , 796cm^{-1} , 518cm^{-1} y 432cm^{-1} , lo cual nuevamente, hace referencia a la unión de enlaces simples.

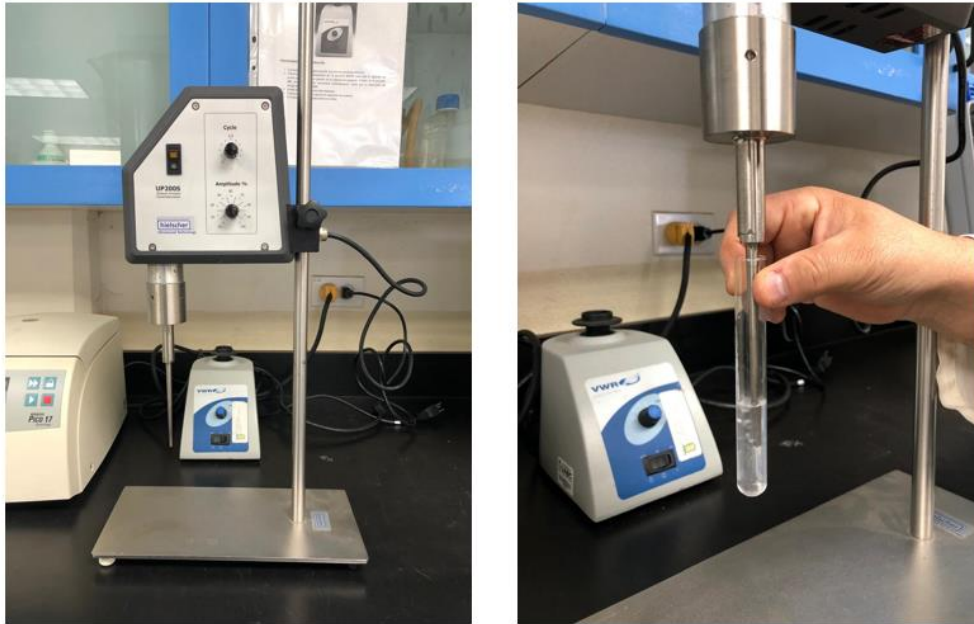
Figura 38
 Transmitancia espectral de óxidos metálicos en FT-IR



4.4.2. Análisis de absorbancia en espectrofotometría

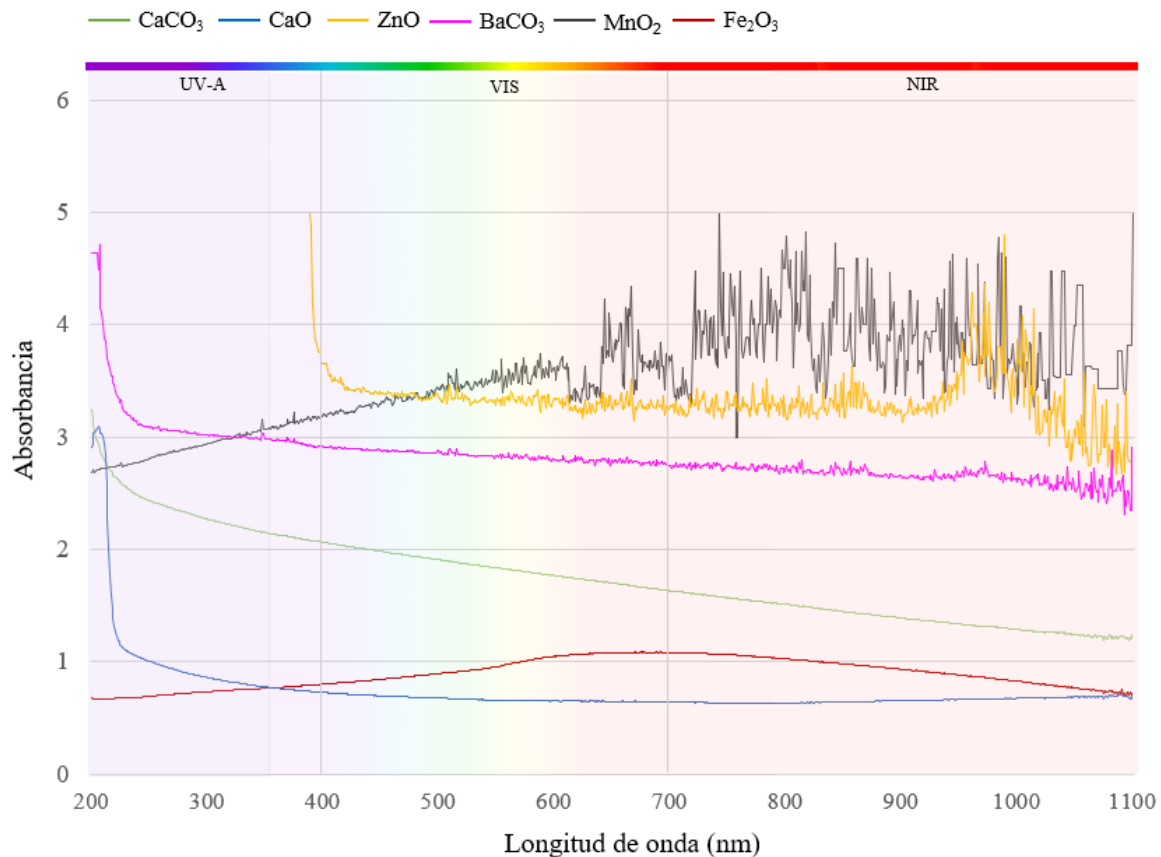
El análisis de absorbancia en espectrofotometría se llevó a cabo en el espectrofotómetro UV-VIS *GENESYS 10S, Thermo Scientific Serie*. Para la toma de medición de la absorbancia de las muestras en el equipo, dentro del rango de longitud de onda de 190 nm a 1100 nm, fue necesario un manejo en solución de los reactivos. Para ello, se disolvieron 15 mg de masa en 3 ml de agua destilada por cada reactivo analizado, a excepción del óxido férrico, en donde se disolvió 1 mg de masa, debido a que su alta concentración en la solución limitaba la lectura dentro el equipo. La disolución de los reactivos en agua destilada fue por medio de un ultrasonicador por 30 segundos (Figura 39). El último paso, consistió en introducir cada muestra dentro del espectrofotómetro UV-VIS para realizar la medición correspondiente.

Figura 39
 Ultrasonificación de reactivos inorgánicos en agua destilada



Los resultados de la absorbancia de los reactivos se muestran en la Figura 40. El rango de medición de longitud de onda permitió observar el desempeño óptico de los reactivos dentro del espectro ultravioleta (200 nm a 400 nm), visible (400 nm a 700 nm) y una porción del infrarrojo cercano (700 nm a 1,100 nm). Con ello, fue posible determinar que el óxido de calcio presenta la menor absorbancia en todos los rangos espectrales evaluados, seguido del óxido férrico. El carbonato de calcio, por su parte, a pesar de presentar una mayor absorbancia en el ultravioleta, mostró una absorbancia inferior en el infrarrojo cercano muy próxima a los dos anteriores. Por su parte, el carbonato de bario presentó un desempeño uniforme en todos los espectros, posicionándose en una absorbancia media, con relación a los demás reactivos. Mientras que, el óxido de zinc presentó una absorbancia superior que el reactivo anterior, principalmente en el espectro NIR. Por último, el óxido de manganeso presentó la mayor absorbancia en el espectro infrarrojo cercano, en comparación del resto de los reactivos. Por lo que, en el presente análisis se determinó que, considerando que el óxido férrico presentó la menor absorbancia en todo el espectro electromagnético analizado, cumple con las características necesarias para proceder al dopaje del carbonato de calcio bio-renovable, esperando aumentar el porcentaje de reflectancia solar.

Figura 40
Absorbancia espectral de los reactivos inorgánicos

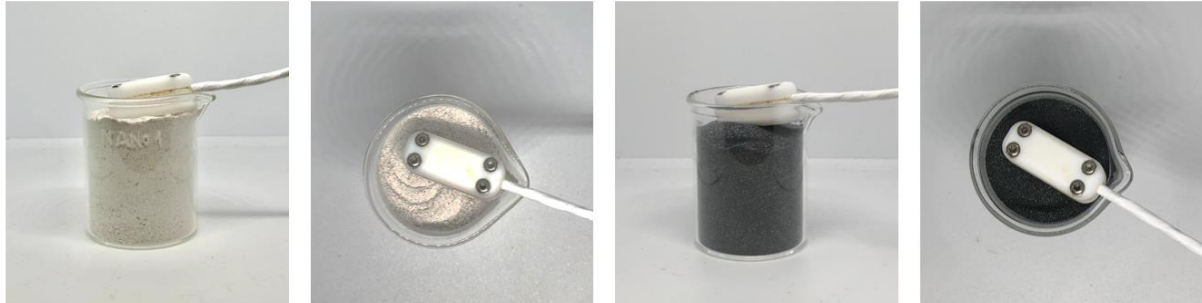


4.4.3. Análisis térmico

En análisis térmico de los reactivos fue llevado a cabo para conocer sus propiedades como materiales aislantes, considerando su aplicación final como recubrimientos en cubiertas. Por lo que, la caracterización térmica de los reactivos inorgánicos fue por medio del caracterizador térmico *KD2-PRO*, *Decagon Devices, Inc*, utilizando el sensor SH-1, debido a su compatibilidad con materiales sólidos y granulares. Por lo que, en el presente análisis, fue requerido un manejo en polvo de los reactivos. El sensor SH-1 se conforma de dos agujas de 1.3 mm de diámetro x 3 cm de largo. La separación de las agujas es de 6 mm y toma 2 minutos para hacer la caracterización. Así mismo, ambas agujas requieren un espacio libre de 1.5 cm del material en todas las direcciones para su correcta medición. Tomando en cuenta las

especificaciones anteriores, fue que se optó por colocar los reactivos en un vaso precipitado de 5 cm de alto x 4 cm de diámetro, como se muestra en Figura 41.

Figura 41
Caracterización térmica de CaCO_3 y MnO_2



Las propiedades térmicas medidas por el caracterizador térmico *KD2-PRO* fueron la conductividad térmica, la resistividad y el calor específico, las cuales vienen presentadas en la tabla Tabla 23. Las propiedades térmicas deseadas para considerar a un reactivo inorgánico con potencial para su desempeño adicional como aislante en cubiertas, es una baja conductividad térmica, una alta resistividad y un alto valor de calor específico. En el análisis térmico de los reactivos, se puede destacar que el óxido de zinc (ZnO) presentó la menor conductividad térmica, reflejándose a su vez en su alta resistividad al calor. Sin embargo, presentó el valor de calor específico más bajo. Por su parte, el dióxido de manganeso (MnO_2) representó el valor de calor específico deseado. En términos generales, todos los reactivos analizados, presentaron una conductividad menor a $0.3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, los cuales se acercan a los valores comunes en aislantes de cubiertas.

Tabla 23
Propiedades térmicas de los reactivos inorgánicos

Reactivo inorgánico	Conductividad $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	Resistividad $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$	Calor específico $\text{MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$
CaCO_3	0.170	590.0	1.220
CaO	0.122	817.1	0.637
ZnO	0.084	1184.7	0.608
BaCO_3	0.138	723.5	0.929
MnO_2	0.205	488.7	1.528
Fe_2O_3	0.106	946.2	1.208

4.4.4. *Análisis de termografía infrarroja*

El análisis de termografía infrarroja de los reactivos inorgánicos fue llevado a cabo para conocer la emisividad térmica de los mismos al estar en contacto directo con una superficie horizontal sometida a una alta temperatura. Para ello, fue necesario el manejo en polvo de los 6 reactivos. El análisis descrito en este apartado, fue llevado a cabo por medio de 3 pasos: el diseño y fabricación de porta muestra y muestra revolver, el montaje de la muestra revolver y, finalmente, la caracterización termográfica infrarroja. Todos los pasos vienen descritos en los siguientes apartados.

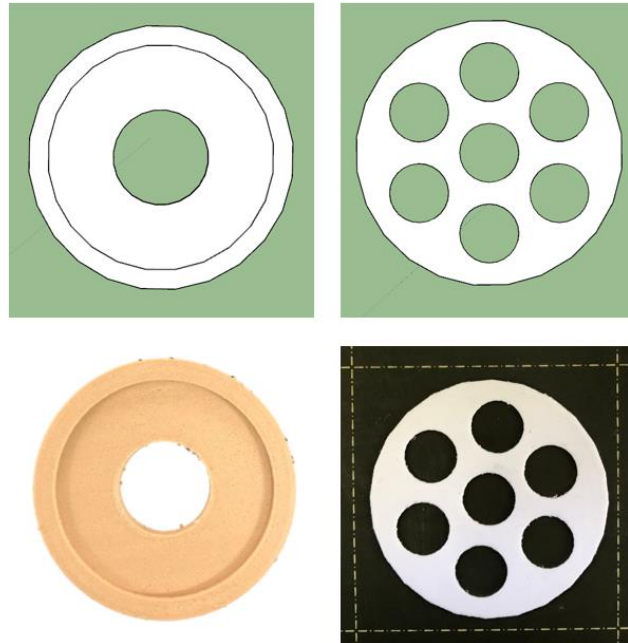
4.4.4.1. *Diseño y fabricación de porta muestras*

Para poder realizar la caracterización termográfica infrarroja fue necesario el diseño de una muestra en forma de revolver para poder depositar los reactivos. Para ello, se realizó el diseño en el software de modelado 3D en Sketchup de dos piezas. La primera fue un porta muestra y la segunda fue la muestra revolver. El porta muestra tiene un diámetro de 11 cm, con un *offset* de 1 cm y 0.5 cm de profundidad con el objetivo de colocar la muestra revolver dentro del mismo. Así mismo, al interior tiene una abertura de 4 cm de diámetro para poder remover la muestra revolver. En cuanto a la muestra revolver, se diseñó con un espesor de 0.5 cm y con 4.5 cm de diámetro, las cuales son las mismas dimensiones que el sustrato de acero galvanizado. Cuenta con 7 orificios de 2 cm de diámetro, 6 para la deposición de cada uno de los reactivos y un espacio libre al centro para el impermeabilizante térmico comercial.

Para la fabricación de ambas piezas, se requirió un procedimiento para la impresión en 3D con la impresora Prusa i3 MK3S (Tabla 16). Una vez diseñado el modelo en 3D, se trasladó al software Prusa para su laminado y el ajuste de los parámetros para imprimir, en donde se especificó el tipo de filamento, el patrón de relleno, la precisión del filamento y el modelo de la impresora empleada. El resultado final de la muestra revolver y la base correspondiente, se muestra en la Figura 42.

Figura 42

Impresión de porta muestra y muestra revolver




4.4.4.2. *Montaje de la muestra prototipo*

La matriz acrílica seleccionada para la aplicación de los reactivos inorgánicos, y posteriormente, la conformación de los recubrimientos fríos, fue el impermeabilizante térmico elastomérico Acriterm 3 años, de *Pinturas Acuario*, denominado de ahora en adelante “Acriterm”. La selección del producto fue derivada de un estudio de calidad de 15 impermeabilizantes elastoméricos de 14 marcas, por parte de la Procuraduría Federal del Consumidor. A dichos productos se les realizaron las siguientes pruebas de información al consumidor y garantía por medio del Laboratorio Nacional de Protección al Consumidor: absorción al agua, estabilidad en anaquel, permeabilidad al vapor de agua, viscosidad, resistencia a la tensión y elongación a la ruptura, adherencia en húmedo, intemperismo acelerado y flexibilidad a baja temperatura. Considerando las pruebas descritas, el análisis permitió identificar dos productos que obtuvieron una evaluación “Excelente”, al cumplir de forma satisfactoria, en donde destacó el impermeabilizante Acriterm, debido a que presentó un costo significativamente inferior al otro (PROFECO, 2023). Considerando su alta calidad y amplia distribución y accesibilidad en México, fue que se optó por la selección de dicho material como matriz acrílica. Dicho impermeabilizante está fabricado a base de resinas acrílicas modificadas

para protección de azoteas en diversos materiales de construcción. Las especificaciones técnicas del impermeabilizante Acritem vienen descritas en Tabla 24.

Tabla 24
Especificaciones técnicas del impermeabilizante térmico Acritem

Especificaciones técnicas		Imagen de referencia
Tipo	Acrílico modificado	
Densidad	1.190-1.350 (gr/cm ³)	
Viscosidad	30,000-35,000	
Tensión	150 (Lb/Plg2) mínimo	
Elongación	100 a 200%	
Rendimiento teórico	60.0 ± 2.0 % peso	
Tiempo de secado al tacto	1.0 a 1.2 m ² /L (dos manos)	
Absorción de agua	20% - 25% peso	

Una vez seleccionada la matriz acrílica, se procedió a su aplicación en el sustrato de acero galvanizado de 4.5 cm de diámetro. Para ello, se colocó el sustrato dentro del porta muestra y se colocó el impermeabilizante térmico comercial con una espátula hasta dejar la película de un espesor uniforme de 0.5 cm. Después, se colocó encima la muestra revolver para, finalmente, se depositar cada uno de los reactivos en los orificios con la pintura fresca, dejando el centro libre, y así obtener la muestra final para la caracterización (Figura 43). El acomodo de los reactivos fue el siguiente, en sentido de las manecillas del reloj: 1) CaCO₃, 2) CaO, 3) ZnO, 4) BaCO₃, 5) MnO₂ y 6) Fe₂O₃.

Figura 43
Deposición de reactivos inorgánicos en muestra revolver



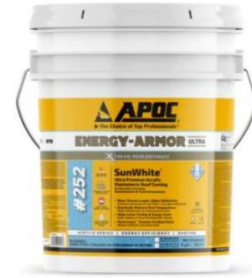
De manera comparativa, se seleccionó un producto con propiedades altamente reflectivas, disponible en el mercado a través del directorio de cubiertas frías del CRRC¹⁷, donde vienen enlistados los materiales fríos de acuerdo al valor más alto de reflectancia solar, emitancia térmica y SRI. El material frío seleccionado fue el APOC 252 Sunwhite (Tabla 25), siendo un recubrimiento elastomérico acrílico para ser utilizado en cubiertas y muros, presentando una reflectancia de 0.90, una emitancia térmica de 0.87 y un SRI de 93, conformado principalmente por TiO₂ y el CaCO₃, siendo compuestos identificados en la literatura por su alta reflectancia en los espectros visible e infrarrojo.

Tabla 25
Recubrimiento elastomérico acrílico APOC 252 Sunwhite

Nombre químico	Peso (%)	Nombre químico	Peso (%)	Imagen de referencia
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 %	

¹⁷ Cool Roof Rating Council

Hidroxietilcelulosa 0.1% a 0.5% Agua 25% a 45 %



4.4.4.3. Caracterización termográfica infrarroja

Para la caracterización de las propiedades ópticas de los reactivos inorgánicos, se realizó un análisis de termografía IR para estimar los valores de emitancia. Para ello, se utilizó la cámara termográfica *FLIR* modelo *ONE* (Tabla 16). Como material modificador de superficie se utilizó una cinta aislante número 88 de la marca 3M. La cámara y el tripié se colocaron a una distancia de 50 cm de la muestra revolver colocada en un termoplato (Figura 44).

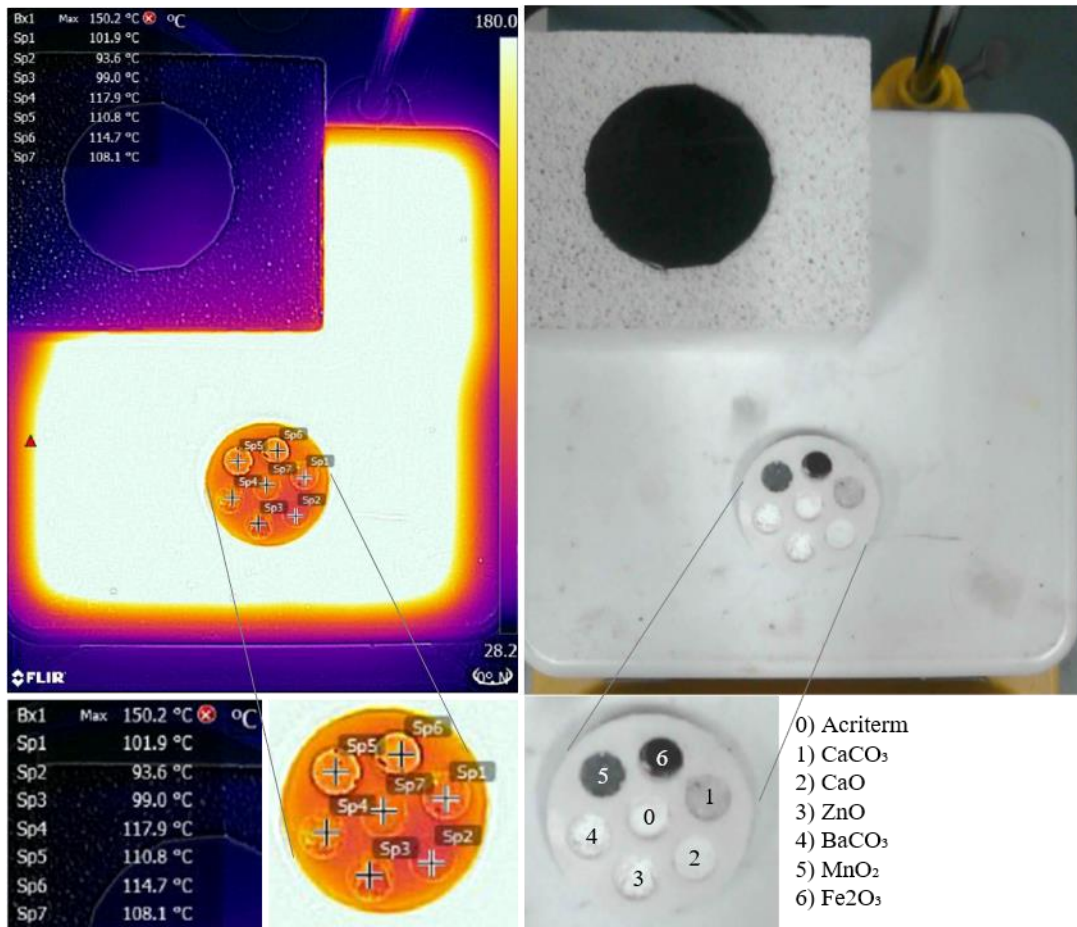
El primer paso consistió en registrar la temperatura de la cinta aislante, ingresando como parámetro de medición a la cámara termográfica una $\epsilon=0.96$, siendo el valor recomendado por Teledyne FLIR. Lo siguiente fue colocar la cinta sobre un cubo de concreto celular encima del termoplato, para retrasar la transferencia de calor. Después se colocó la muestra revolver directamente sobre el termoplato, donde la temperatura se fue incrementando gradualmente superando los 150 °C.

Para el análisis de la termografía infrarroja de los reactivos se utilizó el software *FLIR tools*, en donde las temperaturas de cada reactivo, fueron registradas bajo diferentes nomenclaturas: CaCO_3 (Sp1), CaO (Sp2), ZnO (Sp3), BaCO_3 (Sp4), MnO_2 (Sp5) y Fe_2O_3 (Sp6). Por su parte, la nomenclatura Sp7 representa el impermeabilizante térmico comercial. Como se observa en la Figura 44, se identificó que el reactivo que presentó la mayor emitancia infrarroja fue el BaCO_3 , alcanzado los 117.9°C y superando la temperatura del impermeabilizante térmico comercial, la cual fue 108.1°C. Por otro lado, el MnO_2 alcanzó los 110.8°C y el Fe_2O_3 los 114.7 °C, superaron de igual forma la temperatura del Sp7. Por el contrario, el reactivo con menor emitancia IR fue el CaO , con 93.6°C, seguido del ZnO con 99.0°C. Por su parte, el CaCO_3 también logró mantenerse por debajo del Sp7 con 6.2°C menos, alcanzando 101.9°C. Los

resultados demuestran que los dos compuestos inorgánicos bio-renovables desarrollados presentaron una menor emitancia térmica que el impermeabilizante comercial. Lo anterior podría significar una disminución de la emitancia térmica del impermeabilizante comercial con la incorporación de ambos compuestos inorgánicos bio-renovables por separado.

Figura 44

Emitancia infrarroja de los reactivos inorgánicos



4.5. *Diseño y fabricación de muestras prototipo*

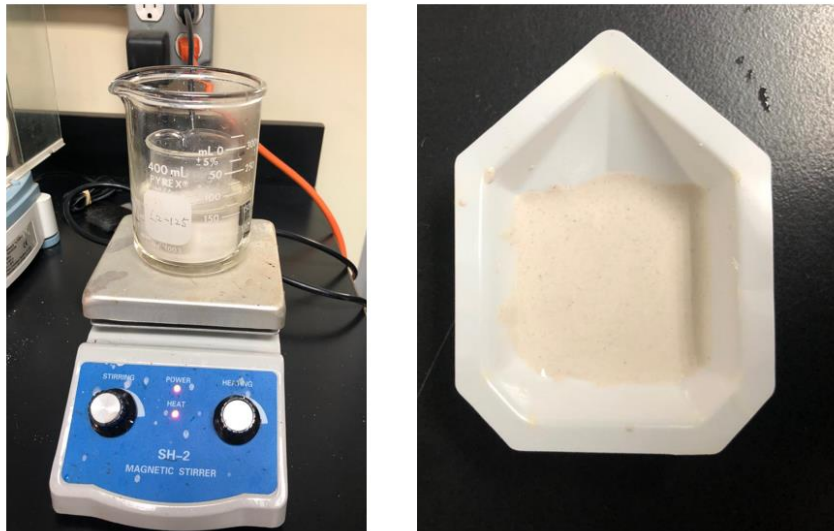
El diseño y la fabricación de las muestras prototipo conforma la etapa VI del proceso metodológico de la presente investigación (Tabla 10), la cual está conformada por una serie de pasos: síntesis de los pigmentos inorgánicos a base de CaCO₃ bio-renovable, dopaje del CaCO₃ con Fe₂O₃, composición de los recubrimientos fríos y deposición de los recubrimientos fríos. Dichos pasos serán descritos a detalle en los siguientes apartados.

4.5.1. Síntesis de los pigmentos inorgánicos a base de CaCO_3 bio-renovable

El diseño de la síntesis de los pigmentos inorgánicos fue a partir de los métodos de síntesis descritos en la sección 3.2.3.2 en el inciso a de la presente investigación (Tabla 17). El agua destilada fue seleccionada como el solvente principal para la síntesis, tomando como referencia la revisión de la literatura y debido a la disponibilidad de la misma para la presente investigación. Las estimaciones de masa fueron en la balanza de precisión PA163, OHAUS. La disolución de los compuestos inorgánicos bio-renovables con agua destilada fue en un vaso precipitado dentro de otro vaso precipitado con agua de grifo para llevar un control de la temperatura a máximo 100°C en un termo-plato. La agitación mecánica se mantuvo a 500 rpm con un agitador magnético por 45 min hasta que se evaporara el agua destilada. Finalmente, la mezcla resultó en 9 g de pigmento inorgánico. Cada pigmento fue almacenado en un tubo de ensayo de plástico con tapa (Figura 45). Como resultado final, se realizaron 3 pigmentos inorgánicos con diferentes compuestos, los cuales vienen descritos a continuación.

Figura 45

Síntesis de los pigmentos inorgánicos bio-renovables



El primero pigmento inorgánico fue a partir de 12 g de nano-partículas de CaCO_3 disueltas en 40 ml de agua destilada. El segundo pigmento inorgánico fue a partir de la mismas proporciones agregando 1.2 g de ácido cítrico (1:10) para una mayor disolución de las nano-partículas de CaCO_3 , considerando las relaciones molares identificadas en la literatura (Z. G.

Wu et al., 2017). Y, por último, el tercer pigmento inorgánico fue sintetizando 12 g de CaO en 20 ml de agua destilada. El proceso metodológico para la síntesis de los pigmentos viene descrito en la Figura 46. Así mismo, la diferencia de la cristalinidad de las muestras 1 y 2 se observó en un microscopio biológico binocular marca Leica, modelo D500, para comparar la disolución de las partículas con el uso del ácido cítrico. Dentro de la Figura 47, en la primera imagen se observa la muestra 1, mientras que en la segunda la muestra 2, donde se ve una disolución de los cristales más pequeños con el empleo del ácido cítrico.

Figura 46
Síntesis de pigmentos inorgánicos bio-renovables

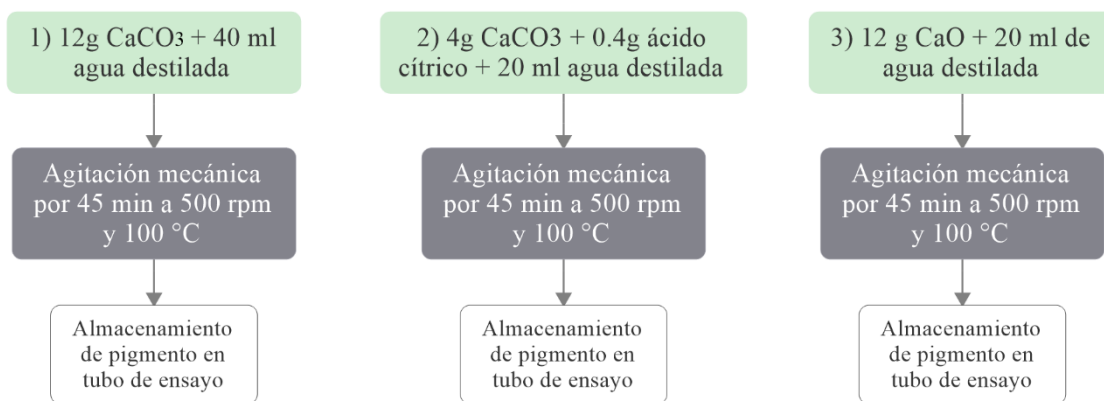
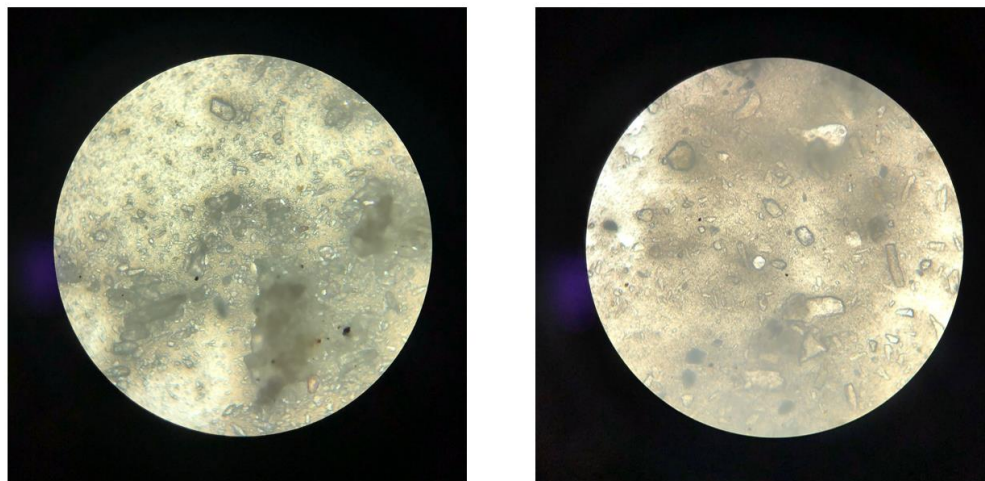


Figura 47
Cristalinidad de compuestos inorgánicos bio-renovables



4.5.2. Dopaje del CaCO_3 con Fe_2O_3

El dopaje de compuestos químicos es un proceso crítico que se da principalmente en materiales conductores, semiconductores y aislantes. El dopaje de un reactivo químico consiste en incorporar una impureza específica a un compuesto para modificar sus propiedades, mejorando características como la conductividad, la reactividad o la integridad estructural de los materiales. Este proceso no está limitado a una cantidad específica, la cual puede variar de acuerdo a los resultados esperados (Alain et al., 2000).

Los tipos de dopaje pueden clasificarse con relación de la naturaleza de los dopantes y los materiales empleados:

- a) Dopaje tipo N y tipo P: en los semiconductores, el dopaje de tipo N introduce electrones, mientras que el dopaje de tipo P crea huecos, a través de la incorporación de dopantes específicos que donan electrones o los aceptan, respectivamente (Berry, 2009).
- b) Dopaje de semiconductores orgánicos: el dopaje de semiconductores orgánicos puede implicar el empleo de compuestos moleculares que mejoran la densidad y la movilidad de los portadores de carga. Esto es conseguido por medio de la separación de grupos orgánicos de los dopantes (Werner et al., 2003).
- c) Dopaje catalizado: el dopaje N catalizado por metales de transición se ha desarrollado como método para mejorar la eficiencia del dopaje en semiconductores orgánicos. Dicho enfoque emplea dopantes de tipo precursor estables en el aire y metales de transición para mejorar el transporte de carga (Guo et al., 2021).

El dopaje del carbonato de calcio con diversos reactivos químicos es un proceso que permite mejorar sus propiedades para diversas aplicaciones, principalmente en biomateriales y nanotecnología. Para dopar el CaCO_3 con un reactivo químico, son esenciales métodos y reactivos específicos que modifiquen sus propiedades superficiales y mejoren su compatibilidad con diversas matrices (L. Zhao et al., 2009). El método de sol-gel, es un proceso que permite la incorporación de diversos compuestos orgánicos e inorgánicos en matrices de CaCO_3 ,

facilitando así diversas aplicaciones. A pesar de que el dopaje de CaCO_3 es prometedor, es necesario considerar la estabilidad y la compatibilidad de los dopantes con la matriz del CaCO_3 para garantizar los resultados esperados en aplicaciones prácticas (Avnir et al., 1991).

Para el dopaje del carbonato de calcio (CaCO_3) se optó por el uso del óxido férrico (Fe_2O_3) debido a los resultados obtenidos en la caracterización de los reactivos inorgánicos en el apartado 4.4. de la presente investigación. Por lo que, se optó por incorporar 4 proporciones graduales de Fe_2O_3 con el CaCO_3 (1%, 2.5%, 5% y 7.5%). Para ello, se realizó la misma síntesis con los equipos e instrumentos mencionados en el apartado anterior (4.5.1.). Los pigmentos inorgánicos resultantes del dopaje fueron 4 y fueron almacenados en un tubo de ensayo de plástico con tapa, como se muestra en la Figura 48.

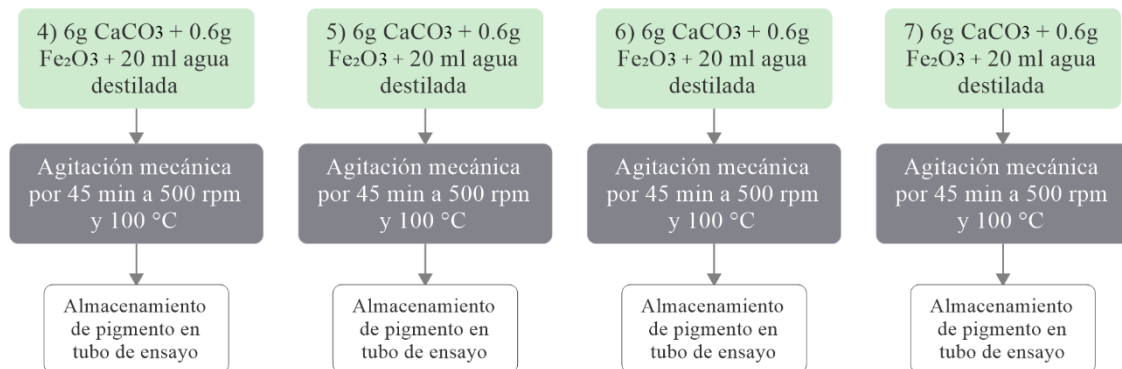
Figura 48

Mejoramiento de la reflectancia del CaCO_3 bio-renovable por medio del dopaje con Fe_2O_3



El cuarto pigmento inorgánico consistió de 6g de nano-partículas de CaCO_3 y 0.06 g de Fe_2O_3 (1%) en 20 ml de agua destilada. El quinto pigmento fue a partir de la misma cantidad de carbonato de calcio y agua destilada con 0.15g de óxido férrico (2.5%). Para el sexto pigmento se mantuvieron las mismas proporciones incrementando la cantidad de Fe_2O_3 a 0.3g (5%). Finalmente, en el último pigmento se colocaron nuevamente 6g de nano-partículas de CaCO_3 con 0.45g de óxido férrico (7.5%) en 20 ml de agua destilada. El proceso metodológico del dopaje se encuentra representado en la Figura 49.

Figura 49
Proceso metodológico del dopaje del CaCO_3 con Fe_2O_3

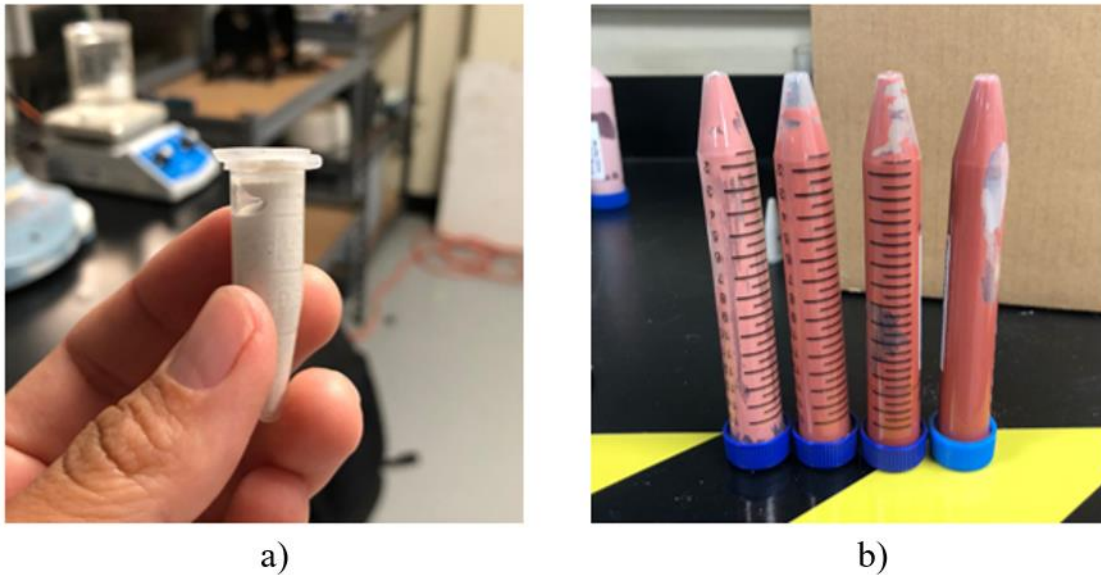


4.5.3. Composición de los recubrimientos fríos

A partir de los pigmentos inorgánicos sintetizados en el apartado anterior, fue que se procedió a la elaboración de 7 recubrimientos fríos. Para ello, se definió las proporciones de los pigmentos inorgánicos en la matriz acrílica (Tabla 24). La porción del contenido de cada pigmento inorgánico fue de 1:1 con relación al impermeabilizante térmico comercial. Las estimaciones de masa fueron en la balanza de precisión PA163, OHAUS. La mezcla de los pigmentos inorgánicos fríos con la matriz acrílica se realizó en un vaso precipitado sobre un termo-plato. La agitación mecánica se mantuvo a 200 rpm con un agitador magnético por 20 min hasta conseguir una mezcla homogénea. Finalmente, resultaron 3 materiales fríos de color blanco a partir de los pigmentos 1,2 y 3 (Figura 46) y 4 de distintas tonalidades de color rosa y rojo por medio de los pigmentos 4,5,6 y 7 obtenidos a través el dopaje (Figura 49). Los materiales fríos fueron almacenados en un tubo de ensayo de plástico con tapa (Figura 50).

Figura 50

Almacenamiento de recubrimientos a base CaCO_3 sin modificar (a) y a partir del dopaje con Fe_2O_3 (b)



4.5.4. *Deposición de los recubrimientos fríos*

La deposición de los materiales fríos fue mediante el dispositivo de recubrimiento por centrifugado, utilizando en una bomba de vacío a una presión de 65 libras por pulgada cuadrada (PSI), al igual que una presión de 65 PSI en la conexión de aire comprimido (CDA). La deposición fue por medio de la técnica de deposición por centrifugado con el equipo *Spin Coater* a 600rpm, 800rpm y 1,200rpm en un sustrato de acero galvanizado (Figura 52 y Figura 53). Así mismo se realizó la deposición en los sustratos del impermeabilizante Acriterm y el material frío *Apoc 252 Energy-Armor Sunwhite Premium Elastomeric Roof coating*, el cual presenta una reflectancia solar del 95% y se utilizó como referencia para el análisis de espectrofotometría espectral.

Figura 51

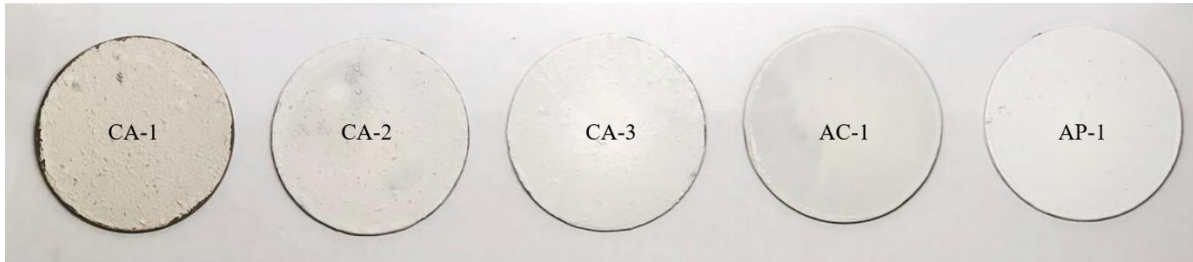
Deposición de las muestras prototipo



En la Figura 52 se presentan 5 muestras de los distintos recubrimientos depositados a través de la técnica descrita anteriormente:

- 1) CA-1: representa el primer recubrimiento conformado por la mezcla del primer pigmento inorgánico compuesto por nano-partículas de CaCO_3 bio-renovable y el impermeabilizante térmico comercial en proporción 1:1
- 2) CA-2: es el segundo recubrimiento que se conformó por el segundo pigmento inorgánico, sintetizado primeramente por la mezcla nano-partículas de CaCO_3 bio-renovable con ácido cítrico en proporción 1:10, siendo posteriormente homogeneizado con el impermeabilizante térmico comercial en proporción 1:1
- 3) CA-3: conformado por el tercer pigmento inorgánico a partir de nano-partículas de CaO bio-renovable en proporción 1:1 con el impermeabilizante térmico comercial
- 4) AC-1: es el cuarto recubrimiento compuesto únicamente por el impermeabilizante térmico elastomérico comercial marca *Acriterm* línea de producto *3 años, Pinturas Acuario*
- 5) AP-1: el quinto material está conformado solamente por el recubrimiento frío marca *Apoc 252 Energy-Armor Sunwhite Premium Elastomeric Roof coating*

Figura 52
Comparación de recubrimientos fríos bio-renovables y comerciales



En la Figura 53 se muestran el resto de los 4 materiales fríos desarrollados y depositados por medio de la técnica de centrifugado, todos a partir de los pigmentos inorgánicos sintetizados anteriormente utilizando nano-partículas de CaCO_3 bio-renovable y Fe_2O_3 en diferentes proporciones, mezclados con el impermeabilizante térmico *Acriterm* en proporción 1:1:

6) FE-1: es el recubrimiento conformado por el cuarto pigmento inorgánico sintetizado a partir del dopaje de nano-partículas de CaCO_3 bio-renovable con Fe_2O_3 (1%) mezclado con el impermeabilizante térmico comercial en proporción 1:1

7) FE-2: representa la mezcla del quinto pigmento inorgánico compuesto por nano-partículas de CaCO_3 bio-renovable y Fe_2O_3 (2.5%) y el impermeabilizante térmico comercial

8) FE-3: conformado por el sexto pigmento inorgánico a partir de carbonato de calcio bio-renovable y el óxido férrico en 5%, homogeneizado con el impermeabilizante térmico comercial

9) FE-4: siendo la conformación del séptimo pigmento inorgánico sintetizado a partir del dopaje del CaCO_3 bio-renovable con Fe_2O_3 (7.5%) y el impermeabilizante térmico comercial en proporción 1:1

Figura 53

Recubrimientos fríos a partir del dopaje de carbonato de calcio bio-renovable y óxido férrico



4.6. *Análisis de espectrofotometría*

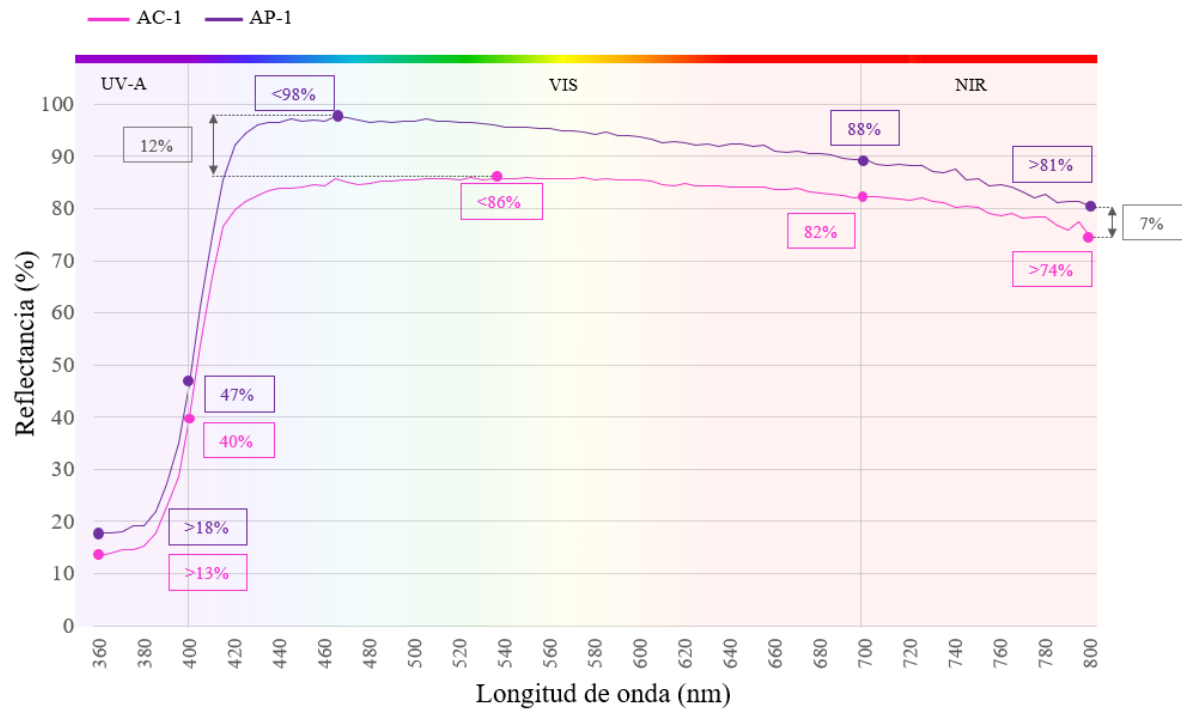
En el presente apartado se muestran los resultados de la medición de la reflectancia difusa de las muestras prototipo AC-1, AP-1, CA-1, CA-2, CA-3, FE-1, FE-2, FE-3 y FE-4, descritos en la sección anterior. Para ello, se realizó un análisis de espectrofotometría de reflectancia difusa por medio de un espectrofotómetro UV-VIS-NIR y una esfera de integración con un rango de medición de 360nm a 800nm.

4.6.1. *Reflectancia difusa de las muestras AC-1 y AP-1*

Posteriormente de la calibración automática del espectrofotómetro, se inició con las mediciones de las muestras prototipo, colocándolas en el puerto de reflectancia del lado izquierdo de la esfera de integración. El primer análisis de espectrofotometría fue con la muestra AC-1, siendo el impermeabilizante térmico comercial por sí solo. Primero se llevó a cabo este análisis, para poder determinar la reflectancia sin ninguna modificación y posteriormente analizar las muestras intervenidas con los diferentes pigmentos inorgánicos bio-renovables desarrollados previamente, con el objetivo de aumentar el porcentaje de reflectancia al homogenizar las mezclas. Después, fue medida la reflectancia de la muestra AP-1, siendo el segundo recubrimiento frío comercial sin ninguna modificación, para analizar posteriormente de manera comparativa con el resto de las muestras prototipo, ya que presenta por sí solo una alta reflectancia y emitancia térmica, siendo las características propias de un material frío (Tabla 25). Los resultados de reflectancia de ambas muestras se presentan en la Figura 54.

Figura 54

Análisis comparativo de la reflectancia entre las muestras de los recubrimientos comerciales



Dentro de la porción analizada del espectro UV-A (360nm a 400nm), tanto la muestra AC-1, como la muestra AP-1, iniciaron con una baja reflectancia entre 13.5% y 17.7%, sin embargo, ambas incrementaron su valor a los 399nm a 40% con la muestra AC-1 y a 46.5% con la AP-1.

Considerando todo el espectro VIS (400nm a 700nm) analizado, ambas muestras presentaron un comportamiento similar a diferentes porcentajes de reflectancia, alcanzando su reflectancia máxima al inicio y mostrando una disminución de la misma de forma gradual, pero manteniéndose ambas por encima del 80%. La muestra AC-1 inició con un 53.9%, hasta alcanzar una reflectancia máxima de 85.9% a los 524nm y 574 nm, pero bajando su valor a un 82.2% a los 700nm. Por su parte, la muestra prototipo AP-1, presentó un 61.1% al iniciar el espectro visible, alcanzando una reflectancia máxima de 97.6% a los 464 nm y posteriormente disminuyendo su valor a un 89.3% al final de este espectro. La diferencia de reflectancia máxima en el espectro visible fue de un 12% entre ambas muestras. Considerando que en este espectro es posible observar las longitudes de onda, a simple vista se puede notar un cambio de color

entre en las 2 muestras, como se mostró en la Figura 52. La muestra AP-1 presenta un blanco más intenso, mientras que la tonalidad de la muestra AC-1 se ve menos blanca, lo cual coincide con los resultados obtenidos en el espectro visible.

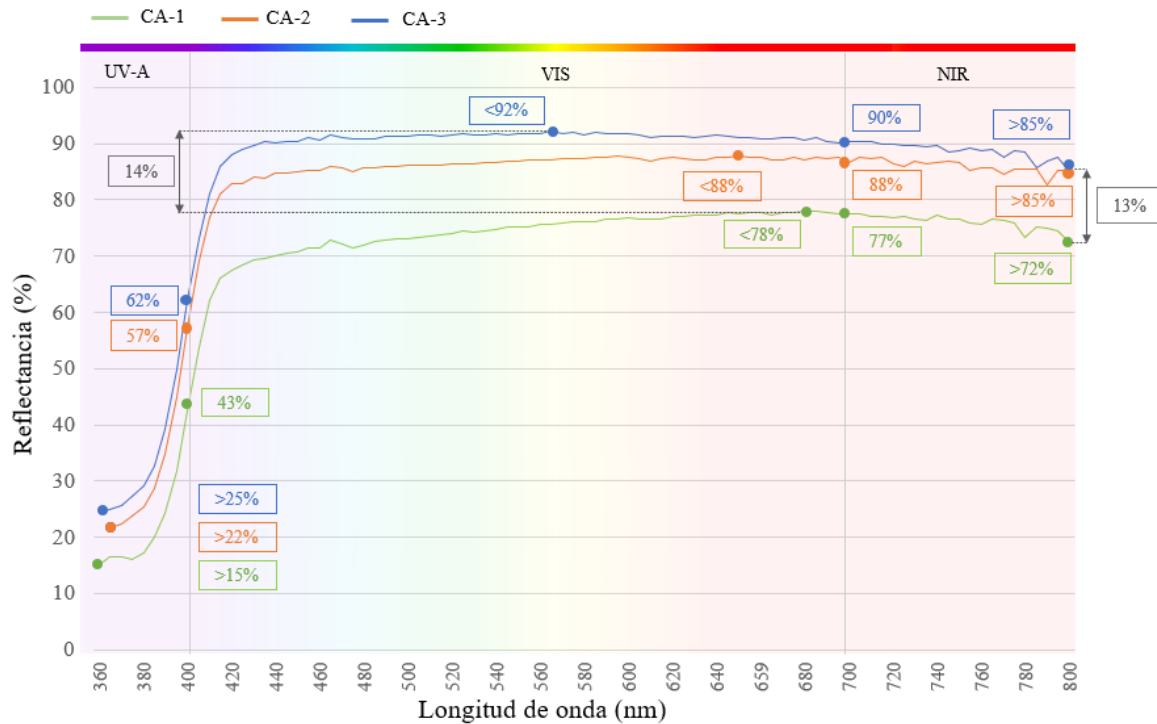
Por último, el análisis del espectro NIR (700nm a 2500nm), solo fue posible de los 700 nm a los 800 nm, debido a el rango de medición de la esfera de integración empleada en este experimento. Ambas muestras presentaron una tendencia en decadencia de la reflectancia desde el inicio del espectro infrarrojo cercano hasta los 800nm. Por su parte, la muestra AC-1 comenzó con una reflectancia máxima de 82.2%, hasta terminar con 74.4%. Mientras que, la muestra AP-1 inició con un valor superior de 88.4%, disminuyendo de igual forma su reflectancia hasta un 80.5%. Considerando la reflectancia de ambas muestras a los 800 nm, siendo la última longitud de onda en el espectro infrarrojo cercano, se observó una diferencia del 7% únicamente, y a su vez, representando el valor mínimo en este rango.

4.6.2. Reflectancia difusa de las muestras CA-1, CA-2 y CA-3

La medición de la reflectancia difusa de las siguientes muestras prototipo se realizó bajo el mismo protocolo que el apartado anterior. Primero se inició con la medición de la reflectancia difusa de la muestra CA-1, posteriormente la CA-2 y por último la CA-3. Los resultados de las mediciones de la espectrofotometría de las muestras prototipo se presentan en la Figura 55.

Figura 55

Análisis comparativo de la reflectancia entre las muestras a base de CaCO₃ bio-renovable



Analizando los resultados, se identificó que en la porción del espectro UV-A (360nm a 400nm), las 3 muestras presentaron un comportamiento similar a diferentes porcentajes de reflectancia, iniciando con el valor mínimo hasta alcanzar su valor máximo al final del espectro. La muestra CA-1 presentó la menor reflectancia en este espectro, empezando con un 15%, hasta alcanzar un 42.5% a los 400nm. Por su parte, la muestra CA-2 presentó un desempeño ligeramente superior, iniciando con un 21.7% y logrando alcanzar un 57.2%. Por otro lado, la muestra CA-3, obtuvo la reflectancia más alta de todas las muestras en este espectro, por una diferencia mínima, empezando con 24.5% y terminando con 62.1% como reflectancia máxima.

En cuanto al espectro VIS (400nm -700nm), las 3 muestras mantuvieron la misma tendencia con un comportamiento gradual al inicio y posteriormente uno relativamente lineal, sin embargo, la muestra CA-3 presentó una reflectancia superior que el resto de las muestras. Nuevamente, la muestra prototipo CA-1 presentó el valor más bajo al inicio con un 53.8% y posteriormente fue incrementando hasta alcanzar un 77.9% de reflectancia máxima a los 684 nm. Por otro lado, la muestra CA-2, inició con una reflectancia de 69.1%, hasta alcanzar un

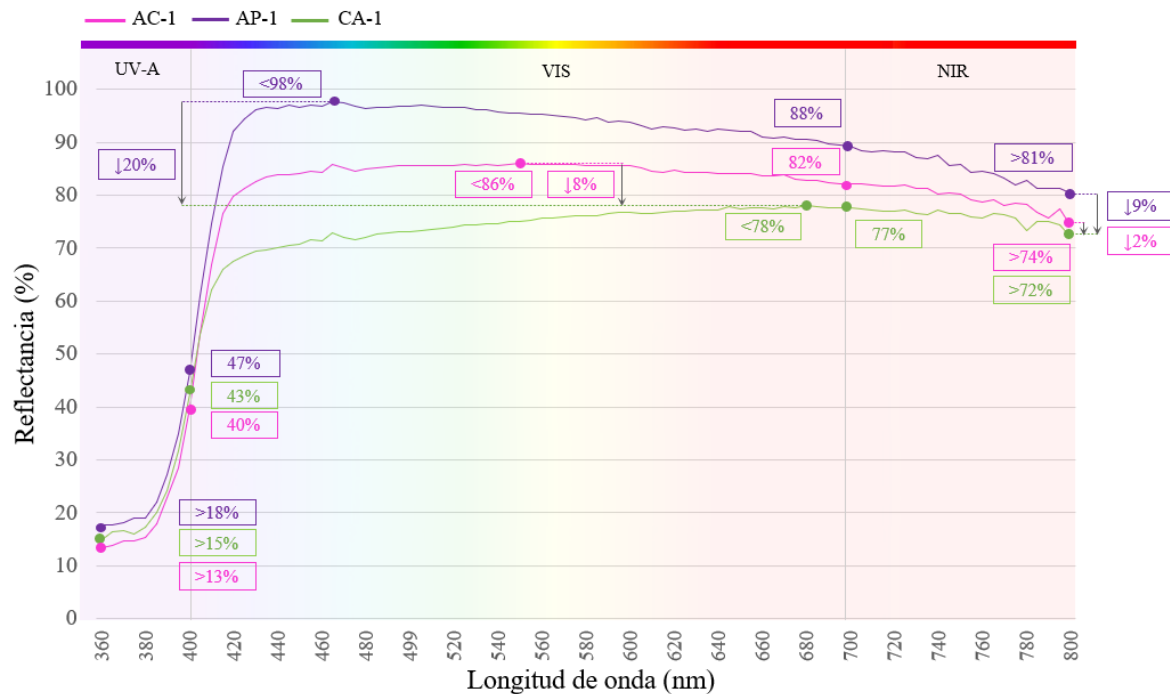
87.8% como valor máximo a los 649nm, sin embargo, la muestra CA-3 inició con una reflectancia de 73% y logró alcanzar una reflectancia máxima superior de 92.2% a los 564 nm, siendo el valor más alto del resto de las muestras. La diferencia de reflectancia máxima entre el valor más alto y más bajo de las 3 muestras fue 14% entre la CA-1 y CA-3, en el espectro visible.

Considerando la porción analizada del espectro NIR (700nm a 800nm), los resultados demostraron también un comportamiento similar entre las 3 muestras a diferentes porcentajes de reflectancia, presentando los valores más altos al inicio y terminando con los mínimos. De igual forma, la muestra CA-1 inició con el valor más bajo que el resto de las muestras con 77.5% de reflectancia máxima y una mínima de 72.3% a los 800nm. En cambio, la muestra CA-2, inició con la reflectancia máxima de 87.7%, posteriormente presentó el pico más bajo a los 789 nm con 82.7% y nuevamente incremento su valor hasta 85.3% como dato final, superando los valores de la muestra CA-1 y solamente disminuyendo su valor en 2.4%. Por su parte, la muestra CA-3 inició con la reflectancia más alta en este espectro con un 90.4%, y de igual forma que el resto de las muestras, la reflectancia fue disminuyendo hasta presentar una mínima de 85%, de la misma manera que la muestra CA-2. El valor de reflectancia a los 800nm, entre la muestra CA-1 y CA-3 fue de 13%.

Para determinar si los recubrimientos presentaban un desempeño termo-óptico deseable, se realizó un análisis comparativo de cada muestra prototipo (CA-1, CA-2 y CA-3) con relación al impermeabilizante térmico y al material frío, ambos comerciales (AC-1 y AP-1), con el objetivo de determinar si la reflectancia difusa incrementó o disminuyó. Los resultados de espectrofotometría para el análisis de la reflectancia difusa de la muestra CA-1 en comparación con la muestra AC-1 y AP-1 se presentan en la Figura 56.

Figura 56

Análisis comparativo del recubrimiento a base de CaCO₃ bio-renovable y las muestras comerciales



Dentro del espectro UV-A (360nm a 400nm), el comportamiento y la tendencia es muy similar entre las 3 muestras. La reflectancia mínima se presentó al inicio del presente espectro, hasta ir incrementando su valor hasta el final. Las 3 muestras presentaron a los 360nm una reflectancia entre 13% - 18%, siendo los valores mínimos en este espectro, mientras los valores máximos oscilaron entre un 40% - 47%.

Por su parte, en el espectro VIS (400nm a 700nm), se observó una disminución de la reflectancia difusa del impermeabilizante térmico (AC-1) al incorporarle carbonato de calcio bio-renovable en proporción 1:1 (CA-1). La disminución de la reflectancia máxima, a diferentes longitudes de onda, entre la muestra AC-1 y CA-1 fue de un 8%, decreciendo de un 86% a un 78%, mientras que la diferencia entre el material frío comercial (AP-1) y la muestra CA-1 fue de un 20%, bajando de 98% a 78%. Como se mostró en la Figura 52, la tonalidad de la muestra CA-1 presentó una tonalidad menos blanca que la muestra inicial AC-1 con la incorporación del CaCO₃, lo cual coincide con los resultados en este espectro.

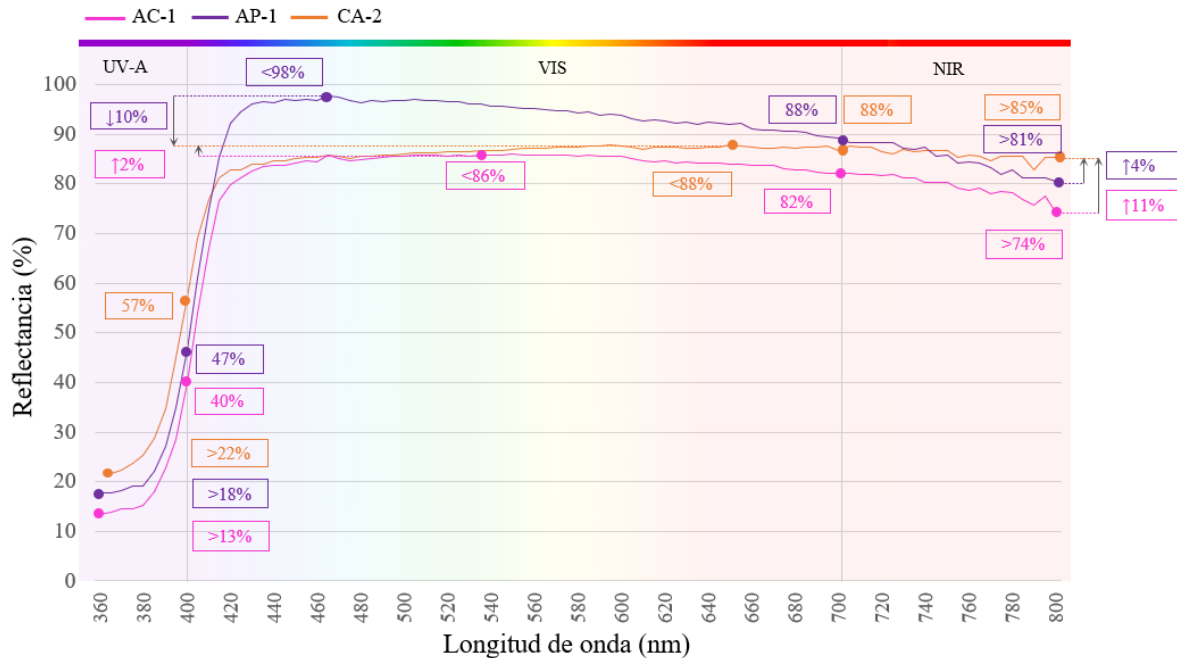
En cuanto al espectro NIR (700nm a 800nm), la diferencia entre las muestras fue menor, sin embargo, también disminuyó la reflectancia de la muestra CA-1. La diferencia de reflectancia difusa a los 800nm, entre la muestra AC-1 y CA-1 fue de solamente 2%, disminuyendo de 74% a 72%, mientras que hubo un 9% de diferencia entre la muestra AP-1 y CA-1.

A pesar de que disminuyó la reflectancia difusa del impermeabilizante térmico comercial (AC-1), con la incorporación del carbonato de calcio bio-renovable (CA-1), solamente fue de un 8% en el espectro VIS, y la diferencia fue a un menor al final del espectro NIR, siendo un 2%. Así mismo, cabe destacar que, aunque la disminución de la reflectancia fue mínima en el impermeabilizante térmico comercial, el rendimiento en peso fue incrementado y se obtuvo un ahorro económico, ambas partes beneficiadas en un 50%, ya que se obtuvo el doble del producto al implementar un compuesto obtenido a partir del ostión (*crassostrea gigas*), el cual es desechado por sector terciario, lo cual promueve a su vez, la reducción de la contaminación ambiental en la ciudad.

Por otro lado, en la Figura 57, se muestra la reflectancia difusa de la muestra del impermeabilizante térmico comercial y la incorporación del CaCO_3 y ácido cítrico (CA-2), en comparación de la muestra del mismo impermeabilizante por sí solo (AC-1) y el material frío comercial (AP-1).

Figura 57

Análisis comparativo de los recubrimientos con CaCO₃ bio-renovable y ácido cítrico y los comerciales



Dentro del espectro UV-A (360nm a 400nm), las 3 muestras presentaron la misma tendencia, con los valores mínimos al principio (13% - 22%) y posteriormente incrementando la reflectancia hasta alcanzar los valores máximos (40% - 57%) a los 400nm. La muestra CA-2 presentó los valores más altos de reflectancia en este espectro empezando con 22% y terminando con un 57%.

En cuanto al espectro VIS (400nm a 700nm), la muestra CA-2 presentó un 10% menos de reflectancia que la muestra AP-1, disminuyendo el valor máximo de 98% a 88%, a diferentes nm. Sin embargo, el valor máximo de la muestra AC-1 se incrementó en un 2% con la muestra CA-2, pasando de 86% a 88%, de igual manera, a distintas longitudes de onda. La diferencia de las tonalidades, no es muy evidente entre las muestras a simple vista. En la muestra CA-2 se puede observar un blanco ligeramente más claro, en comparación de la muestra AC-1, lo cual coincide con los resultados obtenidos en este espectro, como se puede apreciar en la Figura 52. Sin embargo, la tonalidad de la muestra CA-2, es más blanca que la CA-1, debido a la incorporación del ácido cítrico, lo cual, de igual forma, es reflejado con el incremento de la reflectancia en el espectro visible.

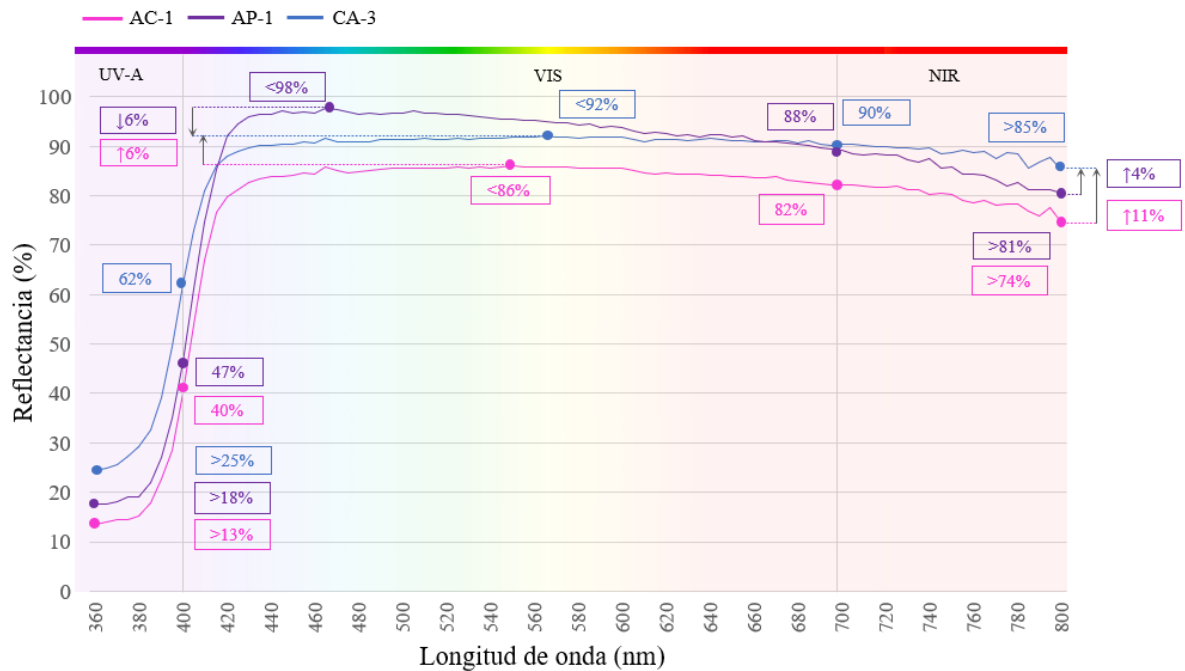
Dentro del espectro NIR (700nm a 800nm), el comportamiento de las 3 muestras fue similar, iniciando con valores superiores a 80% y después disminuyendo la reflectancia. Sin embargo, la muestra CA-2 presentó la mayor reflectancia al final del espectro. A los 700 nm, tanto la muestra CA-2 como la AP-1, mostraron la misma reflectancia de 88%. Posteriormente, el valor de reflectancia de la muestra CA-2 a los 800nm fue de 85%, siendo superior que la AP-1 en un 4% y en un 11% que la AC-1.

Analizando en conjunto, se observó que la reflectancia del impermeabilizante térmico comercial (AC-1), se incrementó en un 2% en el espectro visible y en un 11% en el infrarrojo cercano, con la incorporación del CaCO_3 y el ácido cítrico (CA-2), siendo valores superiores que la muestra anterior, donde solamente se agregó CaCO_3 (CA-1). Así mismo, la reflectancia NIR a los 800nm de la muestra CA-2, fue superior que el material frío comercial (AP-1) en un 4%. Sin embargo, es importante destacar que, debido a las limitaciones del equipo, solo fue posible analizar 100nm del espectro NIR (700nm a 2,500nm), y para poder concluir que el desempeño total de la muestra CA-2 es superior en dicho espectro, es necesario analizar su comportamiento hasta los 2,500nm. No obstante, los valores presentan resultados prometedores que podrían indicar una alta reflectancia en las siguientes longitudes de onda, y de igual forma que la muestra anterior, el rendimiento en peso y el ahorro económico del impermeabilizante térmico comercial fue duplicado con la incorporación del carbonato de calcio bio-renovable.

Por último, los valores de reflectancia difusa de la muestra del impermeabilizante térmico comercial y la incorporación del óxido de calcio (CA-3), en comparación con el mismo impermeabilizante por sí solo (AC-1) y el material frío comercial (AP-1), se muestran en la Figura 58.

Figura 58

Análisis comparativo del recubrimiento a base de CaO y las muestras comerciales



Dentro del espectro UV-A (360nm a 400nm), a pesar de que las 3 muestras presentaron la misma tendencia, incrementando el porcentaje de reflectancia conforme aumentaba la longitud de onda, la muestra CA-3 presentó valores superiores desde un inicio. A los 360nm, la muestra CA-3 superó en un 7% a la muestra AP-1 y en un 12% a la AC-1. Mientras que, a los 400nm, la muestra CA-3, alcanzó un 62% de reflectancia, la muestra AC-1 solo un 40% y la muestra AP-1 un 47%.

Considerando el espectro VIS (400nm a 700nm), la muestra CA-3 alcanzó un 92% de reflectancia máxima, presentando solo un 6% menos en comparación con la muestra AP-1, e incluso, a los 700nm, supera el valor de la AP-1 en un 2%, alcanzando un 90%. Así mismo, la muestra CA-3, aumentó la reflectancia máxima de la AC-1 en un 6%, a diferentes longitudes de onda, y a los 700nm, también supera el valor de reflectancia de la muestra AC-1 en un 8%. Como se aprecia en la Figura 52, los resultados de reflectancia de las muestras en este espectro, coinciden con las tonalidades que se observan a simple vista. La muestra CA-3, presenta un blanco más claro que la muestra AC-1 y que el resto de las otras muestras anteriores, a excepción

de la AP-1. No obstante, la tonalidad de blanco de la muestra CA-3 es la que más se asemeja a la AP-1 a simple vista.

Tomando en cuenta el espectro NIR analizado (700nm a 800nm), a los 700nm, las 3 muestras presentaron los valores de reflectancia más altos y posteriormente se fueron disminuyendo, con una tendencia similar. En todo este espectro, la muestra CA-3 presentó valores superiores que las otras 2 muestras, iniciando con un 90%, 2% superior que la AP-1, y terminando a los 800nm con un 85%, 4% superior que la AP-1. De igual forma, la muestra CA-3 incrementó los valores de la AC-1 a los 700nm en un 8% y a los 800nm en un 11%.

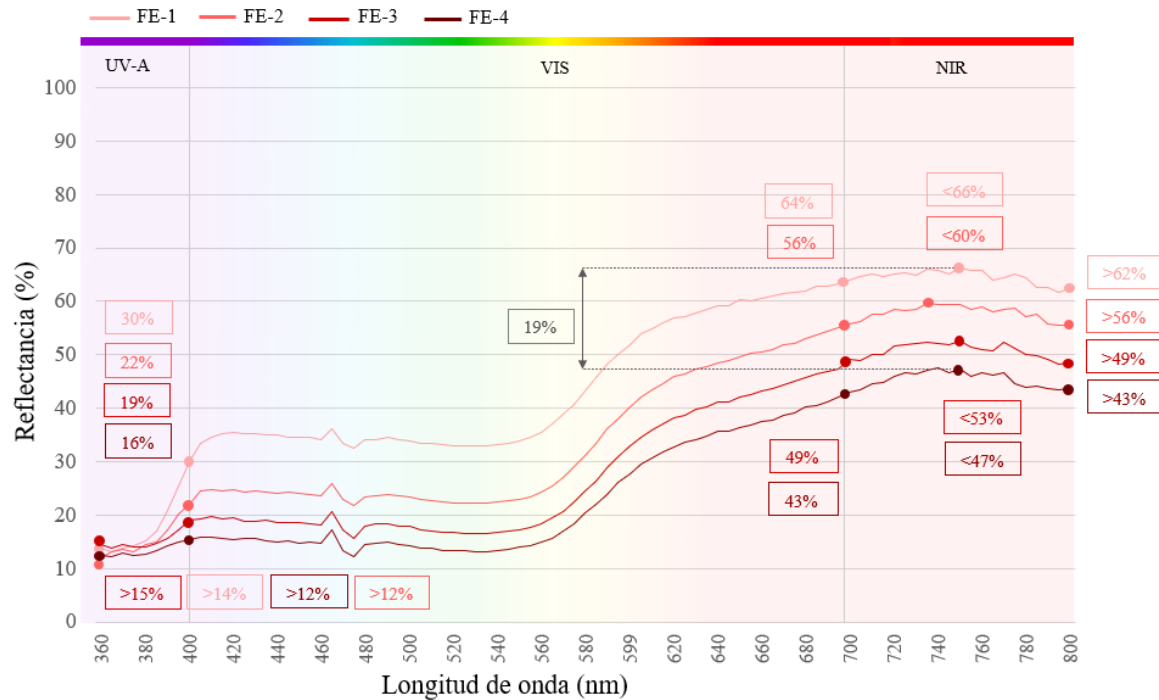
Considerando las 3 muestras de recubrimientos fríos desarrollados y analizados (CA-1, CA-2 y CA-3), a base de carbonato de calcio bio-renovable, la muestra de la combinación del impermeabilizante térmico comercial y el óxido de calcio (CA-3), presentó los valores de reflectancia más altos en todo el espectro electromagnético. Así mismo, superó el porcentaje de reflectancia de las muestras AC-1 y AP-1 en ciertas longitudes de onda, pero principalmente en el espectro NIR analizado. Como se mencionó anteriormente, a pesar de que los resultados presentan una tendencia en el aumento de la reflectancia del impermeabilizante térmico comercial con la incorporación del óxido de calcio, y por encima del material frío comercial, es importante considerar que será requerido analizar el resto del espectro NIR (700nm a 2,500nm) para determinar el comportamiento final. No obstante, de igual forma que las muestras anteriores, se presentó un incremento en el rendimiento en peso y en el ahorro económico del impermeabilizante al incorporar un subproducto desechado por el sector terciario.

4.6.3. Reflectancia difusa de las muestras FE-1, FE-2, FE-3 y FE-4

El análisis de espectrofotometría de las muestras FE-1, FE-2, FE-3 y FE-4 se presentan en la Figura 59. Las mediciones de las muestras prototipo se realizaron bajo el mismo protocolo que las anteriores. De manera general, las 4 muestras presentaron el mismo comportamiento disminuyendo únicamente el porcentaje de reflectancia difusa conforme aumentó la proporción de dopaje del carbonato de calcio con óxido férrico en cada pigmento inorgánico.

Figura 59

Análisis comparativo entre las muestras a partir del dopaje de CaCO_3 bio-renovable con Fe_2O_3



Dentro del espectro UV-4 (360nm a 400nm), las 4 muestras presentaron los valores más bajos de reflectancia al inicio, entre 11.9% y 14.5%. Sin embargo, el porcentaje más alto de reflectancia en este espectro vario entre las 4 muestras prototipo. En la muestra FE-1, se alcanzó una reflectancia de 29.9%, en la muestra FE-2 un 22.1%, en la muestra FE-3 un 19%, y el porcentaje más bajo fue en la muestra FE-4 con un 15.5%, todas a los 400nm.

Considerando el espectro VIS (400nm -700nm), todas las muestras analizadas en este apartado, mantuvieron la misma tendencia, iniciando con un comportamiento relativamente lineal y posteriormente uno gradual hasta alcanzar la reflectancia máxima en este rango. La muestra FE-1, inició con un 33.3%, manteniendo relativamente esta tendencia hasta los 549nm, donde empezó a ir en aumento hasta alcanzar una reflectancia máxima de 64% a los 700nm. Por su parte, la muestra FE-2 comenzó con una reflectancia de 24.4%, manteniendo la misma tendencia que la muestra anterior hasta los 569 nm, hasta obtener un valor máximo de 55.8%, de igual forma, a los 700nm. De manera muy similar la muestra FE-3 presentó una reflectancia inicial de 19.3% y la muestra FE-4 un 15.5%, conservando la misma tendencia que las muestras anteriores. La muestra FE-3 logró alcanzar un 49.1%, mientras que con la muestra FE-4 se

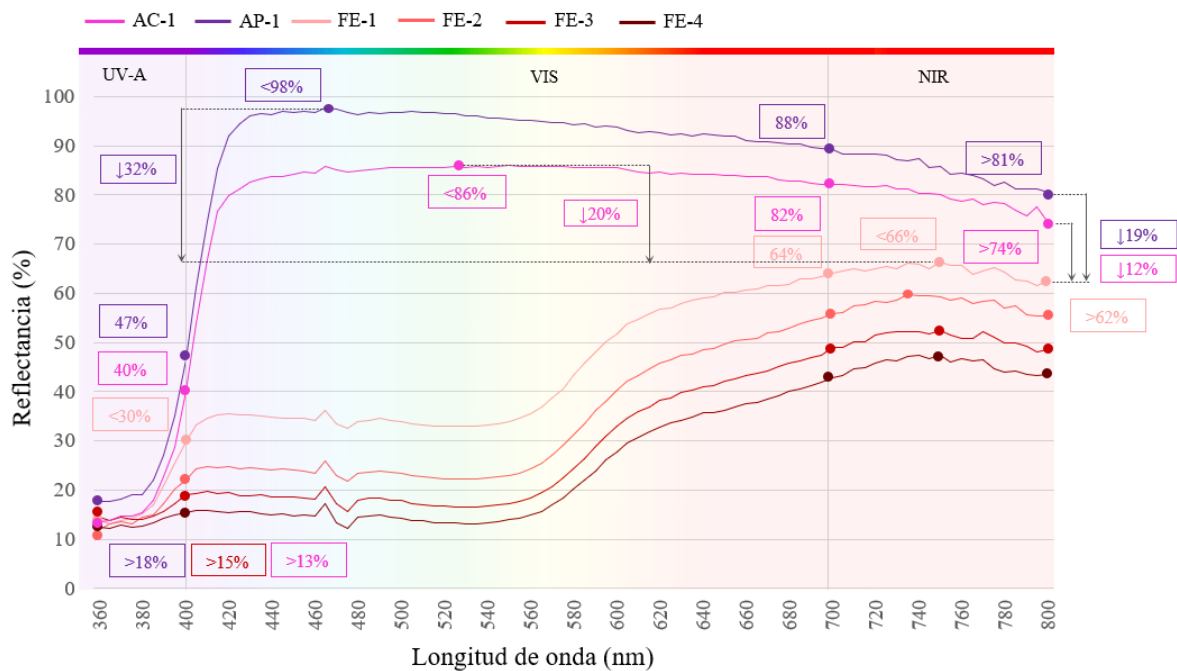
obtuvo una reflectancia máxima de 42.9%. Visualmente, los resultados obtenidos en este espectro coinciden con las tonalidades que se observan en las muestras, como se ve en la Figura 53. Conforme la cantidad de óxido de férrico aumentó en el dopaje del carbonato de calcio, la reflectancia disminuyó gradualmente en cada muestra dentro del espectro VIS y con ello la tonalidad se percibió más oscura.

En cuanto a la porción medida del espectro NIR (700nm a 800nm), se presentaron resultados con el mismo comportamiento al inicio y al final de este rango en cada muestra. La muestra FE-1 inició con un valor de 64.6%, hasta alcanzar una reflectancia máxima de 66.3% a los 750nm, siendo el valor más alto obtenido en todas las muestras en este espectro, mientras que, a los 800nm, la reflectancia disminuyó solamente a 62.4%. Por su parte, la muestra FE-2 presentó una reflectancia inicial de 56.1%, y posteriormente alcanzando una reflectancia máxima de 59.7% a los 734nm, y de igual forma presentó una disminución a los 800nm, terminando con un 55.5%. Con una tendencia similar, la muestra CA-3 inició con una reflectancia de 48.9%, alcanzando su valor máximo a los 749nm con un 52.5% y terminando el final de este rango con un 48.5%. Por otro lado, el valor más bajo de reflectancia en este espectro lo presentó la muestra CA-4 con una reflectancia de 43.4% a los 704 nm. Esta muestra alcanzó su reflectancia máxima en un rango de longitud de onda muy similar que las muestras anteriores, a los 750nm con un 47.3%, y de igual forma, disminuyendo su valor a los 800 nm a un 43.6%. La diferencia de reflectancia máxima entre las muestras con el valor más alto y el más bajo, siendo las muestras FE-1 y FE-4, fue de 19%, así como la diferencia de los mismos valores a 800 nm.

Los resultados de reflectancia obtenidos de las muestras del impermeabilizante térmico comercial con la incorporación del carbonato de calcio con diferentes proporciones de dopaje con óxido férrico (FE-1, FE-2, FE-3 y FE-4), en comparación con el mismo impermeabilizante por sí solo (AC-1) y el material frío comercial (AP-1), se encuentran representados en la Figura 60.

Figura 60

Análisis comparativo entre las muestras a partir del dopaje de CaCO_3 con Fe_2O_3 y las comerciales



Dentro del espectro UV-A analizado (360nm a 400nm), todas las muestras presentaron la misma tendencia, iniciando con los valores más bajos de reflectancia y terminando con los más altos. La reflectancia difusa más alta obtenida al inicio con las muestras con óxido férrico fue la FE-3 con un 15%, superando en 2% la AC-1, pero quedando por debajo de la AP-1 en un 3%. Por otro lado, los valores más altos obtenidos en este espectro se dieron al final, a los 400nm, en donde la muestra FE-1 presentó la reflectancia más alta alcanzando un 30%, sin embargo, quedo por debajo de la AC-1 en un 10% y de la AP-1 en un 17%.

Considerando el espectro VIS (400nm a 700nm), las muestras con óxido férrico presentaron un comportamiento distinto que las muestras con recubrimientos comerciales. Las primeras presentaron un comportamiento lineal al inicio y posteriormente fueron duplicando los valores, mientras que las segundas alcanzaron su reflectancia máxima entre los 460nm y 530nm y después fueron disminuyendo su valor entre 10% a 4%. A diferencia de las muestras AP-1 y AC-1, las muestras con óxido férrico no presentaron su valor de reflectancia máxima en este rango. El valor de reflectancia más alto alcanzado en este espectro fue por la muestra FE-1 con un 64% a los 700nm. No obstante, con la incorporación del óxido férrico, el valor de la muestra

AC-1 disminuyó su valor máximo en un 20% en comparación con la muestra FE-1, y así mismo, quedo por debajo de la AP-1 en un 32%. Cabe destacar que, a pesar de que las muestras con óxido férrico presentaron valores de reflectancia más bajos que los recubrimientos comerciales, estas muestras presentan pigmentos de distintas tonalidades de color rojo, como se muestra en la Figura 53, lo cual presenta ventajas para su aplicación no solo en cubiertas, sino también en fachadas de edificios, evitando así deslumbramiento que es común en recubrimientos blancos.

En cuanto al espectro NIR analizado (700nm a 800nm), la tendencia de las 4 muestras con óxido férrico fue incrementar al valor máximo de reflectancia entre los 720nm a 740nm y posteriormente disminuir su valor a un 4% al final de este rango. Mientras que el comportamiento de las muestras con recubrimientos comerciales fue iniciar con la reflectancia más alta en este espectro y después disminuir su valor entre un 7% y 6%. Las muestras con óxido férrico presentaron los valores de reflectancia máxima, alcanzando el valor más alto de 66% con la FE-1. De igual forma que en los rangos anteriores, el valor de reflectancia a los 800 nm de la muestra FE-1 quedo por debajo de AC-1 en un 12% y de la AP-1 en un 19%. Sin embargo, la disminución de la reflectancia del impermeabilizante térmico (AC-1), fue mucho menor en el espectro NIR analizado, en comparación de los rangos anteriores.

Es importante destacar que, considerando que en el espectro NIR se presenta un gran interés para la investigación, ya que es en donde la reflectancia solar genera la mayor cantidad de calor, los resultados muestran que se puede mantener una reflectancia considerablemente alta a pesar de incorporar pigmentos con color. Sin embargo, al igual que los resultados anteriores, es necesario realizar un análisis completo de todo el espectro del infrarrojo cercano (700nm a 2,500nm) para determinar el comportamiento total de las muestras en el resto de la longitud de onda. Así mismo, de igual forma que las muestras anteriores, el rendimiento del impermeabilizante térmico comercial fue duplicado, así como el ahorro económico, debido a la incorporación de la proporción 1:1 con el carbonato de calcio bio-renovable, como subproducto del sector terciario.

DISCUSIÓN

La isla de calor urbana es un fenómeno que afecta directamente la salud-morbilidad, salud-mortalidad, calidad ambiental urbana, energía y confort humano. Dicho fenómeno tiene un mayor impacto en el consumo energético de los edificios, debido a que las cargas térmicas son absorbidas por la envolvente arquitectónica, principalmente en el techo (Aghamohammadi & Santamouris, 2022). De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020, en México las construcciones con techos de lámina se encuentran dentro del sector vulnerable, ya que las cargas térmicas que indican sobre este tipo de cubierta son absorbidas al interior, repercutiendo en los aspectos descritos anteriormente. Desde este panorama, para atender con una propuesta de mitigación y prevención de la ICU, en la presente investigación se determinó como objeto de estudio las propiedades termo-ópticas en la elaboración de recubrimientos fríos, considerando que este tipo de material permite reflejar y emitir la radiación incidente.

Las nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) son unas de las más ampliamente utilizadas en la elaboración de materiales fríos, por ser un semiconductor con propiedades fisicoquímicas únicas, que permiten una amplia reflectancia espectral (Dias et al., 2023; Rosa et al., 2023). Sin embargo, algunas de las principales limitantes que presenta el uso de estos pigmentos, son su alto costo y el contenido de metales pesados, tóxicos y perjudiciales para la salud humana (Sameera et al., 2019; Yuan et al., 2018). A su vez, por cada tonelada producida de escoria de titanio a partir de materias primas y minerales, se forman 0.35 toneladas de monóxido de carbono, impactando negativamente en el medio ambiente, lo cual limita su aplicación y el desarrollo sustentable (Gonchar, 2023).

Por otro lado, el carbonato de calcio (CaCO_3) es un compuesto químico inorgánico natural que también ha permitido el desarrollo de materiales fríos, en conjunto con otros compuestos o por sí solo (Dong et al., 2022; Li et al., 2020; Mayta et al., 2023; Tang et al., 2023; Wu et al., 2020). Sin embargo, dentro de la literatura revisada, ninguno de los estudios reporta una obtención del carbonato de calcio de forma renovable.

De acuerdo al Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca, el cultivo del ostión (*crassostrea gigas*) representa alrededor del 20% del volumen total en la producción acuícola de Baja California (SEPESCA, 2015). El constante aumento del consumo del ostión, genera un incremento en el desecho de los exoesqueletos del molusco propiciando la contaminación ambiental (Mo et al., 2018). Con el objetivo no solo de reutilizar, sino también de contribuir a

la mitigación del sobrecalentamiento urbano, en la investigación desarrollada también se propone explotar las cualidades de la composición química principal del ostión, consistiendo de CaCO_3 , el cual permite la reflexión y emisión del calor. Debido a ello, se plantea el desarrollo de recubrimientos fríos a partir de la síntesis de 7 pigmentos inorgánicos a base de CaCO_3 bio-renovable, como subproducto obtenido del desecho del consumo del ostión en la ciudad de Ensenada, Baja California.

La síntesis de los pigmentos inorgánicos fue empleando una combinación del método sol-gel y de precipitación. Se sometió a un proceso de calcinación el CaCO_3 a una temperatura de 900 C° por 2 horas, con el objetivo de transformarlo a óxido de calcio (CaO) y así aumentar la reflectancia solar de un recubrimiento, como en estudios anteriores (Mo et al., 2018). A pesar de que el método sol-gel implica un calcinado a altas temperatura, los rangos de temperatura implican menos tiempo y grados Celsius que el método de reacción en estado sólido (Fedel et al., 2023; Sameera et al., 2019). A su vez, el análisis de difracción de rayos X (XRD), permitió corroborar la composición de fase y la estructura cristalográfica de los productos obtenidos, como en estudios anteriores donde los patrones de los picos característicos, demostraron la presencia del CaO y de calcita, una de las fases minerales del CaCO_3 , así como en la presente investigación (Djobo et al., 2016; Hossain & Roy, 2019). Por su parte, en un estudio desarrollado por Lertwattanaruk, Makul y Siripattaraprat (2012), en la utilización de 4 distintas especies de exoesqueletos de moluscos para la sustitución del cemento Portland en un 20%, se logró reducir la conductividad térmica del concreto a 0.8 W/m-K , mientras que este mismo parámetro evaluado en el CaCO_3 bio-renovable puro de la presente investigación fue de 0.170 W/m-K , un valor aún más bajo, a pesar de no ser evaluado como un sustituto del cemento.

Asimismo, con el objetivo de modificar las propiedades termo-ópticas del CaCO_3 , se realizó un dopaje de dicho compuesto. El dopaje de compuestos químicos con óxidos metálicos permite mejorar características como la conductividad, la reactividad, la reflectancia solar y la integridad estructural, debido a la formación de electrocatalizadores (Zhou et al., 2020). Sin embargo, a pesar de que el dopaje de CaCO_3 es prometedor, es necesario considerar la estabilidad y la compatibilidad de los dopantes con la matriz del CaCO_3 para garantizar los resultados esperados. De igual forma, el dopaje se realizó utilizando el método sol-gel, ya que permite la incorporación de diversos compuestos orgánicos e inorgánicos en matrices de CaCO_3 ,

facilitando así diversas aplicaciones (Avnir et al., 1991). A su vez, este método tiene la ventaja de obtener un mayor control en la pureza, composición y microestructura debido a que la mezcla de componentes asegura la homogeneidad del producto final (Veloso et al., 2021).

Tomando en cuenta los 3 recubrimientos sin el dopaje del CaCO_3 bio-renovable, el recubrimiento con CaO presentó la reflectancia solar máxima con un 92.2% a los 564 nm y un 90.4% a los 700 nm. Aunque el sobrecalentamiento de las superficies de los edificios es consecuencia principalmente del 52% de la radiación solar infrarroja (700nm–2,500nm) dentro del espectro electromagnético, el 43% está conformado por la energía visible (400nm–700nm), por lo que también es importante reflejar una gran porción en este rango para disminuir las cargas térmicas (Akbari et al., 2006; Rosati et al., 2021b). Así mismo, el empleo del CaCO_3 en una pintura acrílica para el desarrollo de un material de enfriamiento radiativo, ha demostrado un ahorro energético de 70-105 Wh/m^2 / por día, suponiendo que la eficiencia media de la red de corriente alterna (AC), sea de 15, y considerando una irradiación solar total de 5,000 Wh/m^2 por día, lo cual promueve su uso como estrategia de mitigación pasiva de la ICU al evitar el sobrecalentamiento de superficies urbanas (Li et al., 2020).

La selección del reactivo para el dopaje del CaCO_3 bio-renovable fue por medio de una caracterización termo-óptica. Para ello, se realizaron distintos análisis de absorbancia en espectrofotometría, de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, un análisis térmico y uno de termografía infrarroja, los cuales han permitido en diversos estudios observar el comportamiento termo-óptico en recubrimientos fríos (Xiang & Zhang, 2018; Tang et al., 2023; Yuan et al., 2018). El dopaje se realizó incorporando proporciones graduales de óxido férrico (Fe_2O_3) en la síntesis de los pigmentos inorgánicos, obteniendo así, 4 pigmentos con distintas tonalidades de color rojo. En investigaciones anteriores donde se ha empleado el CaCO_3 para la elaboración de material fríos, el color se ha limitado al blanco, debido a la tonalidad natural de este mineral (Li et al., 2020; Mayta et al., 2023; Wu et al., 2020). Sin embargo, los recubrimientos blancos pueden generar deslumbramiento al ser aplicados en techos con pendientes muy inclinadas o en otras superficies visibles en edificios (Santamouris & Kolokotsa, 2016). Por lo que, a pesar de disminuir un 20% el porcentaje de reflectancia del impermeabilizante térmico comercial en la porción VIS, los recubrimientos obtenidos a través del dopaje permiten ampliar su aplicación al mejorar su desempeño en el aspecto estético, evitando así, el deslumbramiento. Además, el empleo de materiales fríos con color aplicados

en edificios residenciales, ha conseguido un ahorro energético anual del 12.9% con el uso de pigmentos de hierro, evitando de igual forma el sobrecalentamiento urbano (Rong et al., 2020).

Cabe destacar que, otra virtud obtenida, fue el rendimiento en peso incrementado en los 7 recubrimientos, implicando un ahorro económico, ya que se duplicó la cantidad del impermeabilizante al incorporar un subproducto del sector terciario local como materia prima. En el desarrollo de materiales fríos, los estudios que reportan la reutilización de residuos en su producción son limitados. Dentro de la literatura revisada, solamente un estudio reportó la reutilización de escoria básica de horno de oxígeno para la elaboración de un material frío (Wu et al., 2020). Por lo que, la propuesta desarrollada en esta investigación, promueve la posibilidad del desarrollo de un recubrimiento frío sustentable a través de la economía circular.

Retomando la pregunta de investigación: *¿Cómo se puede incrementar experimentalmente la reflectancia solar de recubrimientos fríos diseñados a partir de la síntesis y dopaje de pigmentos inorgánicos con una matriz de carbonato de calcio bio-renovable de bajo costo para el enfriamiento radiativo de superficies urbanas?*; con base a los resultados obtenidos, se demuestra que los 7 recubrimientos fríos desarrollados a base de pigmentos inorgánicos compuestos por carbonato de calcio bio-renovable extraído de los exoesqueletos del ostión (*crassostrea gigas*), presentan una reflectancia difusa con valores altos considerados en la literatura pertinente, lo cual, con su aplicación principalmente en la cubierta de la vivienda vulnerable en México, se permite una disminución en las cargas térmicas por medio de un enfriamiento radiativo debido a la alta reflectancia obtenida en los espectros VIS (400nm-700nm) y NIR (700nm-2,500nm).

CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

En la presente investigación se realizó el diseño y la caracterización de 7 recubrimientos fríos altamente reflectivos de la radiación VIS/NIR, conformados por pigmentos inorgánicos a base de carbonato de calcio bio-renovable: un recubrimiento solamente a base de CaCO_3 , un recubrimiento compuesto por CaCO_3 y ácido cítrico, un recubrimiento conformado por CaO y 4 recubrimientos a base del dopaje de CaCO_3 con incorporaciones graduales de Fe_2O_3 . El desarrollo de muestras prototipo fue por medio de la técnica de deposición de recubrimiento por centrifugado.

La obtención del CaCO_3 bio-renovable fue a partir del tratamiento y molienda de exoesqueletos de ostión (*crassostrea gigas*), como residuos generados por el sector terciario en la ciudad de Ensenada, Baja California, como subproducto. Por medio de un análisis mecano-óptico de topografía, fue posible observar el tamaño de partícula del CaCO_3 bio-renovable, siendo de 250nm a 400nm. La síntesis de los pigmentos inorgánicos fue empleando distintas etapas del método sol-gel y de precipitación. El primero pigmento inorgánico fue a partir de nano-partículas de CaCO_3 bio-renovable disueltas en agua destilada en proporción 1:3. El segundo pigmento consistió en la síntesis de las mismas proporciones agregando ácido cítrico en proporción 1:10 con relación a las nano-partículas. Para el tercer pigmento, se calcinó el CaCO_3 a una temperatura de 900C° por 2 horas para su transformación a CaO , consiguiendo así un aumento en la reflectancia solar del pigmento. El análisis de difracción de rayos X (XRD), permitió observar la presencia de CaO y de calcita, una de las fases minerales del CaCO_3 .

Para llevar a cabo el dopaje del CaCO_3 bio-renovable, primero se realizó una caracterización termo-óptica de 4 reactivos inorgánicos, utilizando de un espectrofotómetro UV-VIS con un rango de medición de 200 nm a 1,100 nm, un espectrómetro con un rango de longitud de onda de $8,300 - 350 \text{ cm}^{-1}$, un caracterizador térmico con un rango de 0.02 a 2.00 W ($\text{m}\cdot\text{K}$) (conductividad térmica), 50 a 5,000 $^\circ\text{C} \cdot \text{cm}/\text{W}$ (resistencia térmica) y 0.5 a 4.0 $\text{mJ}/(\text{m}^3\text{K})$ (calor específico volumétrico) y una cámara termográfica en la longitud de onda infrarroja de 8 a 14 μm .

En el análisis de espectrofotometría UV-VIS, se observó que el óxido férrico (Fe_2O_3) presentó la menor absorbancia en todo el espectro electromagnético analizado. En el análisis térmico el óxido de zinc (ZnO) demostró una conductividad térmica de $0.084 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ y una resistividad térmica de $1184.7 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$, los cuales fueron los valores más bajos. Por su parte,

el óxido de manganeso (MnO_2) presentó $1.528 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ de calor específico, siendo el valor más alto de todos los reactivos analizados.

En cuanto al análisis de termografía infrarroja, se identificó que el reactivo que presentó la mayor emitancia infrarroja fue el BaCO_3 , alcanzado los 117.9°C y superando la temperatura del impermeabilizante térmico comercial, la cual fue 108.1°C . Por otro lado, el MnO_2 alcanzó los 110.8°C y el Fe_2O_3 los 114.7°C . Por el contrario, el reactivo con menor emitancia IR fue el ZnO con 99.0°C . Considerando los resultados anteriores, se realizó un dopaje de 4 proporciones graduales de Fe_2O_3 con CaCO_3 (1%, 2.5%, 5% y 7.5%) a partir de la disolución en agua destilada como en la síntesis anterior, obteniendo así, 4 pigmentos inorgánicos.

A partir de los pigmentos inorgánicos sintetizados, se elaboraron los recubrimientos fríos por medio de 7 muestras prototipo, donde la porción del contenido de cada pigmento fue de 1:1 con relación a un impermeabilizante térmico comercial nacional. La medición de la reflectancia difusa de los recubrimientos fríos, fue por medio de un espectrofotómetro UV-VIS-NIR y una esfera de integración en un rango de 360nm a 800nm. A su vez, se analizó de manera comparativa la reflectancia de 2 muestras prototipo adicionales, la primera fue la del impermeabilizante térmico comercial empleado denominada AC-1, la cual alcanzó un valor máximo de 85.9% a los 524nm y un 82.2% a los 700nm por sí solo, y la de un recubrimiento frío comercial internacional denominada AP-01, obteniendo una reflectancia máxima de 97.6% a 464nm y un 88.4% a los 700nm.

En las 3 muestras prototipo desarrolladas únicamente con CaCO_3 bio-renovable, la muestra con CaO denominada CA-3, presentó los valores más altos de reflectancia en todo el espectro electromagnético analizado, alcanzando la reflectancia más alta de 92.2% a los 564 nm y un 90.4% a los 700 nm, seguida de la muestra con ácido cítrico, a la cual se le denominó CA-2, con un 87.8% a los 649nm y 700nm. Por último, la muestra CA-1 con el pigmento sin ninguna alteración del CaCO_3 bio-renovable, alcanzó un 78% a los 684nm y 700nm. A pesar de que disminuyó la reflectancia del impermeabilizante térmico comercial con la incorporación del CaCO_3 bio-renovable sin modificar, solamente fue de un 8% en el espectro VIS, y la diferencia en el NIR solo un 2%. Por otro lado, el recubrimiento con CaO presentó valores superiores a ambos recubrimientos comerciales entre un 2% - 11% en todo el espectro.

En cuanto a las muestras a base del dopaje del CaCO_3 bio-renovable, las 4 presentaron la misma tendencia, disminuyendo únicamente el porcentaje de reflectancia entre un 6% - 8% conforme aumentaba la proporción del Fe_2O_3 en cada pigmento. La reflectancia máxima de las 4 muestras fue obtenida en la porción del espectro NIR analizada. El valor más alto de reflectancia en los recubrimientos fue de 66.3% a los 750nm, mientras que el valor más bajo que fue de 43.3% a los 704nm. El recubrimiento que presentó la reflectancia más alta, quedó por debajo de impermeabilizante térmico comercial en la porción VIS en un 12% y en un 19% menos que el recubrimiento frío comercial. Sin embargo, la incorporación del Fe_2O_3 , permitió obtener distintas tonalidades de color rojo, permitiendo mejorar su desempeño estético, evitando así el deslumbramiento con su aplicación en superficies muy inclinadas o visibles en edificaciones.

Con base en lo anterior descrito, se concluye que el desarrollo y la aplicación de recubrimientos fríos a partir de la síntesis de pigmentos inorgánicos a base de CaCO_3 bio-renovable, obtenido del desecho de los exoesqueletos del ostión (*crassostrea gigas*), permite la disminución de las cargas térmicas incidentes en cubiertas con techos de lámina, siendo una de las características principales de la vivienda vulnerable en México, debido a su alta reflectancia solar en los espectros VIS/NIR. Asimismo, el rendimiento en peso del material es duplicado debido a la incorporación 1:1 del subproducto obtenido del sector terciario local, promoviendo así, la sustentabilidad en el desarrollo de materiales fríos, para su empleo como una estrategia de mitigación factible de la ICU.

Finalmente, tomando en cuenta los resultados obtenidos y las limitaciones presentadas en la investigación, se proponen las siguientes rutas a tomar en consideración para futuras investigaciones:

- A pesar de que el proceso de calcinación del carbonato de calcio para la transformación a óxido de calcio fue solamente por 2 horas a 900°C , es recomendable implementar una alternativa para el incremento de la reflectancia VIS/NIR y así evitar el uso de hornos de sinterización que pueden llegar a presentar un consumo energético elevado.
- Debido a las limitantes del rango de medición de la esfera de integración del espectrofotómetro, solo fue posible medir la reflectancia hasta los 800nm, por lo que es

importante analizar hasta los 2,500nm para determinar el comportamiento final de los recubrimientos en el resto del espectro del infrarrojo cercano.

- Aunque las pruebas para la medición de la reflectancia solar demostraron resultados prometedores, es necesario realizar pruebas de envejecimiento o de degradación a los materiales con la exposición a la intemperie en su aplicación urbana, y así poder determinar la durabilidad real.
- Se recomienda reportar la disminución en la temperatura superficial urbana con la implementación de los recubrimientos fríos, para así evaluar el impacto energético generado en las edificaciones con su aplicación y poder correlacionarlo con el potencial de estos materiales como estrategia de mitigación de la ICU.

REFERENCIAS

- Aghamohammadi, N., & Santamouris, M. (2022). *Urban Overheating : Heat Mitigation and the Impact on Health Advances in Sustainability Science*.
- Aguilera, M. R. (2010). *ESTUDIO DE LA DEPENDENCIA DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DE LUZ CON LA LONGITUD DE ONDA*.
- Akbari, H., Davis, S., Dorsano, S., Huang, J., & Winnett, S. (1992). *A Guidebook On Tree Planting And Light - Colored Surfacing*. 264.
- Akbari, Hashem, Berdahl, P., Levinson, R., Wiel, S., Miller, B., Desjarlais, A., & Jenkins, N. (2006). *Cool Color Roofing Materials*. February, 1–73.
- Akbari, Hashem, Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A. L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnefa, A., Wong, N. H., & Zinzi, M. (2016). Local climate change and urban heat island mitigation techniques - The state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(1), 1–16. <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1111934>
- Akbari, Hashem, & 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>
- Alain, E., Kaloyeros, Andres, Knorr, & Jonathan, F. (2000). *Methodology for in-situ doping of aluminum coatings*.
- Albarrán Franco, A. P. (2019). *Sistema de Bloque de Tierra Compactado frente a la normatividad mexicana*.
- Aparicio, M., & Carvajal, G. (2010). Utilidad de la difracción de los rayos x en la nanociencia. *Mundo Nano, Volumen 3* (Centro de Nanociencias y Nanotecnología), 62–72. <https://scielo.org.mx/pdf/mn/v3n2/2448-5691-mn-3-02-62.pdf>
- Arunraj, E., Hemalatha, G., & Noroozinejad Farsangi, E. (2021). A novel lightweight phase-changing cooling roof tile. *International Journal of Engineering Transactions C: Aspects*, 34(6), 1398–1406. <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.06c.02>
- Ascione, F., Bianco, N., Mauro, G. M., & Napolitano, D. F. (2019). Retrofit of villas on Mediterranean coastlines: Pareto optimization with a view to energy-efficiency and cost-effectiveness. *Applied Energy*, 254(August).

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113705>

- Ascione, F., De Masi, R. F., Santamouris, M., Ruggiero, S., & Vanoli, G. P. (2018). Experimental and numerical evaluations on the energy penalty of reflective roofs during the heating season for Mediterranean climate. *Energy*, *144*, 178–199. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.018>
- Atiganyanun, S., Hasuchon, C., Prithan, K., Wongwan, K., & Kumnorkaew, P. (2023). Inclusion of microencapsulated phase change materials in waterborne paints to enhance radiative cooling performance. *Materials Today: Proceedings*, *xxxx*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.337>
- Avnir, D., Ottolenghi, M., Braun, S., Rivka, & Zusman. (1991). *Doped sol-gel glasses for obtaining chemical interactions*.
- 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>
- Berry, I. (2009). *Method of doping semiconductors*.
- Boles, M. A. (2005). Termodinámica Séptima edición. *Monografía De Enseñanza De La Ingeniería Térmica Y De Fluídos*.
- Cao, L., Ren, S., Zhou, Z. H., Fei, X., & Huang, C. (2023). Preparation of cool composite pigment by the layer-by-layer assembling of phthalocyanine green on the surface of rutile TiO₂. *Pigment and Resin Technology*, *May*. <https://doi.org/10.1108/PRT-03-2023-0027>
- Carballo-Reyes, L., Araceli Corro-Vázquez, M., Hernández-Martínez, I., López-Hernández, V., & Melchor-Hernández, V. (2022). Análisis colorimétricos de galletas utilizando el Sistema Internacional CIELAB. *Revista Multidisciplinaria de Ciencia, Innovación y Desarrollo*, *2*(1), 27–31. <http://remcid.utgz.edu.mx>
- 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>

- Castellani, B., Gambelli, A. M., Nicolini, A., & Rossi, F. (2020). Optic-energy and visual comfort analysis of retro-reflective building plasters. *Building and Environment*, 174(October 2019), 106781. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106781>
- Catalanotti, S., Cuomo, V., Piro, G., Ruggi, D., Silvestrini, V., & Troise, G. (1975). The radiative cooling of selective surfaces. *Solar Energy*, 17(2), 83–89. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(75\)90062-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(75)90062-6)
- CENAPRED. (2006). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos*.
- Chen, J., Xiao, Y., Huang, B., & Sun, X. (2018). Sustainable cool pigments based on iron and tungsten co-doped lanthanum cerium oxide with high NIR reflectance for energy saving. *Dyes and Pigments*, 154(February), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.02.032>
- Chen, S., Cai, M., & Ma, X. (2016). Environmental-friendly yellow pigments based on Zr doped Y4MoO9. *Journal of Alloys and Compounds*, 689, 36–40. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.07.174>
- Cheng, H., Wang, F., Liu, H., Ou, J., Li, W., & Xue, R. (2022). Fabrication and Properties of Thermo-chromic Superhydrophobic Coatings. *Advanced Engineering Materials*, 24(1), 1–13. <https://doi.org/10.1002/adem.202100647>
- Chiatti, C., Fabiani, C., Bondi, R., Zampini, G., Latterini, L., & Pisello, A. L. (2023). Controlled combination of phosphorescent and fluorescent materials to exploit energy-saving potential in the built environment. *Energy*, 275(October 2022), 127333. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127333>
- Chiatti, C., Kousis, I., Fabiani, C., & Pisello, A. L. (2022). Effect of optimized photoluminescence on luminous and passive cooling potential: A new combined experimental and numerical approach applied to yellow-emitting glass tiles. *Renewable Energy*, 196, 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.027>
- Climate Data. (n.d.). *Clima*. <https://es.climate-data.org/>
- Climate Watch. (2024). *Historical Emissions*. <https://www.climatewatchdata.org/data-explorer/historical-emissions?historical-emissions-data-sources=climate-watch&historical-emissions-gases=all-ghg&historical-emissions->

regions=WORLD&historical-emissions-
sectors=%2Cenergy&page=1&sort_col=2020&sort_dir=

COCEF. (2010). *Emisiones de gases de efecto invernadero en Baja California y proyecciones de casos de referencia 1990-2025*. <https://www.nadb.org/es/conocimientos-y-recursos/publicaciones-y-estudios/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-en-baja-california-y-proyecciones-de-casos-de-referencia-1990-2025-2010>

Comisión Nacional del Agua. (2022). *No Title*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/>

CONAHCYT. (2022). *Programas Nacionales Estratégicos*. <https://conahcyt.mx/pronaces/pronaces-energia-y-cambio-climatico/>

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONVAL). (2010). *Medición de la pobreza*. <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Medición/Calidad-y-espacios-en-la-vivienda.aspx>

Cool Roof Rating Council. (2024). *Urban Heat Island Mitigation*. <https://coolroofs.org/resources/urban-heat-island-mitigation>

COPLADEM. (2022). *Plan Municipal de Desarrollo 2021-2024*.

Cortéz, P. (2020). *Análisis de los espectros de infrarrojo*. 66–82.

Dantas, S. R. A., Vittorino, F., & Loh, K. (2022). Comparison of reflectance to solar radiation between mortars treated with TiO₂ and painted mortars after three years of exposure. *Journal of Building Engineering*, 46(September 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103829>

De Masi, R. F., Ruggiero, S., & Vanoli, G. P. (2018). Acrylic white paint of industrial sector for cool roofing application: Experimental investigation of summer behavior and aging problem under Mediterranean climate. *Solar Energy*, 169(February), 468–487. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.021>

de Oliveira, J., Horsth, D., Balaba, N., Umek, P., Anaissi, F., & Bittencourt, C. (2023). Synthesis of Blue Gahnite (ZnAl₂O₄:Co, Nd): A Cost-Effective Method for Producing Solar-Reflective Pigments for Cool Coatings. *Materials*.

- de Prada Pérez de Azpeitia, F. I. (2016). La termografía infrarroja: un sorprendente recurso para la enseñanza de la física y la química. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias.*, 1(3), 617–627.
https://doi.org/10.25267/rev_eureka_ensen_divulg_cienc.2016.v13.i3.08
- Demuzere, M., Kittner, J., & Bechtel, B. (2021). LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. *Frontiers in Environmental Science*, 9(April).
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.637455>
- Dias, C., Veloso, R. C., & Ventura, J. (2023). Reflectance and Color Tuning in TiO₂-CuO Nanoparticle Composition Mixing. *Buildings*, 13(10), 1–7.
<https://doi.org/10.3390/buildings13102437>
- Diatezua, D. M., Thiry, P. A., Dereux, A., & Caudano, R. (1996). Silicon oxynitride multilayers as spectrally selective material for passive radiative cooling applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 40(3), 253–259. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(95\)00092-5](https://doi.org/10.1016/0927-0248(95)00092-5)
- Dippong, T., Levei, E. A., & Cadar, O. (2021). Recent Advances in Synthesis and Applications of MFe₂O₄ (M = Co, Cu, Mn, Ni, Zn) Nanoparticles. *Nanomaterials*, 4, 1–12.
- Djobo, Y. J. N., Elimbi, A., Dika Manga, J., & Djon Li Ndjock, I. B. (2016). Partial replacement of volcanic ash by bauxite and calcined oyster shell in the synthesis of volcanic ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 113, 673–681.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.104>
- 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>
- Duarte, D., Nuñez, A., Salmatón, L., & Pazos, A. (2022). *Radiación de cuerpo negro*.
- ECLAC—United Nations. (20210). *Regional urban statistics: Urban and cities platform. Urban and cities platform of Latin America and the Caribbean [Online]*.
<https://plataformaurbana.cepal.org/en/regional-urban-statistics>
- Educaplus. (2024). *Reflexión de la luz*. <https://www.educaplus.org/luz/index.html>

- EIA. (2021). *What is energy?* <https://www.eia.gov/energyexplained/what-is-energy/>
- El-Awadly, R. A., & Abdel-Rehim, A. A. (2021). Performance and economical analysis of different insulating materials used to reduce the heat load of an existing residential building. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, *17*, 154–166. <https://doi.org/10.37394/232015.2021.17.16>
- Elakkiya, V., & Sumathi, S. (2022). Vanadium and bismuth doped FePO₄ as Near Infra Red (NIR) reflective pigment for energy saving application. *Materials Chemistry and Physics*, *290*(March), 126561. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126561>
- Elakkiya, Vasudevan, & Sumathi, S. (2022). Bismuth and Vanadium-Substituted Yttrium Phosphates for Cool Coating Applications. *ACS Omega*, *7*(48), 44266–44277. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05748>
- Everlight Chemical Industrial Corp. (2024). *Cómo proteger Polimeros de la degradacion por Rayos UV*. <https://es.everlight-uva.com/productos-eversorb/absorbedores-de-uv/degradación-polímero/>
- Eziefula, U., Ezeh, J., & Eziefula, B. (2018). Properties of seashell aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*, *192*, 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.096>
- Fabiani, C., Gambucci, M., Chiatti, C., Zampini, G., Latterini, L., & Pisello, A. L. (2022). Towards field implementation of photoluminescence in the built environment for passive cooling and lighting energy efficiency. *Applied Energy*, *324*(June), 119687. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119687>
- Fan, W., Gao, Q., Xiang, J., Yan, J., Chen, Y., & Fan, H. (2023). Synergistic effect of silica aerogel and titanium dioxide in porous polyurethane composite coating with enhanced passive radiative cooling performance. *Progress in Organic Coatings*, *183*(June), 107763. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107763>
- Fedel, M., Rosati, A., Bertasini, M., & Rossi, S. (2023). Cu doped YInO₃-ZnO green colored NIR reflective pigments: Synthesis and application in PMMA based cool-roof coatings. *Progress in Organic Coatings*, *182*(May), 107708. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107708>

- Federal Government of Mexico. (2013). *National Climate Change Strategy, 10-20-40 Vision*.
http://mitigationpartnership.net/sites/default/files/encc_englishversion.pdf
- Feng, J., Gao, K., Jiang, Y., Ulpiani, G., Krajcic, D., Paolini, R., Ranzi, G., & Santamouris, M. (2022). Optimization of random silica-polymethylpentene (TPX) radiative coolers towards substantial cooling capacity. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 234(September 2021), 111419. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111419>
- Fiscalab. (2023). *Dispersión de la Luz*. <https://www.fiscalab.com/apartado/dispersion-luz#vertambien>
- Fontal, B. (2005). El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones. *Química-Ciencias-ULA*, August, 1–151.
- Gao, D., Sun, Y., Zhou, C., Bu, Y., Bao, Y., & Chai, J. (2020). Numerical and experimental study on a double-layered coating design using supplemental property particles for achieving user-desired thermal and aesthetic performance. *Energy*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118683>
- 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(February), 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.02.033>
- Garcia, R., Camargo, A., & Casillas, Á. (2013). *Las ciudades , el cambio climático y un estudio de caso en Mexicali , B . C . , México* (Issue November 2020).
- Garshasbi, S., Huang, S., Valenta, J., & Santamouris, M. (2020). 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>
- Gentle, A. R., & Smith, G. B. (2010). Radiative heat pumping from the Earth using surface

- phonon resonant nanoparticles. *Nano Letters*, 10(2), 373–379.
<https://doi.org/10.1021/nl903271d>
- Gholami, Z., Jalilisadrabad, S., & Amrollahi, R. (2023). Investigating the impact of using modified cool materials by titanium dioxide (TiO₂)-based photocatalytic self-cleaning nanoparticles in urban facades on urban microclimate parameters. *Case Studies in Construction Materials*, 19(May), e02268. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02268>
- GNEESTEEL. (2021). *Composición química de acero galvanizado en caliente*. <https://www.galvanized-coil.com/info/hot-dip-galvanised-steel-chemical-composition-54470828.html>
- Gonchar, A. (2023). *Development of a Technology to Produce Titanium Powder with a Low Carbon* DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY TO PRODUCE TITANIUM POWDER WITH. April. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276746>
- 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>
- Gonzalez, L. R., Asesor, S., & Pérez, J. F. (2007). *Conocimientos Sobre El Daño Ocular Causado Por Radiacion Ultravioleta En La Poblacion Estudiantil Del Colegio Departamental De Cucaita - Boyaca*. <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/8572/50012000.pdf?sequence=1>
- Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McGuinness, L., McDonald, S., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P., Moher, D., Glanville, J., Chou, R., Brennan, S. E., Boutron, I., Akl, E., ... Tetzlaff, J. M. (2021). Prácticas PRISMA 2020. *Medicina Fluminensis*, 57(4), 444–465. https://doi.org/10.21860/medflum2021_264903
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2022). Cambio climático: una amenaza para el bienestar de la humanidad y la salud del planeta. *Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático*, 1–5. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2022/02/PR_WGII_AR6_spanish.pdf

- Guerrero Dib, X., Guerrero Salazar, C., Hinojosa Rivera, M., & Garza, R. (2000). Análisis de superficie de alambón de cobre con microscopía de fuerza atómica. *Ingenierías*, 3(6), 3–7.
- Guo, H., Yang, C.-Y., Zhang, X., Motta, A., Feng, K., Xia, Y., Shi, Y., Wu, Z., Yang, K., Jianhua, C., Qiaogan, L., Yumin, T., Sun, H., Woo, Y., Fabiano, S., & Facchetti, A. (2021). Transition metal-catalysed molecular n-doping of organic semiconductors. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/S41586-021-03942-0>
- Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., Xamán, J., Zavala-Guillén, I., Arce, J., & Simá, E. (2014). Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components - A review. *Energy and Buildings*, 80, 81–105. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.008>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, L. (2014). *Metodología de la investigación*. <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- Hervás, E. (2017). *Ámbito Científico tecnológico La energía*. 1–2.
- Hirsch, J. J. (2009). *Building Energy Use and Cost Analysis Program*. 4(March).
- Holman, J. P. (1999). Transferencia de calor por Radiación. In *Transferencia de calor*. <https://fenomenosdetransporte.files.wordpress.com/2008/10/transferencia-de-calor-holman.pdf>
- Hossain, S. K. S., & Roy, P. K. (2019). Fabrication of sustainable ceramic board using solid-wastes for construction purpose. *Construction and Building Materials*, 222, 26–40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.126>
- Hosseini, S., & Ghasemi, E. (2020). Synthesis and characterization of hybrid MgAl-LDH@SiO₂@CoAl₂O₄ pigment with high NIR reflectance for sustainable energy saving applications. *Applied Clay Science*, 193(December 2019), 105674. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105674>
- Huang, X., Liu, D., Li, N., Wang, J., Zhang, Z., & Zhong, M. (2020). Single novel Ca_{0.5}Mg_{10.5}(HPO₃)₈(OH)₃F₃ coating for efficient passive cooling in the natural environment. *Solar Energy*, 202(December 2019), 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.103>

- Ianoş, R., Rus, I., Lazău, R., & Păcurariu, C. (2022). Near-infrared reflective Ni, La-doped hibonite pigments for cool blue coatings. *Ceramics International*, 48(23), 34428–34436. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.08.021>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). *Sistema para la Consulta de Información Censal*. <https://gaia.inegi.org.mx/scince2020/>
- International Energy Agency. (2020). *Meeting the increasing global demand for cooling*. <https://www.iea.org/articles/meeting-the-increasing-global-demand-for-cooling>
- IPPC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report | UNEP - UN Environment Programme*. <https://www.unep.org/resources/report/climate-change-2023-synthesis-report>
- Ji, Y., Sun, Y., Javed, M., Xiao, Y., Li, X., Jin, K., Cai, Z., & Xu, B. (2022). Skin inspired thermoresponsive polymer for constructing self-cooling system. *Energy Conversion and Management*, 254(August 2021). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115251>
- Kolås, T., Røyset, A., Grandcolas, M., Cate, M. ten, & Lacau, A. (2019). Cool coatings with high near infrared transmittance for coil coated aluminium. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 196(December 2018), 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.03.021>
- Konica Minolta Sensing Americas, I. (2023). *Entendiendo El Espacio de Color CIE L*A*B**. <https://sensing.konicaminolta.us/mx/blog/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>
- 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. *The Urban Climate*, 53–82.
- Lee, H. J., Jung, K. Y., & Kim, Y. S. (2021). Nanostructured Fe₂O₃/TiO₂ composite particles with enhanced NIR reflectance for application to LiDAR detectable cool pigments. *RSC Advances*, 11(28), 16834–16840. <https://doi.org/10.1039/d1ra02614c>
- León, N. (2024). *Qué es la Difracción y Cómo Afecta a la Nitidez de tus Fotos*. <https://www.dzoom.org.es/difraccion-y-nitidez/>

- Lertwattanaruk, P., Makul, N., & Siripattaraprat, C. (2012). Utilization of ground waste seashells in cement mortars for masonry and plastering. *Journal of Environmental Management*, *111*, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.06.032>
- Levinson, R., Akbari, H., & Berdahl, P. (2010). Measuring solar reflectance-Part I: Defining a metric that accurately predicts solar heat gain. *Solar Energy*, *84*(9), 1717–1744. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.04.018>
- Levinson, R., Berdahl, P., & Akbari, H. (2005). Solar spectral optical properties of pigments - Part I: Model for deriving scattering and absorption coefficients from transmittance and reflectance measurements. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *107*, 337. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.07.007>
- Levy, B. S., & Patz, J. A. (2015). Climate change, human rights, and social justice. *Annals of Global Health*, *81*(3), 310–322. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2015.08.008>
- 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 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>
- Lira, A. (2018). Transferencias de calor (cualidades térmicas de los materiales). *Unidades de Apoyo Para El Aprendizaje. CUAED-UNAM/Facultad de Arquitectura*. https://uapa.cuaieed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/f0a34d71-c662-42f1-9913-7c189025e480/Transferencia_de_calor/index.html
- Lux, B., & Cifuentes, J. I. (2015). *Energía y conceptos aplicados. Maestría en Energía y Ambiente*. 7.
- Maldonado, A. (2017). *Aproximación para el desarrollo de un sistema de consumo sustentable de productos pesqueros en el sector gastronómico de Ensenada, B.C.* 111.
- Manrique Cortés, C., & Gutierrez, N. (2018). Evaluación del proceso de clasificación de café (Coffee arabica L.) por el método de la espectroscopia infrarroja FTIR Evaluation of the coffee classification process (Coffee arabica L.) by the FTIR infrared spectroscopy method. *Rev. Ingeniería y Región.*, *20*.
- Martínez, N. (2021). *Evolucion de las islas de calor urbanas en el periodo 2002 - 2020 y su*

- relacion con las zonas climaticas locales de las comunas de Concepcion, Talcahuano y Hualpen, region del Biobio, Chile.* 103.
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/180787/evolucion-de-las-islas-de-calor-urbanas.pdf?sequence=1>
- Mayta, J. M., Tamayo, A., Pérez, B., Rubio, F., & Rubio, J. (2023). White scheelite-zircon glass ceramic enamels: Clues for their optimization as cool surfaces. *Journal of the European Ceramic Society*, 43(January), 5014–5025.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.04.006>
- Mengist, W., Soromessa, T., & Legese, G. (2020). Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. *MethodsX*, 7.
<https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.100777>
- Mo, K., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Lee, S. C., Goh, W. I., & Yuen, C. W. (2018). Recycling of seashell waste in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 162, 751–764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.009>
- Mondragon, P. (2015). Los principios de la espectroscopia de infrarrojo. *Principios y Aplicaciones de La Espectroscopia de Infrarrojo En El Análisis de Alimentos y Bebidas*, e, 25–40.
- Morales-Inzunza, S., González-Trevizo, M. E., Martínez-Torres, K. E., Luna-León, A., Tamayo-Pérez, U. J., Fernández-Melchor, F., & Santamouris, M. (2023). On the potential of cool materials in the urban heat island context: Scalability challenges and technological setbacks towards building decarbonization. *Energy and Buildings*, 296(March).
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113330>
- Morales, S. (2023). *Estrategias adaptativas ante la isla de calor urbano: diseño y caracterización de un recubrimiento termocrómico multicapa de reflectancia solar dinámica.*
- Moreno, M. (2009). *La luz. siglo XV*, 1–5.
<https://www.uv.mx/personal/lenunez/files/2013/06/luz.pdf>
- 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(August 2017), 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.007>
- Mu, J. B. (n.d.). *Propagación de ondas electromagnéticas*.
- Muñoz, E., Creus, M., Sanjuan, F., Rabal, H., & Sagastume, J. G. (2012). *COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA LEY DE STEFAN- BOLTZMANN EN LA CÁTEDRA DE FÍSICA III DE INGENIERÍA DE LA UNLP*. 24, 29–35.
- Muthu Lakshmi, S., Geetha, S., Selvakumar, M., Mahalakshmi, S., & Pavithra, A. (2022). Effective usage of seashell waste to improve the strength characteristics of silty sand. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.647>
- Nejat, P., Jomehzadeh, F., Taheri, M. M., Gohari, M., & Muhd, M. Z. (2015). A global review of energy consumption, CO2 emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO2 emitting countries). In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 43, pp. 843–862). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.066>
- Nutakki, T. U. K., & Kazim, W. U. (2022). Effects of Natural Weathering on the Performance of High Solar Reflective Index Paint Surfaces Exposed in Harsh Climatic Conditions of United Arab Emirates. *Buildings*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/buildings12071002>
- 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 Hábitat. (2022). Envisaging the Future of Cities. In *World City Report 2022*.
- Padilla, L. S., & Muñoz, A. de S. (2012). Cambios en los patrones espaciales de crecimiento en una ciudad media: Ensenada en la Península de Baja California, México. *Natural Environment*, SV(SI), 1–15.
- Pedroso, M., Flores-Colen, I., Silvestre, J. D., Gomes, M. G., Silva, L., & Ilharco, L. (2020). Physical, mechanical, and microstructural characterisation of an innovative thermal insulating render incorporating silica aerogel. *Energy and Buildings*, 211, 109793. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109793>
- Peña, D., & Villamil, M. (2016). DIFRACCIÓN DE LA LUZ LÁSER POR DOS RENDIJAS. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(1), 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>
- Pfaff, G. (2022). The world of inorganic pigments. *ChemTexts*, 8(3), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s40828-022-00166-1>
- Piqué, T., & Vazquez, A. (2012). USO DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) EN EL ESTUDIO DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO. *SciELO Analytics*, 3(2), 62–71.
- Primo, J. de O., Borth, K. W., Peron, D. C., Teixeira, V. de C., Galante, D., Bittencourt, C., & Anaissi, F. J. (2019). Synthesis of green cool pigments (CoxZn1-xO) for application in NIR radiation reflectance. *Journal of Alloys and Compounds*, 780, 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.358>
- Procuraduría Federal del Consumidor. (2023). *Profeco alerta de impermeabilizantes que no ofrecen garantía o la condicionan*. <https://www.gob.mx/profeco/prensa/profeco-alerta-de-impermeabilizantes-que-no-ofrecen-garantia-o-la-condicionan?idiom=es>
- 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(May), 111761. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111761>
- Rawat, M., Singh, D., & Buddhi, D. (2022). Thermal performance of cool roofs incorporated with phase change materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, 69, 392–400. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.066>
- Riojas-Rodriguez, H., Hurtado-Díaz, M., Idrovo-Velandia, J., & Vázquez-Gramiex, H. (2006). *ESTUDIO DIAGNÓSTICO SOBRE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMATICO EN LA SALUD HUMANA DE LA POBLACION EN MEXICO Informe Final Horacio Riojas Rodríguez. May.*
- Riyas, A. H., Geethanjali, C. V., Johnson, L., Elias, L., Henaish, A. M. A., Hossain, A., & Shibli, S. M. A. (2023). +Development of a modified route for the preparation of BiVO4/ZrO2 composite with tuned heterojunction in it for efficient near-infrared solar reflectance. *Materials Chemistry and Physics*, 309(August), 128397. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128397>

- Roberts, D., Pidcock, R., Chen, Y., Connors, S., & Tignor, M. (2018). An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, *A Companion to Applied Ethics*, 674–684. <https://doi.org/10.1002/9780470996621.ch50>
- Rong, X., Jiao, L., Kong, X., & Yuan, G. (2020). Research on low-brightness and high-reflective coatings suitable for buildings in tropical areas. *Coatings*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/coatings10090829>
- Rosa, R., Paradisi, E., Gualtieri, L., Mugoni, C., Cappucci, G. M., Ruini, C., Neri, P., & Maria, A. (2023). *Life Cycle Impact Assessment of Solution Combustion Synthesis of Titanium Dioxide Nanoparticles and Its Comparison with More Conventional Strategies*. <https://doi.org/10.1002/cssc.202202196>
- 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(April), 106464. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106464>
- Rosati, A., Fedel, M., & Rossi, S. (2021b). 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. (2021c). NIR reflective pigments for cool roof applications: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 313(April), 127826. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127826>
- Rossi, F., Pisello, A. L., Nicolini, A., Filippini, M., & Palombo, M. (2014). Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: A new analytical model. *Applied Energy*, 114, 621–631. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.038>
- 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>
- Rossi, S., Lindmark, H., & Fedel, M. (2020). Colored paints containing nir-reflective pigments exposed to accelerated ultraviolet radiation aging with possible application as roof

- coatings. *Coatings*, 10(11), 1–18. <https://doi.org/10.3390/coatings10111135>
- Roux, R. (2010). Los Bloques de Tierra Comprimida (BTC) en zonas húmedas. In *Universidad Autónoma de Tamaulipas* (Vol. 1, Issue). <http://riuat.uat.edu.mx/bitstream/123456789/1522/1/1522.pdf>
- Sakata, P., Rueangsawang, W., & Ponghiransmith, C Pornmanat, C Phuphathanaphong, N Kanjanaboos, P. (2023). Effective radiative cooling film enabled by droplet-like infrared hot spots via low-cost and scalable spray coating process for tropical regions. *Brain*, 2(i), 617–638. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2011.12.005>
- Salgado, L., & Vargas, C. (2014). Optical absorbance measurement of aqueous solutions using virtual instrumentation and control. *Scientia et Technica Año XIX*, 19(1), 49–53.
- Sameera, S., Vidyadharan, V., Sasidharan, S., & Gopchandran, K. G. (2019). Nanostructured zinc aluminates: A promising material for cool roof coating. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 4(4), 524–530. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2019.10.003>
- Santamouris, M. (2014). On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy and Buildings*, 82, 100–113. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.022>
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., & Assimakopoulos, D. N. (2001). On the impact of urban climate on the energy consumption of building. *Solar Energy*, 70(3), 201–216. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00095-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00095-5)
- Santamouris, M., & Yun, G. Y. (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>
- Santamouris, Mat. (2016). Cooling the buildings – past, present and future. *Energy and Buildings*, 128, 617–638. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>
- Santamouris, Mat, & Kolokotsa, D. (2016). *Urban Climate Mitigation Techniques*. Routledge.
- Schraufnagel, D. E., Balmes, J. R., Cowl, C. T., De Matteis, S., Jung, S. H., Mortimer, K., Perez-Padilla, R., Rice, M. B., Riojas-Rodriguez, H., Sood, A., Thurston, G. D., To, T., Vanker,

- A., & Wuebbles, D. J. (2019). Air Pollution and Noncommunicable Diseases: A Review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee, Part 1: The Damaging Effects of Air Pollution. *Chest*, 155(2), 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2018.10.042>
- Secretaría De Medio Ambiente Y Recursos Naturales Mexico. (2015). Intended Nationally Determined Contribution (INDC) México. *Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional de México*, No. 54113, 1–8. [http://www4.unfccc.int/ndcregistry/PublishedDocuments/Mexico First/MEXICO INDC 03.30.2015.pdf](http://www4.unfccc.int/ndcregistry/PublishedDocuments/Mexico%20First/MEXICO%20INDC%2003.30.2015.pdf)http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/mexico_indc_espanolv2.pdf
- Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno de Baja California. (2012). *Programa de Acción ante el Cambio Climático de Baja California (PEACC BC)*. 234. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001769.pdf>
- SEPESCA. (2015). *Programa estatal de pesca y acuicultura: estado de Baja California período 2015-2019*. 47.
- Sha, A., Zhang, J., Jia, M., Jiang, W., & Jiao, W. (2022). Development of polyurethane-based solid-solid phase change materials for cooling asphalt pavements. *Energy and Buildings*, 259, 111873. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111873>
- Sheethu, J., Deepak, J., Soumya, N., & Pradeepan, P. (2019). Recent advances in infrared reflective inorganic pigments. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 194(January), 7–27. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.01.037>
- Significados, E. (2024). *Refracción de la luz*. <https://www.significados.com/refraccion-de-la-luz/>
- Singh, A. K., Rathore, P. K. S., Sharma, R. K., Gupta, N. K., & Kumar, R. (2023). Experimental evaluation of composite concrete incorporated with thermal energy storage material for improved thermal behavior of buildings. *Energy*, 263(PA), 125701. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125701>
- Son, S., Chae, D., Lim, H., Ha, J., Park, J., Ju, S., Park, J., Kim, W., & Lee, H. (2023). Temperature-Sensitive Colored Radiative Cooling Materials with Efficient Cooling

- Performance. *Advanced Engineering Materials*, 25(6), 1–7.
<https://doi.org/10.1002/adem.202201254>
- Sreeram, K. J., Srinivasan, R., Meena Devi, J., Unni Nair, B., & Ramasami, T. (2007). Cerium molybdenum oxides for environmentally benign pigments. *Dyes and Pigments*, 75(3), 687–692. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.07.021>
- Sun, J., Wang, J., Guo, T., Bao, H., & Bai, S. (2022). Daytime passive radiative cooling materials based on disordered media: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 236(August 2021), 111492. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111492>
- Susca, T., & Pomponi, F. (2020). Heat island effects in urban life cycle assessment: Novel insights to include the effects of the urban heat island and UHI-mitigation measures in LCA for effective policy making. *Journal of Industrial Ecology*, 24(2), 410–423. <https://doi.org/10.1111/jiec.12980>
- Tang, W., Xu, W., Zhong, M., & Zhang, Z. (2023). Slightly doped hydroxyapatite pigments of subtractive color with high near-infrared reflectance. *Journal of Solid State Chemistry*, 322(February), 123947. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2023.123947>
- Trezza, M. A., & Scian, A. N. (2013). Aporte de las técnicas ATD/TG y espectroscopía FT-IR al estudio de la carbonatación de la matriz cementicia. *Afinidad*, 70(562), 112–117.
- Tsoka, S., Theodosiou, T., Tsikaloudaki, K., & Flourentzou, F. (2018). Modeling the performance of cool pavements and the effect of their aging on outdoor surface and air temperatures. *Sustainable Cities and Society*, 42(June), 276–288. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.016>
- Ullah, M., Kim, H. J., Heo, J. G., Roh, D. K., & Kim, D. S. (2019). Sodium titanate as an infrared reflective material for cool roof application. *Journal of Ceramic Processing Research*, 20(Special Issue 1), 86–91. <https://doi.org/10.36410/jcpr.2019.20..86>
- United Nations. (2018). World Urbanization Prospects. In *Demographic Research* (Vol. 12). <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>
- Vakilinezhad, R., & Khabir, S. (2023). Evaluation of thermal and energy performance of cool envelopes on low-rise residential buildings in hot climates. *Journal of Building Engineering*, 72(April), 106643. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106643>

- Veloso, R. C., Souza, A., Maia, J., Ramos, N. M. M., & Ventura, J. (2021). Nanomaterials with high solar reflectance as an emerging path towards energy-efficient envelope systems: a review. *Journal of Materials Science*, *56*(36), 19791–19839. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06560-3>
- Wang, Shancheng, Jiang, T., Meng, Y., Yang, R., Tan, G., & Long, Y. (2021). Scalable thermochromic smart windows with passive radiative cooling regulation. *Science*, *374*(6574), 1501–1504. <https://doi.org/10.1126/science.abg0291>
- Wang, Song, Wang, J., Wen, S., Li, H., Xie, C., Li, S., & Mei, D. (2023). Preparation, characterization, and energy simulation of ZnTiO₃ high near-infrared reflection pigment and its anti-graffiti coating. *RSC Advances*, *13*(9), 6065–6074. <https://doi.org/10.1039/d2ra07903h>
- Wei, D., Brugués, A., Rose, A., de la Parra, C. A., García, R., & Martínez, F. (2017). Climate change and the economy in Baja California: Assessment of macroeconomic impacts of the State's Climate Action Plan. *Ecological Economics*, *131*, 373–388. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.08.020>
- Werner, A., Pfeiffer, M., Fritz, T., & Leo, K. (2003). *Doped organic semiconductor material and method for production thereof*.
- Wong, A., Daoud, W. A., Liang, H. H., & Szeto, Y. S. (2015). Application of rutile and anatase onto cotton fabric and their effect on the NIR reflection/surface temperature of the fabric. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *134*, 425–437. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.12.011>
- Wu, C. H., Huang, C. H., Li, Y. F., Lee, W. H., & Cheng, T. W. (2020). Utilization of basic oxygen furnace slag in geopolymeric coating for passive radiative cooling application. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(10). <https://doi.org/10.3390/SU12103967>
- Wu, Z. G., Guo, Y., Wang, J., & Jia, Y. R. (2017). Preparation of vaterite CaCO₃ microspheres by fast precipitation method. *International Journal of Materials Research*, *108*(3), 245–248. <https://doi.org/10.3139/146.111473>
- Xiang, B., & Zhang, J. (2018). Effects of content and surface hydrophobic modification of BaTiO₃ on the cooling properties of ASA (acrylonitrile-styrene-acrylate copolymer).

- Applied Surface Science*, 427, 654–661. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.080>
- Xiao, Y., Feng, L., Huang, B., Chen, J., Xie, W., & Sun, X. (2021). Synthesis and characterization of multi-colored pigments of $\text{LiRE}(\text{MoO}_4+\delta)_2$ (RE = Ce, Pr, Nd, Er) with high near-infrared reflectance. *Ceramics International*, 47(21), 29856–29863. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.158>
- Yang, N., Fu, Y., Xue, X., Lei, D., & Dai, J. G. (2023). Geopolymer-based sub-ambient daytime radiative cooling coating. *EcoMat*, 5(2), 1–10. <https://doi.org/10.1002/eom2.12284>
- Yaringaño, R. (2020). *Estudio mediante microscopia de fuerza atómica conductivo de capas delgadas de GaSb dopado con vanadio*.
- 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>
- Yuan, L., Han, A., Ye, M., Chen, X., Ding, C., & Yao, L. (2018). Preparation, characterization and thermal performance evaluation of coating colored with NIR reflective pigments: BiVO_4 coated mica-titanium oxide. *Solar Energy*, 163(August 2017), 453–460. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.009>
- Zeng, G., Yang, J., Hong, R., Li, Z., Chen, Y., Li, F., Wu, Q., Liu, L., & Jiang, X. (2018). Preparation and thermal reflectivity of nickel antimony titanium yellow rutile coated hollow glass microspheres composite pigment. *Ceramics International*, 44(8), 8788–8794. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.025>
- Zhang, T., Wang, Y., Ke, S., & Pan, Z. (2022). Synthesis of in-situ encapsulated $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}/\text{ZrSiO}_4$ composite as cool pigment on ceramic tiles for energy saving. *Journal of Ceramic Processing Research*, 23(3), 326–334. <https://doi.org/10.36410/jcpr.2022.23.3.326>
- 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(April), 103950. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103950>

- Zhao, B., Hu, M., Ao, X., Chen, N., & Pei, G. (2019). Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects. *Applied Energy*, 236(December 2018), 489–513. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.018>
- Zhao, L., Feng, J., & Wang, Z. (2009). *In situ synthesis and modification of calcium carbonate nanoparticles via a bobbling method*. 10.1007/S11426-009-0125-9
- Zheng, J., Li, Z., Zheng, Y., Zhao, W., Tan, F., Yang, F., Chen, H., & Xue, L. (2023). A novel rare-earth high-entropy RE₆MoO₁₂ with high near-infrared reflectance as a promising inorganic “cool pigment.” *Ceramics International*, 49(1), 558–564. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.023>
- Zheng, N., Lei, J., Wang, S., Li, Z., & Chen, X. (2020). Influence of heat reflective coating on the cooling and pavement performance of large void asphalt pavement. *Coatings*, 10(11), 1–15. <https://doi.org/10.3390/coatings10111065>
- Zhou, N., Sha, S., Zhang, Y., Li, S., Xu, S., & Luan, J. (2020). Coprecipitation synthesis of a green Co-doped wurtzite structure high near-infrared reflective pigments using ammonia as precipitant. *Journal of Alloys and Compounds*, 820, 153183. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153183>
- 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>

APENDICES

Apéndice A: Revisión de la literatura

Referencia	Año	Ubicación	Zona climática	Tipo de pigmento	Tipo de material	Enfoque	Tipo de estudio	Elemento arquitectónico	Compuesto químico	Método de síntesis	Dimensiones de la muestra	Espesor	Propiedades ópticas	Valor de reflectancia	Herramientas	Software
(Yuan et al., 2018)	2018	Lab	N/A	PTP	CC	QT	L, S	R	BiVO ₄	N/A	80•80•2	40 μm	NIR	↓NIR	XRD, FE-SEM, SPEC, IRC	N/A
(De Masi et al., 2018)	2018	Benevento	Csa	N/A	LC	QT	L, F	R	N/A	N/A	6m•6m	1cm	TSR, TE	↑TSR ↓TE	SPEC	N/A
(Gao et al., 2018)	2018	Lab	N/A	PTP	CC	QT	L	W	BiOBr _{1-x} I _x	QLD	N/A	2-4 μm	NIR	↑NIR	XRD, SPEC	N/A
(Chen et al., 2018)	2018	Lab	N/A	REP	CC	QT	L	W	La ₂ Ce _{2-x} W _{0.5x} Fe _{0.5x} O _{7+δ}	N/A	N/A	N/A	NIR	↓NIR	XRD, SPEC	N/A
(Xiang and Zhang., 2018) (Zeng et al., 2018)	2018	Lab	N/A	AEP	LC	QT	L	W	BaTiO ₃	N/A	N/A	1mm	NIR	↓NIR	XRD, SPEC	N/A
	2018	Lab	N/A	TP	CC	QT	L	W	TiNiY	BM	150 to 450 nm	800 nm	NIR	↓NIR	FT-IR, SEM, SPEC	N/A
(Gao et al., 2018)	2018	Lab	N/A	PTP	CC	QT	L	W	BiOCl _{1-x} I _x	QLD	N/A	3-5 μm	NIR	↑NIR	XRD, SPEC SEM	N/A
(Ascione et al., 2018)	2018	Lisbon, Seville, Naples and Athens	Csa, Aw and BSh	N/A	LC	QT	F, S	W	N/A	N/A	9m ²	2 - 20cm	NIR	↑NIR	XRD, SPEC, FT-IR	EP
(Morini et al., 2018)	2018	Lab	N/A	AEP	RR	QT	L	P	BaTiO ₃	N/A	0.1-0.2 mm	N/A	TSR	↑TSR	SPEC	N/A
(Chen et al., 2018) (Primo et al., 2019)	2018	Shijiazhuang	Dwa	TP	CC	QT	F, S	W	FeS ₂ and TiO ₂	N/A	N/A	N/A	TE	↑TE	PYRA	N/A
	2019	Lab	N/A	ZP	CC	QT	L	W	ZnO and Co	G	N/A	N/A	TSR, NIR	↑TSR ↓NIR	XRED, SPEC, SEM, FT-IR	N/A
(Kolás et al., 2019)	2019	Lab	N/A	PTP	CC	QT	L	W	Al	N/A	70•200 •0.6mm	20 μm	TSR, NIR, SRI	↓TSR ↓NIR ↓SRI	SPEC, FT-IR	N/A

Referencia	Año	Ubicación	Zona climática	Tipo de pigmento	Tipo de material	Enfoque	Tipo de estudio	Elemento arquitectónico	Compuesto químico	Método de síntesis	Dimensiones de la muestra	Espesor	Propiedades ópticas	Valor de reflectancia	Herramientas	Software
(Sameera et al., 2019)	2019	Lab	N/A	ZP	LC	QT	L	R	ZnAl ₂ O ₄ and TiO ₂	SG	5 • 4 • 1cm	N/A	TSR, NIR, VIS	↑TSR ↑NIR ↑VIS	XRD, FE-SEM, SPEC, TEM, FT-IR	N/A
(Ullah et al., 2019)	2019	Lab	N/A	TP	CC	QT	L	W	Na ₂ Ti ₃ O ₇	SSR	N/A	N/A	TSR	↑TSR	XRD, FE-SEM, SPEC	N/A
(Xie et al., 2019)	2019	Lab	N/A	IP	CC	QT	L	P	TiO ₂ and FeO ₂	N/A	10•10cm	200 mm	NIR	↓NIR	SPEC	N/A
(Gao et al., 2020)	2020	Lab	N/A	TP	LC	QT	L	W	TiO ₂ and CuO	N/A	100m ²	100 μm	TSR	↓TSR	SPEC, FT-IR	N/A
(Zhou et al., 2020)	2020	Lab	N/A	ZP	CC	QT	L	R	Zn _{1-x} CoxO	CP	10•10	N/A	NIR	↓NIR	XRD, SEM	N/A
(Rong., 2020)	2020	Kuala Lumpur	Af	IP	CC	QT	L, S	W	Nano-TiO ₂ and Fe ₂ O ₃	N/A	N/A	300 μm	TSR, NIR, VIS	↓NIR	IRL	MN
(Huang et al., 2020)	2020	Guangzhou	Cfa	AEP	LC	QT	L, F	W	Ca _{0.5} Mg _{10.5} (HPO ₃) ₈ (OH) ₃ F ₃	H	20•30 cm	160 μm	TSR	↑TSR	XRD, FT-IR, SPEC, SEM	MN
(Wu et al., 2020)	2020	Lab	N/A	TP	TP	QT	L	W	TiO ₂ y CaCO ₃ , Al ₂ O ₇ Si ₂ y Ca ₂ SiO ₄	N/A	20•20 cm	180~250 μm	TSR VIS	↓TSR ↑VIS	FT-IR, SPEC	N/A
(Rossi et al., 2020)	2020	Lab	N/A	IP	CC	QT	L	R	Cr _{1.3} Fe _{0.7} O ₃ , Cr ₂ O ₃ and TiO ₂	N/A	152•75 •0.1mm	30 μm	NIR	↓NIR	XRD, SEM	N/A
(Hosseini and Ghasemi., 2020)	2020	Lab	N/A	SP	CC	QT	L	W	MgAl-LDH@SiO ₂ @CoAl ₂ O ₄	H	N/A	100 μm	NIR	↑NIR	XRD, SEM, TEM, SPEC, MICRO	N/A
(Berardi et al., 2020)	2020	Toronto	Dfb	TP	TC	QT	L, S	W, R	TiO ₂	N/A	5•5cm	10 μm	TSR, VIS	↑TSR ↓VIS	SPEC	EP
(Anshul et al., 2020)	2020	Lab	N/A	LC	SP	QT	L	W	NaOH and KOH	N/A	N/A	700 500 nm	TSR	↑TSR	XRD, SEM	N/A

Referencia	Año	Ubicación	Zona climática	Tipo de pigmento	Tipo de material	Enfoque	Tipo de estudio	Elemento arquitectónico	Compuesto químico	Método de síntesis	Dimensiones de la muestra	Espesor	Propiedades ópticas	Valor de reflectancia	Herramientas	Software
(Carlosena et al., 2020)	2020	San Sebastian, Pamplona, Pto. Real, Sydney	Cfb, Cfa and Bsh	N/A	DRC	QT	L, S	R	SiO ₂	N/A	200• 200mm	1.5 ± 0.6 μm	TSR UV NIR	↓TSR ↑UV ↓NIR	SPEC, PYRA	N/A
(Garshasbi et al., 2020)	2020	N/A	N/A	SP	F	QT	L	W	CdSe/ZnS	N/A	20.4cm ²	20μ m	NIR, VIR	↑NIR ↓VIS	SPEC	N/A
(Rossi et al., 2020)	2020	Miami	Am	IP	CC	QT	L	R	Fe ₂ O ₃	N/A	210 • 130mm	36 μm	NIR TE	↑NIR ↓TE	SEM, FT-IR	N/A
(Li et al., 2020)	2018	West Lafayette	Dfa	AEP	DRC	QT	L, F, S	R	CaCO ₃	U	5cm ²	400 μm	TSR	↑TSR	IRC, SPEC, FT-IR, SEM	N/A
(Perez., 2020)	2018	Lab	N/A	AEP	TC	QT	L	W	CaCO ₃	N/A	1•3• 6cm	45μ m	TE	↓TE	XRD, FT-IR, SEM	N/A
(Castellani et al., 2018)	2018	Perugia	Csa	AEP	RR	QT	S	W,P	BaTiO ₃ and Al	N/A	20.5m ²	N/A	NIR	↓NIR	SPEC	N/A
(Zheng., 2020)	2020	Lab	N/A	TP	CC	QT	L	P	TiO ₂ , SiO ₂ , AlO and FeO	N/A	30•30• 5cm	50 mm	SRI	↓SRI	SPEC	N/A
(Rosati et al., 2021)	2021	Trento	Cfb	ZP	CC	QT	L, F	R	YIn _{0.9} Mn _{0.1} O ₃ - ZnO	SG	90•150 •3mm	100 μm	TSR NIR	↓TSR ↑NIR	SPEC, IRC, IRL	N/A
(Carlosena et al., 2021)	2021	Pamplona	Cfb	SP	DRC	QT	L, F	R	SiO ₂	N/A	200 • 200mm	0.6 μm	TSR	↑TSR	SPEC	N/A
(Arunraj et al., 2021)	2021	Coimbatore	Aw	SP	DRC	QT	L, F	R	Na ₂ SiO ₃	N/A	70.6•70.6 •70.6 mm	N/A	TE	↓TE	TH	N/A
(Zinzi et al., 2021)	2021	Barcelona, Palermo, Cairo	Csa and Bwh	TP	N/A	QT	S	R	N/A	N/A	99.5m ²	6cm	TSR TE	↓TSR ↑TE	N/A	TR, MN
(El-Awadly and Abdel-Rehim et al., 2021)	2021	El-Sorouk	Bwh	SP	PCM	QT	S	W, R	SiO ₂	N/A	42m ²	1mm 60mm	TE UV	↓TE ↓UV	N/A	TR

Referencia	Año	Ubicación	Zona climática	Tipo de pigmento	Tipo de material	Enfoque	Tipo de estudio	Elemento arquitectónico	Compuesto químico	Método de síntesis	Dimensiones de la muestra	Espesor	Propiedades ópticas	Valor de reflectancia	Herramientas	Software
(Lee et al., 2021)	2021	N/A	N/A	IP	CC	QT	L	W	Fe ₂ O ₃ /TiO ₂	P	10•10cm	~100 nm	TSR, NIR	↓TSR ↑NIR	XRD, SEM, SPEC, IRL	N/A
(Xiao et al., 2021)	2021	Lab	N/A	REP	CC	QT	L	W, R	LiRE(MoO ₄ +δ) ₂	SRR	N/A	42.9 μm	NIR	↑NIR	XRD, SPEC, SEM	N/A
(Wang et al., 2021)	2021	Lab	N/A	SP	TC	QT	L	W	VO ₂	N/A	5•5cm	0.08	NIR	↓NIR	IRC	N/A
(Dippong et al., 2021)	2021	Lab	N/A	IP	CC	QT	L	N/A	MFe ₂ O ₄	SG	N/A	27m	TSR	↑TSR	IRL	N/A
(Jin et al., 2021)	2021	Lab	N/A	SP	PCM	QT	F	P	Si-O-H	N/A	150 • 50mm	13mm	TSR NIR	↑TE ↓NIR	IRL	N/A
(Fabiani et al., 2022)	2022	Lab	N/A	AEP	FL	QT	L	W, R	SrAl ₂ O ₄ , Sr ₄ Al ₁₄ O ₂₅ Sr ₂ MgSi ₂ O ₇ , CaAl ₂ O ₄ , CaS Y ₂ O ₂ S, YSr ₂ Al ₇ O ₁₄	N/A	1•1•4.5 cm ³	1nm	SRI VIS	↓SRI ↓VIS	SPEC, IRL	N/A
(Elakkiya and Sumathi, 2022)	2022	Lab	N/A	IP	CC	QT	L	W	FePO ₄ , V, Bi	CP	N/A	200 nm	NIR	↓NIR	SEM, SPEC	N/A
(Dantas et al., 2022)	2022	Sao Paulo	Aw	TP	LC	QT	L, F	W	TiO ₂ , CaMg(CO ₃) ₂	N/A	1.2•1.2m	1cm	TSR	↑TSR	XRD	N/A
(Nutakki and Kazim, 2022)	2022	Ras Al Khaimah	Bwh	N/A	LC	QT	L, F	W, R	N/A	N/A	N/A	N/A	TSR SRI	↑TSR ↑SRI	SPEC	N/A
(Elakkiya and Sumathi, 2022)	2022	Lab	N/A	PTP	CC	QT	L	W	YPO ₄ , Bi, V	P	N/A	85 nm	TSR	↑TSR	FT-IR, SEM, SPEC	N/A
(Zhang et al., 2022)	2022	Guangzhou	Cfa	ZP	CC	QT	L, S	W	ZnSxSe/ZrSiO ₄	CP	3158.18m ²	50 - 60 μm	TSR, NIR	↓TSR ↑NIR	XRD, FT-IR, SEM, SPEC, IRL, IRC	DS
(Ianos et al., 2022)	2022	Lab	N/A	PTP	CC	QT	L	W	CaAl ₁₂ O ₉	CO	360 - 450 nm	290 μm	TSR	↓TSR	XRD, SEM	N/A

Referencia	Año	Ubicación	Zona climática	Tipo de pigmento	Tipo de material	Enfoque	Tipo de estudio	Elemento arquitectónico	Compuesto químico	Método de síntesis	Dimensiones de la muestra	Espesor	Propiedades ópticas	Valor de reflectancia	Herramientas	Software
(Baldi et al., 2022)	2022	Bologna and Palermo	Cfa and Csa	N/A	LC	QT	S	W	N/A	N/A	11.4 • 29.4m	29cm	TSR	↓TSR	N/A	EP
(Qi et al., 2022)	2022	Lab	N/A	IP	CC	QT	L	W	SiO ₂ , TiO ₂ , Cr ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	N/A	38.485 m ²	25 μm	TSR, NIR, VIS, TE, SIR	↓TSR ↓NIR ↓VIS ↓TE ↓SIR	XRD, SEM, FT-IR, SPEC	N/A
(Chiatti et al., 2022)	2022	Lab	N/A	REP	FL	QT	L	W	SrAl ₂ O ₄ :Eu+2,D+p ₃	N/A	10cm ²	0.5cm	TSR, TE	↓TSR ↑TE	SPEC	N/A
(Feng et al., 2022)	2022	Sydney and Alice springs	Dfb and Bwh	SP	DRC	QT	L, S	R	SiO ₂	N/A	10 • 10cm	50, 100, 200 μm	TE	↓TE	SEM	N/A
(Garshasbi et al., 2022)	2022	Sydney	Dfb	SP	FL	QT	L	R	PbS, QDs, IBOA	N/A	N/A	835nm	TSR, TE, NIR	↓TSR ↑TE ↑NIR	SPEC, SEM	N/A
(Feng et al., 2022)	2022	Sydney, Alice springs and Darwin	Dfb, Bwh and Aw	N/A	SCM	QT	S	W, R	N/A	N/A	228m ²	N/A	TSR	↓TSR	N/A	TR, MN
(Ji et al., 2022)	2022	Shangai	Cfa	AEP	LC	QT	L, F	R	Alginate-Ca ²⁺	N/A	N/A	5.88mm	TSR	↑TSR	SEM, FT-IR, IRL	N/A
(Zhang et al., 2022)	2022	Shangai	Cfa	IP	TC	QT	F, S	P	TiO ₂ , FeO, NiO and Fe ₂ O ₃	N/A	6 • 6cm	150μm	TSR, VIS, TE	↓TSR ↓VIS ↓TE	SEM, SPEC, TH, IRL	N/A
(Cheng et al., 2022)	2022	Changzhou	Cfa	TP	TC	QT	F	W	TiO ₂ , SiO ₂	N/A	10 • 10mm ²	80 - 120 μm	TE, UV	↓TE ↓VIS ↓UV	SPEC, FE-SEM, IRL, TH	N/A
(Sha A., 2022)	2022	Lab	N/A	N/A	PCM	QT	L	P	N/A	N/A	300 • 300mm	2mm	TE	↓TE	FT-IR, XRD	N/A

Referencia	Año	Ubicación	Zona climática	Tipo de pigmento	Tipo de material	Enfoque	Tipo de estudio	Elemento arquitectónico	Compuesto químico	Método de síntesis	Dimensiones de la muestra	Espesor	Propiedades ópticas	Valor de reflectancia	Herramientas	Software
(Dong et al., 2022)	2022	Lab	N/A	AEP	DRC	QT	L	R	BaSO ₄ , CaCO ₃ , SiO ₂	N/A	N/A	1.25 μm	TSR VIS NIR	↑TSR ↑VIS ↑NIR	SPEC, FT-IR	N/A
(Wang et al., 2023)	2023	Lab	N/A	ZP	LC	QT	L, S	W, R	ZnTiO ₃	SG	N/A	150 μm	TSR VIR NIR	↓NIR ↑VIS ↑NIR	XRD, SEM, SEPC, IRL	EP
(Tang et al., 2023)	2023	Lab	N/A	AEP	CC	QT	L	W, R	Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH	SSR	N/A	4 μm	NIR	↓NIR	SPEC, XRD, SEM	N/A
(Vakilinezhad and Khabir et al., 2023)	2023	Ahvaz and Shiraz	BWh and BSk	N/A	RR	QT	S	W	N/A	N/A	N/A	N/A	TSR, NIR	↑TSR ↓NIR	N/A	EP
(Bamdad K et al., 2023)	2023	Darwin, Brisbane, Rickmond, Melbourne, Caberra and Hobart	Aw, Cfa and Cfb	N/A	CC	QT	S	R	N/A	N/A	215m ²		TSR	↑TSR	N/A	EP, DS
(Zheng et al., 2023)	2023	Lab	N/A	REP	CC	QT	L	W, R	RE ₆ MoO ₁₂	SSR	N/A	N/A	NIR	↓NIR	SPEC, XRD	N/A
(Yang N., 2023)	2023	Hong Kong	Cfa	AEP	DRC	QT	L	W	BaSO ₄	N/A	300•300•4mm	500 ± 50 μm	TSR	↑TSR	XRD, FT-IR, SEM, SPEC	N/A
(Mayta et al., 2023)	2023	Lab	N/A	AEP	LC	QT	L	W	CaWO ₄ and ZrSiO ₄	N/A	30 • 30 mm ²	300 μm	TSR NIR UV VIS	↑TSR ↑NIR ↑UV ↑VIS	FT-IR, SPEC, SEM	N/A
(Son et al., 2023)	2023	Lab	N/A	PTP	DRC	QT	L	R	Al ₂ O ₃	N/A	N/A	250 μm	TSR	↑TSR	SPEC, FT-IR, FESEM	N/A
(Atiganyanun et al., 2023)	2023	Lab	N/A	AEP	PCM	QT	L	R	BaSO ₄	SG	5cm	150 lm	TSR	↑TSR	SEM, SPEC	N/A

Referencia	Año	Ubicación	Zona climática	Tipo de pigmento	Tipo de material	Enfoque	Tipo de estudio	Elemento arquitectónico	Compuesto químico	Método de síntesis	Dimensiones de la muestra	Espesor	Propiedades ópticas	Valor de reflectancia	Herramientas	Software
(Mourou et al., 2023)	2023	Lab	N/A	AEP	C	QT	L	R	SiO ₂ , Na ₂ O, CaO, MgO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , K ₂ O, TiO ₂ , P ₂ O ₅ , BaO, PbO	N/A	19•13.5•1cm	1mm	NIR VIS	↑NIR ↑VIS	SPEC	N/A
(Fedel et al., 2023)	2023	Lab	N/A	ZP	CC	QT	L	R	YInO ₃ -ZnO	SG	N/A	100 μm	NIR	↑NIR	FT-IR, XRD	N/A
(Fan et al., 2023)	2023	Chengdu	Cfb	TP	RC	QT	L, F		TiO ₂ , SiO ₂ ,	U	25•4•0.5mm	500 μm	TSR TE	↑TSR ↑TE	FT-IR, SEM, SPEC, PYRTA	N/A
(Gholami et al., 2023)	2023	Isfahan	BWh	TP	LC	QT	S, F	W	TiO ₂	N/A	6.25m ²	N/A	NIR UV	↓NIR ↓UV	N/A	EM
(Riyas et al., 2023)	2023	Lab	N/A	PTP	CC	QT	L	R	BiVO ₄ /ZrO ₂	P	340 - 4700cm	210 μm	NIR	↑NIR	XRD, FE-SEM, FT-IR	N/A
(de Oliveira et al., 2023)	2023	Lab	N/A	ZP	CC	QT	L	W	ZnAl ₂ O ₄ :Co, Nd	CP	25•25 mm	20 μm	NIR	↑NIR	XRD, FT-IR, SPEC, SEM	N/A
(Dias et al., 2023)	2023	Lab	N/A	TP	C	QT	L	W	TiO ₂ and CuO	N/A	40 • 40μm ²	30 nm	TSR VIS UV NIR	↓TSR ↓VIS ↓UV ↓NIR	SPEC	N/A
(Hu et al., 2023)	2023	Nanjing	Cfb	TP	FL	QT	F	P, W	TiO ₂	N/A	2 • 2 • 2m	10nm	TSR UV NIR	↓TSR ↓UV ↓NIR	SEM, SPECT	EM
(Chiatti et al., 2023)	2023	Lab	N/A	N/A	FL	QT	L	W	P, F	N/A	N/A	1nm	VIS UV	↓VIS ↓UV	SPEC, IRL,	N/A
(Cao et al., 2023)	2023	Lab	N/A	TP	LC	QT	L	W	TiO ₂	BM	N/A	10nm	NIR	↑NIR	XRD, SPEC	N/A
(Liu and Wang, 2023)	2023	Lab	N/A	AEP	CC	QT	L	P, W	Mg ₃ (PO ₄) ₂	N/A	60•60•160mm	3mm	NIR UV	↓NIR ↓UV	SEM, SPEC	N/A

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); BWh (clima desértico cálido); BSh (clima semiárido cálido); Csa (clima mediterráneo de verano cálido); Cfa (clima subtropical húmedo); Cfb (clima oceánico); Dfb (clima continental húmedo de verano cálido); Dwa (clima continental húmedo de verano cálido influenciado por los monzones), N/A (No aplica) **Tipo de pigmento:** TP (pigmentos de titanio), IP (pigmentos de hierro), ZP (pigmentos de zinc), PTP (pigmentos de metales postransicionales), REP (pigmentos lantánidos), AEP (pigmentos alcalinotérreos), SP (pigmentos especiales) **Tipo de material:** LC (color claro), CC (color frío), RR (retroreflectivos), DRC (enfriamiento radiativo diurno), TC (termocrómico), PCM (material de cambio de fase), FL (Fluorescente), SCM (material súper frío) **Enfoque:** Cuantitativo (QT) **Tipo de estudio:** F (Campo), L (Laboratorio), S (Simulación), N/A (No específica) **Elemento arquitectónico:** W (Paredes exteriores), R (Techo), P (Pavimento) **Método de síntesis:** SSR (método de reacción en estado sólido), SG (método sol-gel), P (método de precipitación), CP (método de co-precipitación), H (método hidrotermal), QLD (método de deposición química líquida), U (método de ultrasonificación), G (método de gelatinización), CO (método de combustión), BM (método de molino de bolas), N/A (No aplica) **Propiedades ópticas:** TSR (Reflectancia solar total), UV (Reflectancia solar UV), VIS (Reflectancia solar VIS), NIR (Reflectancia solar NIR), TE (Emitancia térmica), TSA (Absorción solar total), SRI (Índice de reflectancia solar total) **Valor de reflectancia:** ↑TSR (Alta reflectancia solar), ↑UV (Alta reflectancia UV), ↑VIS (Alta reflectancia VIS), ↑NIR (Alta reflectancia IR), ↑TE (Alta emitancia térmica), ↑TSA (Absorción solar total) ↑SRI (Índice de reflectancia solar total), ↓TSR (Reflectancia solar baja), ↓UV (Reflectancia UV baja), ↓VIS (Reflectancia VIS baja), ↓NIR (Reflectancia IR baja), ↓TE (Alta emitancia térmica), ↓TSA (Absorción solar total), ↓SRI (Índice de reflectancia solar total), Nota* Alto>80%, Bajo<80% **Herramientas:** XRD (Difracción de rayos X), FE-SEM (Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo), SEM (Microscopio electrónico de barrido), TEM (Microscopio electrónico de transmisión), SPEC (espectrofotómetro UV-VIS-NIR), IRC (Cámara térmica o infrarroja), IRL (Lámpara térmica o infrarroja), FT-IR (Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier), MCR (Microscopio óptico), SPIN (Deposición de recubrimiento por centrifugado), PYRA (Piranómetro), TH (Termómetro) **Software:** EP (EnergyPlus), MN (Meteonorm), TR (TRNSYS), DS (DesignBuilder), EM (ENVI-met), N/A (No aplica)

Apéndice B: Análisis comparativo de los reactivos químicos empleados en materiales fríos

ID	Año	Autor	Compuesto químico	Formula química	Valor de reflectancia	Emisividad térmica
1	2023	Son et al.	Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	0.89 ¹	N/E
2	2019	Kolås et al.	Aluminio	Al	0.37-0.53 ¹ 0.60-0.66 ²	0.68-0.86
3	2023	Atiganyanun et al.	Sulfato de bario	BaSO ₄	0.81 ¹	N/E
4	2023	Yang N.	Sulfato de bario	BaSO ₄	0.97 ¹	0.9491
5	2022	Dong et al.	Sulfato de bario, carbonato de calcio y dióxido de silicio	BaSO ₄ , CaCO ₃ , SiO ₂	N/E	N/E
6	2018	Xiang and Zhang	Titanato de bario	BaTiO ₃	0.76 ²	N/E
7	2018	Morini et al.		BaTiO ₃	0.39 ¹	N/E
8	2018	Gao et al.	Óxido de bismuto, bromo y yodo	BiOBr _{1-x} I _x	0.95 ²	N/E
9	2018	Gao et al.	Óxido de bismuto, cloro y yodo	BiOCl _{1-x} I _x	0.94 ²	N/E
10	2018	Yuan et al.	Vanadato de bismuto	BiVO ₄	≥0.70 ²	N/E
11	2023	Riyas et al.	Vanadato de bismuto y dióxido de circonio	BiVO ₄ /ZrO ₂	0.82 ²	N/E
12	2020	Li et al.	Carbonato de calcio	CaCO ₃	0.95 ¹	0.94 en la ventana atmosférica
	2020	Perez et al.			N/E	N/E

13	2020	Huang et al.	Fluoruro de calcio	$\text{Ca}_0.5\text{Mg}_{10.5}(\text{HPO}_3)_2(\text{SO}_4)_2$	0.98 ¹	0.91
14	2022	Ianoş et al.	Hexaaluminato de calcio	$\text{CaAl}_{12}\text{O}_9$	0.71 ¹	N/E
15	2021	Xiao et al.	Óxido de cesio, praseodimio, neodimio y erbio	$\text{LiRE}(\text{MoO}_4+\delta)_2$	0.95 ²	N/E
16	2020	Rossi et al.	Hierro cromo, dióxido de titanio y dióxido de cromo	$\text{Cr}_{1.3}\text{Fe}_{0.7}\text{O}_3$, Cr_2O_3 y TiO_2	0.23-0.4 ²	N/E
17	2020	Zhou et al.	Cobalto y Zinc	$\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$	0.33 ²	N/E
18	2023	Tang et al.	Hidroxiapatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$	0.63-0.91 ²	N/E
19	2018	Chen et al.	Hierro y tungsteno codopados con lantano y cerio	$\text{La}_2\text{Ce}_2-x\text{W}_{0.5x}\text{Fe}_{0.5x}\text{O}_7+\delta$	0.71 ²	N/E
20	2023	Liu and Wang	Fosfato de magnesio	FePO_4 , V, Bi	N/E	N/E
21	2018	Zeng et al.	Níquel, titanio	$\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$	0.75 ²	N/E
22	2023	Wang et al.	Titanato de zinc perovskita	N/E	0.79 ¹ 0.81 ²	N/E
23	2023	Cao et al.	Dióxido de titanio rutilo	ZnTiO_3	N/E	N/E
24	2022	Zhang et al.	Dióxido de titanio	TiO_2	0.70 ¹	N/E
25	2023	Mayta et al.	Dióxido de titanio rutilo, óxido de hierro, óxido de níquel y óxido férrico	TiO_2 , FeO , NiO y Fe_2O_3	0.74-0.87 ¹ 0.75-0.83 ²	N/E

ID	Año	Autor	Compuesto químico	Formula química	Valor de reflectancia	Emisividad térmica
26	2021	Carlosena et al.	Silice	SiO_2	0.70 y 0.97 ¹	0.34 y 0.90
	2022	Feng et al.			N/E	8-25µm en la ventana atmosférica
27	2022	Qi et al.	Sílice, dióxido de titanio, trióxido de cromo y óxido férrico	SiO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3	0.64 ¹ 0.73 ²	0.79
28	2020	Anshul et al.	Hidróxido de sodio e hidróxido de potasio	NaOH y KOH	0.97 ¹	0.89
29	2019	Ullah et al.	Titanato de sodio	$\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$	0.94 ¹	N/E
30	2020	Berardi et al.	Dióxido de titanio	TiO_2	0.88 ¹	0.9
31	2020	Gao et al.	Dióxido de titanio y óxido de cobre	TiO_2 y CuO	0.48 ¹	N/E
32	2020	Rong et al.	Dióxido de titanio y óxido férrico	TiO_2 y Fe_2O_3	0.76-0.92 ¹ 0.87-0.92 ²	N/E
33	2023	Fan et al.	Dióxido de titanio y dióxido de silicio	TiO_2 , SiO_2 ,	0.91 ¹	0.973
34	2020	Wu et al.	Óxido de titanio y carbonato de calcio	TiO_2 y CaCO_3	N/E	0.95
35	2022	Dantas et al.	Dióxido de titanio, carbonato de calcio y magnesio (dolomita)	TiO_2 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	0.85 ¹	N/E
36	2021	Wang et al.	Dióxido de vanadio	VO_2	N/E	0.21-0.62
37	2022	Elakkiya and Sumathi	Fosfato de itrio, bismuto y vanadio	YPO_4 , Bi, V	0.83 ¹	N/E

38	2019	Sameera et al.	Aluminato de zinc	ZnAl ₂ O ₄ y TiO ₂	0.85 ¹ 0.86 ²	N/E
39	2023	Fedel et al.	Óxido de zinc	YInO ₃ -ZnO	0.75 ²	N/E
40	2021	Rosati et al.	Óxido de zinc	YIn _{0.9} Mn _{0.1} O ₃ -ZnO	0.74 ¹ 0.87 ²	N/E
41	2019	Primo et al.	Óxido de zinc y cobalto	ZnO y Co	0.50 ¹ 0.39 ²	N/E
42	2022	Zhang et al.	Metasiliceto de circonio	ZnS _x Se/ZrSiO ₄	0.70 ¹ 0.87 ²	N/E

Valor de reflectancia: reflectancia solar total¹ y reflectancia NIR²