

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

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

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO



PLÁSTICO RECICLADO: PROPUESTA DE UN MATERIAL TÉRMICO-ENERGÉTICO PARA LA ELABORACION DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS

T E S I S

que para obtener el grado de

MAESTRO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

Presenta

HÉCTOR ACUÑA PIZANO

Director de Tesis

DR. FRANCISCO FERNÁNDEZ MELCHOR

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

PLÁSTICO RECICLADO: PROPUESTA DE UN MATERIAL TÉRMICO-
ENERGÉTICO PARA LA ELABORACION DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS

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

HÉCTOR ACUÑA PIZANO

Correo electrónico: hector.acuna@uabc.edu.mx
Identificador ORCID: 0000-0001-7152-2699

Director de tesis: Dr. Francisco Fernández Melchor
Identificador ORCID: 0000-0003-1669-7327

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

Revisor de tesis: Dra. Karen Estrella Martínez Torres

Revisor de tesis: Dr. Aníbal Luna León

Ensenada, B.C. 31 de mayo de 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

Plástico Reciclado: Propuesta de un Material Térmico-Energético para la Elaboracion de Materiales Constructivos.

TESIS

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

Héctor Acuña Pizano

Aprobada por:



Dr. Francisco Fernández Melchor
Director de tesis



Dr. Marcos Eduardo González Trevizo
Miembro del comité



Dr. Aníbal Luna León
Miembro del comité



Dra. Karen Estrella Martínez Torres
Miembro del comité

Ensenada, Baja California, México. Junio 2021

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., 31 de mayo de 2021



Héctor Acuña Pizano

AVAL DE TERMINACIÓN DE TESIS

Fecha: 31 de mayo de 2021

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

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

HÉCTOR ACUÑA PIZANO

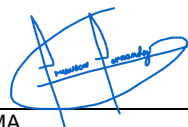
ha concluido su tesis de grado titulada:

PLÁSTICO RECICLADO: PROPUESTA DE UN MATERIAL TÉRMICO-ENERGÉTICO PARA LA ELABORACION DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS

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. FRANCISCO FERNÁNDEZ MELCHOR


FIRMA



**ARQUITECTURA
URBANISMO Y DISEÑO**
MAESTRÍA Y DOCTORADO
"Investigación de frontera en diseño"

DEDICATORIA

A MIS PADRES

Por guiarme desde pequeño por el camino que sus aventuras por
esta vida ha dictaminado como el más oportuno.

Por sembrar en mi mente y en mi corazón las más sólidas bases,
los mejores valores y los más nobles sentimientos.

Por apoyarme con Fe ciega frente a mis nuevos proyectos,
mi rebelde espontaneidad y mis ideas llenas de locura.

Estoy y estaré en todo momento en una infinita deuda, misma que llevaré conmigo
y recordaré cada vez cada vez que las cosas se tornen difíciles.

La suma de sus esfuerzos será mi más grande motivación en la vida
en mi búsqueda por el éxito.

AGRADECIMIENTOS

AL DR. MARCOS EDUARDO GONZÁLEZ TREVIZO

Por ser mi mentor, guía, y amigo desde el día cero.
Quien sin saberlo, sigue sacando lo mejor de mí.

AL DR. FRANCISCO FERNANDEZ MELCHOR

Por todo el apoyo y tiempo brindado
durante la realización de la tesis.

A LA DRA. KAREN ESTRELLA MARTÍNEZ TORRES

Por todas las asesorías, y apoyo brindado
en el desarrollo de la tesis.

AL DR. ANIBAL LUNA LEÓN

Por todas las asesorías, por compartir su
conocimiento, material y herramientas.

A LA DRA. NORMA GUADALUPE PESQUEIRA BUSTAMENTE

Por su oportuna participación crítica
durante la revisión de la tesis.

A TODOS LOS MIEMBROS DEL MYDAUD

Por todo el apoyo y conocimiento brindado durante la maestría.

A LA COMUNIDAD GLOBAL DE PRECIOUS PLASTIC

Por ser parteaguas de esta investigación.
Por los conocimientos y herramientas
en materia de reciclaje de plásticos.

A LA RECICLADORA DE FERNANDO PUEBLA EN TIJUANA, EL CENTRO DE ACOPIO TIERRA VIVA, CAFÉ LUNA DE MARZO, Y CARPINTERÍA ALFARO DE ENSENADA

Por facilitarme el material necesario para la realización
de las pruebas de esta investigación.

A LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Por ser fiel en mi realización plena como ser humano, tal cual su lema.

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Por el apoyo económico para la realización de los estudios de maestría.

A MIS PADRES

Por apoyarme de manera incondicional en todos mis sueños.



RESUMEN

La climatización de los espacios dentro de los edificios, se ha convertido en uno de los mayores consumidores de energía en el mundo. Esto se debe en gran medida a la incapacidad que tienen la mayoría de los edificios para mantener una temperatura confortable al interior de los mismos, en relación con la temperatura del exterior. Lo que encontramos en el medio, es precisamente la envolvente del edificio, así como los materiales que lo componen. Por otro lado, los residuos plásticos representan un gran problema a nivel mundial en la actualidad; pero, al mismo tiempo, son materia prima para el desarrollo de nuevos materiales de construcción. Esta investigación tuvo por objetivo el desarrollo de materiales utilizando como materia prima **plástico reciclado**, en donde se buscó optimizar el desempeño térmico-energético en comparación con materiales contemporáneos como el acero y el concreto. Se realizaron compuestos plásticos utilizando como **matriz** plástico **polipropileno (PP)** y, como **rellenos**, un mineral y dos subproductos: **suelo, aserrín** y restos de **café**. El desarrollo de las muestras se realizó mediante el método de extrusión de plásticos. La muestra con **PP** y **café** en relación 1:1 (**C50**), presentó las propiedades térmicas más favorables con una conductividad de conductividad (λ) de **0.159** W/(m·K), calor específico (C_p) de **1.393** kJ/(kg·K) y densidad (ρ) de **839** kg/m³. Asimismo, un ejercicio de simulación térmico-energética para la ciudad de Mexicali, B.C., mostró que la muestra **C50** tuvo un desempeño **cuatro veces más óptimo que el block de concreto** en términos de ganancias y pérdidas de calor. Son necesarias futuras investigaciones que tengan por objetivo la optimización de las propiedades térmicas de materiales, especialmente aquellos empleados en la envolvente arquitectónica.

ABSTRACT

Cooling and heating has become one of the biggest consumptions of energy in the world. This is due to the inability that most buildings have to maintain a comfortable indoor temperature, in relation to the environment temperature. What we find in between, is indeed the building envelope, as well as the materials that compose it. On the other hand, plastic waste represents a great problem worldwide, and at the same time, it represents raw material for the development of new construction materials. The objective of this research was the development of building materials using **recycled plastic** as raw material, where it was sought to optimize the thermal-energy performance in comparison with contemporary materials such as steel and concrete. Plastic composites were made using as **matrix: polypropylene plastic (PP)**, and as **fillers**: a mineral and two by-products: **soil, sawdust** and **coffee dregs**. The development of the samples was carried out by means of the plastic extrusion method. The sample with PP and coffee in a 1:1 ratio, presented the most favorable thermal properties with a conductivity (λ) of **0.159 W/(m K)**, specific heat (C_p) of **1.393 kJ/(kg K)** and density (ρ) of **839 kg/m³**. Likewise, a thermal-energy simulation exercise for the city of Mexicali, B.C., showed that the **C50 sample had a performance four times more optimal than the concrete block** in terms of heat gains and losses. Future research is needed that focuses on optimizing the thermal properties of materials, especially those used in the architectural envelope.



ARQUITECTURA
URBANISMO Y DISEÑO
MAESTRÍA Y DOCTORADO
"Investigación de frontera en diseño"

Palabras clave: *Plástico reciclado, Materiales constructivos, Desempeño térmico-energético, Desarrollo de materiales*

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	17
ÍNDICE DE TABLAS	22
LISTADO DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	23
INTRODUCCIÓN	25
CAPÍTULO 1. ARQUITECTURA, ENERGÍA Y RESIDUOS.....	26
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	26
1.1.1. Consumo energético de los edificios	27
1.1.2. Residuos plásticos.....	31
1.1.3. Justificación al planteamiento del problema.....	33
1.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	37
1.3. OBJETIVOS	38
1.3.1. Objetivo general	39
1.3.2. Objetivos específicos.....	39
1.4. JUSTIFICACIÓN	40
1.5. DESCRIPCIÓN DE CAPÍTULOS.....	41
1.5.1. CAPÍTULO 1. ARQUITECTURA, ENERGÍA Y	41
1.5.2. CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	41
1.5.3. CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE.....	41
1.5.4. CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	42
1.5.5. CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....	42
1.5.6. CAPÍTULO 6. ANÁLISIS TÉRMICO-ENERGÉTICO	43
1.5.7. CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	44
2.1. ANTECEDENTES	44

2.2. TERMODINÁMICA, FÍSICA DE EDIFICIOS Y CIENCIA DE MATERIALES	46
2.2.1. Mecanismos de transferencia de calor	46
2.2.2. Física de edificios	48
2.2.3. Propiedades físicas de los materiales.....	51
2.2.4. Propiedades térmicas de los materiales	51
2.2.5. Propiedades superficiales de los materiales	53
2.2.5. Análisis térmico de los materiales (métodos, normas y estándares)	53
2.2.6. Análisis físico de los materiales (métodos, normas y estándares)	54
2.3. PLÁSTICOS	55
2.3.1. Desempeño termofísico del plástico	56
2.4. MÉTODOS DE RECICLAJE DE PLÁSTICO	57
2.4.1. Trituración	57
2.4.2. Inyección	58
2.4.3. Compresión	59
2.4.4. Extrusión	60
2.5. COMPUESTOS PLÁSTICOS.	61
2.6. RESIDUOS Y OTROS MATERIALES.	63
2.6.1. Borra de Café	64
2.6.2. Residuos de madera	65
2.2.3. Suelo	67
2.7. HIPÓTESIS	71
CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE	72
3.1. COMPUESTOS PLÁSTICOS	73
3.2. COMPUESTOS PLÁSTICOS RECICLADOS (RPC)	75
3.2.1. [R01] Compuestos de residuos de PET y PU	75
3.2.2. [R03] Compuestos de PU, PET y retardante contra el fuego	75
3.2.3. [R04] Compuestos de residuos de HDPE, LDPE y PP	76

3.2.4. [R06] Compuestos de caucho y látex	77
3.3. COMPUESTOS PLÁSTICOS CON RESIDUOS NATURALES (NPC)	77
3.3.1. [N01] Compuestos de EPS y hoja de palma datilera	77
3.3.2. [N02] Compuestos de espuma de PU y cáscara de trigo.....	78
3.3.3. [N03, W15] Compuestos de HDPE y celulosa, tratados con agentes de unión	79
3.3.4. [N04] Compuestos de TDI, cáscara de arroz y corcho expandido	79
3.3.5. [N05] Compuesto de PLA, retardante de llamas y restos de restos de fibra de lana	80
3.3.6. [N06] Compuestos de RPUF, lodos de papel y TCPP	80
3.3.7. [N07] Compuestos de EPS y polvo residual de piel de camello	81
3.3.8. [N08, N09, N10] Compuestos de fibras naturales y resina epóxica	81
3.3.9. [N11] Madera plástica con lana mineral reciclada.....	82
3.3.10. [N12, N13, W04, W05, O19, O20] Compuestos de HDPE y residuos naturales y minerales	83
3.3.11. Compuestos de R-HDPE y residuos de café	84
3.3.12. Compuestos de fibras naturales y HDPE reciclado.....	84
3.4. COMPUESTOS MADERA PLÁSTICA (WPC).....	85
3.4.1. [W01] Compuestos de madera plástica con residuos de PE, PP y harina de madera.....	85
3.4.2. [W02] Compuestos de madera plástica expuestos a pruebas de intemperismo acelerado	86
3.4.3. [W03] Compuestos de madera huecos mediante tubos de PVC, rellenos de Polietilenglicol (PCM)	86
3.4.4. [W06] Compuestos de madera plástica reciclada con fibra de vidrio y nanoarcilla.....	87
3.4.5. [W07, R05] Madera plástica de LDPE y pino	88
3.4.6. [W08] Bio-compuestos de madera y PLA	88
3.4.7. [W09] Compuestos de madera plástica y agentes de unión	89
3.4.8. [W10] Compuestos de madera plástica y caucho de llantas	89

3.4.9. [W11]	Madera plástica de HDPE, aserrín de pino y MAPE	89
3.4.10. [W12]	Madera plástica de HDPE, aserrín de pino y Fusabond E265	90
3.4.11. [W13, W14]	Madera plástica con PP posconsumo y textil	91
3.4.12. [W16]	Compuestos de madera plástica y grafito (WPC)	91
3.4.13. [W17]	Tableros de madera, caucho y agentes de unión	92
3.4.14. [W18, W19]	Compuestos con HDPE y madera (comparación de materias primas recicladas y vírgenes)	92
3.4.15. [W20, W21]	Madera plástica con residuos de ABS y PS	93
3.4.16. [W22]	Madera plástica con aserrín de cedro, PET, HDPE y PP	93
3.4.17. [W23]	Madera plástica reciclada (RPL)	94
3.4.18. [W24, W25]	Madera plástica reciclada expuestas a temperaturas extremas	94
3.4.19. [W26, O18]	Compuestos de HDPE con madera y fibra de vidrio	95
3.5.	COMPUESTOS PLÁSTICOS CON FIBRAS Y/O MINERALES (OPC)	95
3.5.1. [O01, O02]	Compuestos de LDPE, hexadecano (PCM) y megol	96
3.5.2. [O03, O04]	LDPE lineal y grafeno funcionalizado (PCM)	96
3.5.3. [O05, O06]	Filamento de HDPE/PP y carbón activado (CAC)	97
3.5.4. [O07, O08]	Compuesto de material de cambio de fase microencapsulado (MEPCM) y grafito expandido (EG)	98
3.5.5. [O09, O10, R02]	Paneles aislantes de aerogel de silicio	98
3.5.6. [O11]	HDPE reciclado con grafito (PCM)	99
3.5.7. [O12, O13]	Compuestos de Polipropileno reforzado con nanoplaquetas de grafeno	100
3.5.8. [O14, O15, O16, O17]	Residuos de equipos eléctricos y electrónicos reforzados con grafito	100
3.5.9. [O21, O22]	Compuestos de lana y biopolímeros como agentes aglutinantes	101
3.6.	COMPUESTOS PLÁSTICOS CON TIERRA (SPC)	101
3.6.1. [S01, S02]	Ladrillos de arcilla con HDPE y PET como agregado aglutinante	102

3.6.2. [S03] Ladrillos de plástico y tierra	102
3.6.3. [S04] Compuestos de botellas de PET y tierra	102
3.6.4. [S05] Compuestos de LDPE y arena	103
3.7. COMPUESTOS PLÁSTICOS CEMENTOSOS (CPC)	103
3.7.1. [C01, C02] Mortero cemento-escoria-arena con aerogel de sílice y caucho de llantas.....	104
3.7.2. [C03, C04, C05, C06] Concreto con agregados de HDPE, LDPE, PP y PET	104
3.7.3. [C07] Compuestos PS, PC, cemento y ceniza volante	105
3.7.4. [C08] Mortero cemento-arena con PVC residual de cable eléctrico	106
3.7.5. [C09, C10] Concreto asfáltico de HDPE y PP	106
3.7.6. [C11] Concreto ligero con poliestireno expandido (EPS)	107
3.7.7. [C12] Compuestos de LDPE, cenizas volantes y retardante contra el fuego	108
3.7.8. [C13] Concreto con plástico pulverizado y suelo de laterita	108
3.7.9. [C14] Mortero con agregado arena/PET 3:1	108
3.7.10. [C15] Mortero de cemento y caucho granulado	109
3.7.11. [C16] Mortero cemento-arena con HDPE como agregado sustituto.....	109
3.8. ANÁLISIS CONTEXTUAL DE COMPUESTOS.....	110
3.8.1. Métodos de elaboración de muestras.....	111
3.8.2. Propiedades termofísicas de compuestos plásticos.....	112
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	115
4.1. DESARROLLO DE ESPECÍMENES	120
4.1.1. Resumen del desarrollo de especímenes.....	120
4.1.2. Instrumental (desarrollo de especímenes).....	121
4.1.3. Materiales.....	126
4.1.4. Limpieza de materiales.....	129
4.1.5. Densidad de materiales, deshidratación y porcentaje de agua (DDA)	130

4.1.6. Dosificación de muestras.....	133
4.1.7. Diseño de especímenes	136
4.1.8. Elaboración de especímenes	137
4.2. ANÁLISIS TERMOFÍSICO DE ESPECÍMENES	145
4.2.1. Resumen del Análisis termofísico de especímenes	145
4.2.2. Método de análisis térmico	145
4.2.3. Método de análisis físico	146
4.2.4. Instrumental (caracterización de materiales)	146
4.2.5. Densidad	149
4.2.6. Barrenación y acondicionamiento.....	150
4.2.7. Calibración	152
4.2.7. Caracterización térmica.....	153
4.2.8. Cálculo	155
4.2.9. Presentación de resultados	156
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	159
5.1. SUPERFICIE Y SECCIÓN TRANSVERSAL DE ESPECÍMENES	159
5.1.1. Superficie de especímenes	163
5.1.2. Sección transversal de especímenes	164
5.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y TÉRMICAS DE COMPUESTOS PLÁSTICOS	165
5.2.1. Adecuación de propiedades termofísicas	166
5.2.2. Interpretación de propiedades termofísicas	171
5.2.3. Densidad (ρ).....	171
5.2.4. Conductividad térmica (λ).....	171
5.2.5. Resistividad térmica (R_{ho}).....	172
5.2.6. Calor Específico Volumétrico (VCp)	172
5.2.7. Difusividad térmica (D)	172
5.2.8. Comparativo de muestras.....	173

5.2.9. Compuestos plásticos con café	174
5.2.10. Compuestos plásticos con madera	175
5.2.11. Compuestos plásticos con suelo	176
5.2.12. Compuesto plástico con café, madera, y SUELO (WSC).....	178
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS TÉRMICO-ENERGÉTICO	179
6.1. INERCIA TÉRMICA DE MATERIALES	180
6.1.1. Valor-R, Valor-U de materiales	184
6.1.2. Decremento térmico (ΔT) y retraso térmico (Δt) de materiales	184
6.1.3. Block de concreto vs. Polipropileno (ΔT y Δt).....	185
6.1.4. Block de concreto vs. Compuestos con café (ΔT y Δt).....	186
6.1.5. Block de concreto vs. Compuestos con madera (ΔT y Δt).....	187
6.1.6. Block de concreto vs. Compuestos con tierra (ΔT y Δt)	188
6.2. DESEMPEÑO TÉRMICO-ENERGÉTICO	189
6.2.1. Balance energético.....	190
6.2.2. Análisis general de balance energético	191
6.2.3. Comparativo block (BC ref) y compuesto plástico con café (C50)	194
6.2.4. Comparativo de materiales en día típico de mes cálido	194
6.2.5. Comparativo de materiales en día típico de mes frío	196
6.2.6. Conclusión balance energético de materiales.....	197
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	198
7.1. CONCLUSIONES.....	198
7.2. RECOMENDACIONES.....	201
BIBLIOGRAFÍA	202
APÉNDICE A.....	221
APÉNDICE B.....	231
1. ANÁLISIS CLIMÁTICO.....	231
2. ANÁLISIS PARAMÉTRICO	233

2.1. TEMPERATURA	234
2.2. HUMEDAD RELATIVA.....	237
2.3. PRECIPITACIÓN.....	240
2.4. RADIACIÓN	241
2.5. VIENTO	242
3. ANÁLISIS BIOCLIMÁTICO	245
3.1. TRIÁNGULOS DE CONFORT.....	245
3.2. DIAGRAMA BIOCLIMÁTICO	247
3.3. TABLAS DE MAHONEY	248
3.4. DIAGRAMA PSICOMÉTRICO.....	250
4. BIBLIOGRAFÍA	252

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema grafico general del planteamiento del problema.	26
Figura 2. Consumo global de energía por sector en 2017	27
Figura 3. Consumo final energético por sector y energético.....	28
Figura 4. Etapas detalladas de la evaluación de ciclo de vida (LCA) de materiales de construcción basadas en Estándares Europeos	30
Figura 5. Esquema grafico del planteamiento del problema y su relación con el tema de investigación.	33
Figura 6. Objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030 emitida por las Naciones Unidas en 2015.....	34
Figura 7. Emisiones globales de GEI por sector en 2017.....	35
Figura 8. Esquema de Marco Teórico	44
Figura 9. Diagrama de la Ley de Fourier	47
Figura 10. Representación esquemática del retraso térmico (Δt) y decremento térmico (ΔT) de un cerramiento.....	50
Figura 11. Usos del plástico por clasificación	56
Figura 12. Propiedades termofísicas de los seis principales termoplásticos de acuerdo a la clasificación por parte de la Asociación de polímeros por la Asociación de la Industria de Plásticos.	57
Figura 13. Polipropileno triturado en partículas $\leq 3/8"$ en el Centro de acopio Tierra Viva de la ciudad de Ensenada.	58
Figura 14. Inyección manual de polipropileno para reciclaje de caretas de protección.....	59
Figura 15. Máquina a compresión semi-industrial de reciclaje de plástico.....	60
Figura 16. Componentes principales de una extrusora de plástico.....	61
Figura 17. Borra de café al salir de una cafetera expreso.	65

Figura 18. Caracterización de materiales de construcción, zona noroeste de México.	67
Figura 19. Análisis de propiedades térmicas de la madera de pino.....	67
Figura 20. Caracterización térmica de 7 tipos de suelo de Ensenada, Baja California.	68
Figura 21. Análisis térmico in-situ (Sauzal, Ensenada).....	69
Figura 22. Propiedades termofísicas de 7 tipos de suelo de Ensenada, Baja California.....	70
Figura 23. Conductividad térmica de las 6 categorías de compuestos plásticos	74
Figura 24. (izquierda), porcentajes por región del total de 60 investigaciones; (derecha), porcentajes por compuesto del total de 60 investigaciones.....	110
Figura 25. Porcentaje por método de fabricación de especímenes del total de 60 investigaciones.	111
Figura 26. Propiedades termofísicas de compuestos (parte 1), si el valor >2.5, la barra del gráfico aparece completamente llena y se especifica el valor real.	113
Figura 27. Propiedades termofísicas de compuestos (parte 2), si el valor >2.5, la barra del gráfico aparece completamente llena y se especifica el valor real.	114
Figura 28. Pichel	121
Figura 29. Báscula digital.....	121
Figura 30. Data Logger DLG-88395.	122
Figura 31. A la izquierda. Dave Hakkens creando una lampara a base de plástico reciclado. A la derecha. Primera versión de la extrusora de la comunidad global: <i>Precious Plastic</i>	123
Figura 32. Diseño 3D desarrollado en <i>Solid Works</i> de extrusora de plástico adaptada para desarrollo de compuestos plásticos.	124
Figura 33. Extrusora de plástico adaptada para desarrollo de compuestos plásticos de la presente tesis.	125
Figura 34. Polipropileno recuperado y triturado.....	126
Figura 35. Borra de café 100% arábica.	127
Figura 36. Aserrín 90-95 m% proveniente de madera de pino.	127

Figura 37. Suelo Sauzal Ensenada, a una profundidad entre 1 y 2 m.	128
Figura 38. Material contaminante obtenido posterior al proceso de separación por densidad.	129
Figura 39. Criba de 1/8" para limpieza y selección de partículas ≤ 0.125 " de café.	129
Figura 40. Criba de 1/8" para limpieza y selección de partículas ≤ 0.125 " de aserrín.	130
Figura 41. Malla de 1/16" para limpieza y selección de partículas ≤ 0.0625 " de suelo.	130
Figura 42. Secado al sol de polipropileno.	131
Figura 43. PP triturado en partículas de $\leq 3/8$ ".	131
Figura 44. Pesaje inicial de café.	132
Figura 45. Pesaje inicial de aserrín.	132
Figura 46. Pesaje inicial del total de tierra disponible.	133
Figura 47. Primera prueba de extrusión de PP y aserrín con relación en masa 1:1.	134
Figura 48. Mezcla con aserrín y PP 50 m% ambos materiales.	134
Figura 49. Dosificación de materiales	135
Figura 50. Unión de molde para especímenes y punta de extrusora de plástico.	137
Figura 51. A la izquierda. Borra de café. A la derecha. Polipropileno	139
Figura 52. Pesaje de materiales conforme a dosificación.	140
Figura 53. Mezcla en frío manual de la muestra WSC.	140
Figura 54. Unión de molde con salida de extrusora.	141
Figura 55. Inserción de barra de madera de pino en el otro extremo del molde y tensión mediante ligas para mantener presión al interior.	141
Figura 56. Abastecimiento de material y llenado de molde.	142
Figura 57. Separación de molde y extrusora de plástico.	142
Figura 58. Inspección inicial de prueba fallida.	143
Figura 59. Total de 10 muestras, 4 especímenes por muestra.	144
Figura 60. Calibrador vernier digital.	146
Figura 61. Taladro de banco.	146

Figura 62. Analizador térmico KD2 PRO	147
Figura 63. Sonda TR-1.....	147
Figura 64. Sonda SH-1	148
Figura 65. Dimensionamiento de espécimen.	149
Figura 66. Obtención de masa de espécimen.	149
Figura 67. Preparación y perforación para inserción de sonda SH-1.....	150
Figura 68. Inspección visual de sección transversal de muestras.	151
Figura 69. Aplicación de pasta térmica en oquedades de espécimen.	152
Figura 70. A la izquierda. Inserción de sonda SH-1 por uno de los extremos del espécimen WSC-02. A la derecha. Inserción de sonda TR-1 por el otro extremo del espécimen WSC-02.....	154
Figura 71. RPP. Superficie y sección transversal de material.	159
Figura 72. C16. Superficie y sección transversal de material.	160
Figura 73. C33. Superficie y sección transversal de material.	160
Figura 74. C50. Superficie y sección transversal de material.	160
Figura 75. W16. Superficie y sección transversal de material.	161
Figura 76. W33. Superficie y sección transversal de material.	161
Figura 77. W50. Superficie y sección transversal de material.	161
Figura 78. S16. Superficie y sección transversal de material.	162
Figura 79. S33. Superficie y sección transversal de material.	162
Figura 80. S50. Superficie y sección transversal de material.	162
Figura 81. WSC. Superficie y sección transversal de material.	163
Figura 82. Esquema de media, L.I. y L.S.	166
Figura 83. Conductividad media, L.I. y L.S de la muestra C50.	167
Figura 84. Gráfica de adecuación de propiedades termofísicas de compuestos plásticos.	170
Figura 85. Gráfica comparativa PP de referencia (P ref) y PP reciclado (RPP).	173
Figura 86. Gráfica comparativa compuestos plásticos con café.	174

Figura 87. Gráfica comparativa compuestos plásticos con madera.	175
Figura 88. Gráfica comparativa compuestos plásticos con suelo.	176
Figura 89. Valor-R y Valor-U de materiales.	182
Figura 90. Retraso (Δt) y decremento (ΔT) térmico de materiales.	183
Figura 91. Retraso (Δt) y decremento (ΔT) térmico de RPP y Block de concreto (BC ref).	185
Figura 92. Retraso (Δt) y decremento (ΔT) térmico de compuestos plásticos con café.	186
Figura 93. Retraso (Δt) y decremento (ΔT) térmico de compuestos plásticos con madera.	187
Figura 94. Retraso (Δt) y decremento (ΔT) térmico de compuestos plásticos con tierra.	188
Figura 95. Días típicos de temperatura por mes.	190
Figura 96. Ganancias y pérdidas de calor de materiales, y temperaturas mensuales de la ciudad de Mexicali, B.C.	192
Figura 97. Ganancias y pérdidas mensuales de materiales.	193
Figura 98. Ganancias y pérdidas de calor de materiales en día típico de mes cálido.	195
Figura 99. Ganancias y pérdidas de calor de materiales en día típico de mes frío.	196
Figura 100. Balance energético anual de materiales.	197

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Valoración de 3 destinos finales —reciclaje (R), relleno sanitario (S) e incineración (I)— para los desechos plásticos según las emisiones de GEI y la energía total utilizada.</i>	36
Tabla 2. <i>Composición de residuos en diferentes regiones de México y el mundo.</i>	63
Tabla 3. <i>Parámetros de temperatura y RPM utilizados en el método de extrusión de compuestos plásticos de la literatura explorada.</i>	112
Tabla 4. <i>Proceso metodológico de la investigación.</i>	117
Tabla 5. <i>Densidad inicial y seca de polímero matriz y rellenos.</i>	133
Tabla 6. <i>Parámetros de temperatura y RPM utilizados en el método de extrusión de compuestos plásticos de la presente investigación.</i>	139
Tabla 7. <i>Resultados obtenidos en el proceso de calibración.</i>	153
Tabla 8. <i>Adecuación de propiedades termofísicas de compuestos y materiales de referencia.</i>	169
Tabla 9. <i>Valor-R, Valor-U, ΔT, y Δt de compuestos y materiales de referencia.</i>	181

LISTADO DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

g	Gramo	T	Temperatura
kg	Kilogramo	T_n	Temperatura neutra
Mt	Megatonelada	T_{min}	Temperatura mínima
mm	Milímetro	T_{med}	Temperatura media
cm	Centímetro	T_{max}	Temperatura máxima
m	Metro	T_{int}	Temperatura interior
μm	Micrómetro (1×10^{-6} m)	T_{ext}	Temperatura exterior
”	Pulgadas	ZC	Zona de confort
'	Pies	ZC_i	Límite inferior de zona de confort
v	Volumen, m ³	ZC_s	Límite superior de zona de confort
ρ	Densidad, kg/m ³	Q	Calor
Ø	Diámetro	°C	Grado Centígrado
%	Porcentaje	K	Grado Kelvin
m%	Masa expresada en porcentaje, %	λ	Conductividad térmica, W/(m·K)
% m/m	Masa concentrada de una solución expresado en porcentaje, %/%	Rho	Resistividad térmica, (m·K) /W
W	Vatio (Watt)	Cp	Calor específico, kJ/(kg·K)
J	Julio (Joule)	VCp	Calor específico volumétrico, MJ/(m ³ ·K)
kJ	Kilojulio (Kilojoule)	D	Difusividad térmica, mm ² /s
MJ	Megajulio (Megajoule)	Δt	Retraso térmico
V	Voltaje	ΔT	Decremento térmico
HP	Caballo de fuerza	n	Número
s	Segundo	σ	Desviación estándar
		C.I.	Intervalo de confianza

L.I.	Límite inferior	PS	Poliestireno (#6)
L.S.	Límite superior	CS	Resistencia a la compresión, kg/cm ²
PE	Polietileno	FS	Resistencia a la flexión, kg/cm ²
PET	Polietileno tereftalato (#1)	TS	Resistencia a la tensión, kg/cm ²
HDPE	Polietileno de alta densidad (#2)	RPM	Revoluciones por minuto
PVC	Policloruro de vinilo (#3)	PCM	Material de cambio de fase
LDPE	Polietileno de baja densidad (#4)	RPL	Madera plástica reciclada
PP	Polipropileno (#5)	PDI	Controlador digital de temperatura

INTRODUCCIÓN

Los problemas medioambientales causados por **los residuos** y el **consumo desmedido de energía** se han convertido en una de las principales preocupaciones a nivel mundial. Por una parte, la **etapa operativa** de los edificios es responsable del 30% del consumo energético global de energía. Por otro lado, **el plástico**, un material con tales propiedades técnicas que se ha convertido en un activo imprescindible en el consumo humano por su versatilidad, aplicabilidad, y bajo coste. Si bien, **los residuos plásticos** representan un gran problema a nivel mundial, al mismo tiempo, significan **materia prima** para el desarrollo de **nuevos materiales de construcción**.

p. | 25

Como refiere Balaras (1993), el uso de **energía empleada en climatización** está directamente **relacionado** con los **materiales** utilizados en la **envolvente arquitectónica**, por tanto, la **optimización** de los materiales que la componen, representa una **solución** relevante para **reducir el consumo energético del edificio**.

La baja conductividad térmica de los plásticos en comparación con otros materiales de construcción como el acero y el hormigón representa una gran posibilidad en esta necesidad por generar nuevos materiales sustentables que pueden contribuir a la reducción del consumo de energía. Esta investigación tuvo como objetivo **desarrollar** un material térmico-energético utilizando como materia prima base **residuos plásticos**. Por lo tanto, **materiales, métodos y herramientas**, fueron exploradas en la caracterización de propiedades termofísicas (**densidad, conductividad térmica y calor específico**).

Los resultados de esta investigación constituyen una aportación a la academia, a la comunidad científica, a desarrolladores de materiales, y a la industria de la construcción, en el desarrollo nuevos de materiales térmico- energéticos.

CAPÍTULO 1. ARQUITECTURA, ENERGÍA Y RESIDUOS

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro de las múltiples problemáticas que enfrenta nuestro planeta hoy en día y de acuerdo con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible emitida por las Naciones Unidas en 2015, las principales problemáticas que requieren mayor atención y acción de carácter urgente son: la pobreza, la desigualdad, la injusticia y el **cambio climático**.

p. | 26

El presente trabajo se centra precisamente en la última problemática anteriormente mencionada: el cambio climático, y lo hace desde dos enfoques genéricos dentro de las múltiples problemáticas que a su vez subyacen entorno al cambio climático. Por una parte, está uno de los actores protagonistas de la industria de la construcción y la arquitectura, **el edificio**. Por otra parte, tenemos a un material con propiedades técnicas tales que se ha convertido en un activo esencial en el consumo humano debido a su amplia gama de aplicaciones y su bajo costo; por consecuencia, existe un abuso en su consumo, lo que a su vez ha conllevado a sumar en la degradación del medio ambiente, desde el proceso de producción y toda vez que este se convierte en desecho, **el plástico**. La problemática general abordada en esta investigación, se puede representar gráficamente en la Figura 1:

Figura 1. Esquema gráfico general del planteamiento del problema.



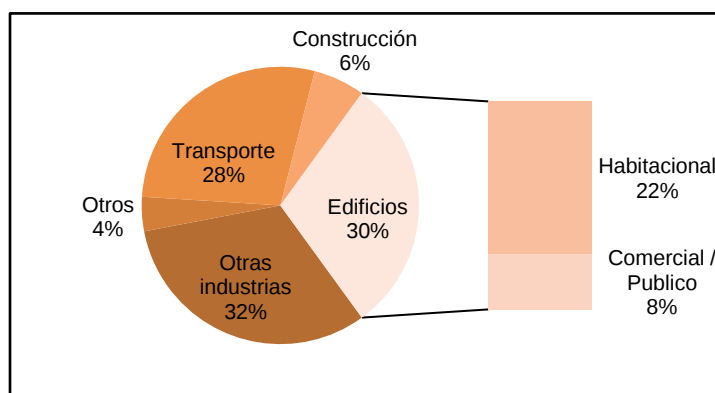
1.1.1. Consumo energético de los edificios

Las edificaciones —en todo su ciclo de vida, pero especialmente en su etapa operativa—, así como **la generación e ineficiente gestión de los residuos**, son dos de los principales entes generadores de contaminación en todos los términos, son responsables de la extracción de materias primas, del consumo de recursos naturales no renovables, de las **emisiones de gases productores de efecto invernadero**, del **consumo energético** y de agua.

p. | 27

La energía consumida globalmente proviene en mayor parte de energías no renovables como lo son: los combustibles fósiles y la generada por centrales nucleares. En este sentido, los edificios, tanto en su etapa de construcción, como en su etapa operativa, son los mayores entes consumidores de energía. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (AIE) y como se puede apreciar en la Figura 2, en 2017, tanto la operatividad de los edificios, así como la construcción de los mismos,

Figura 2. Consumo global de energía por sector en 2017



Nota. Adaptado de *Global share of buildings and construction final energy and emissions*, por International Energy Agency, 2018, 2018 Global Status Report.

fueron responsables del 36% del consumo global de energía, siendo la industria de la construcción responsable de un 6%, y **la operatividad de los edificios** de carácter habitacional, comercial y público responsables del **30%** restante (International Energy Agency, 2018).

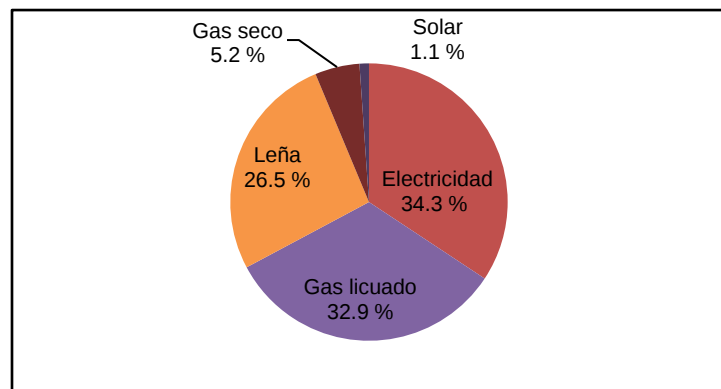
Según el balance de energía global publicado por la AIE en 2019, China y Estados Unidos son responsables de poco más de un tercio de la energía que se consume en todo el mundo, con: 22 % y 16 %, respectivamente. De acuerdo con el Departamento de energía de los Estados Unidos, —en este país— el 41 % de la energía es consumida por los edificios, y cerca del 50 %

de esa energía es empleada en climatizar los espacios por medio de sistemas activos (U.S. Department of Energy, 2012). Es decir que, en los Estados Unidos, cerca de una quinta parte de la energía que se consume es utilizada ya sea para enfriar o para calentar los espacios dentro de un edificio.

Dentro de los usos de energía sobresalientes con respecto a los países miembros de la AIE es el del **calentamiento de los espacios** en el **sector residencial** con un **10%** del consumo energético total —de países miembros de la AIE—, mismo que representa cerca de la mitad de la energía utilizada por los edificios de carácter habitacional. Sin embargo, este porcentaje no aplica en todos los países, ya que intervienen factores como la ubicación geográfica, el clima, entre otros. En general, los países que mayor energía emplean para calentar los espacios dentro de los edificios de carácter habitacional son los países europeos como Hungría con 15% y en general la Unión Europea con 14%.

De acuerdo al Balance Nacional de Energía 2017 emitido por la Secretaría de Energía, en México —país miembro de la AIE—, el 17,6 % del consumo energético nacional es responsabilidad del sector residencial, comercial y público. A pesar de que no se especifica el uso final de la energía

Figura 3. Consumo final energético por sector y energético.



Nota. Adaptado de *Consumo final energético por sector y energético 2017*, por Secretaría de Energía, 2018, Balance Nacional de Energía 2017.

de esta partida, se hace mención del porcentaje del tipo de energético que le compete a este sector, mismo que se muestra en la Figura 3 (SENER, 2018).

La utilización de energía empleada en climatización está directamente relacionada con los materiales empleados en la envolvente arquitectónica, por lo tanto, la optimización

de los materiales que la conforman representan una medida pertinente para reducir el consumo energético del edificio (Balaras, 1996). Dicho lo anterior, existe un déficit en cuanto al estudio de las propiedades térmicas de los materiales de construcción, estos se han enfocado principalmente en analizar las propiedades superficiales y mecánicas. Es hasta fechas recientes que la caracterización de las propiedades térmicas dentro de los materiales constructivos comenzó a ser estudiada (Gonzalez-Trevizo, 2015).

Como ya se ha hecho mención, existe una gran demanda energética en la etapa **operativa de los edificios** (ver Figura 2, p. 27), dicha etapa y los elementos que la componen se pueden apreciar en la evaluación de ciclo de vida de materiales constructivos desarrollada por Silvestre et al. (2014) (ver Figura 4, p. 27).

En dicha evaluación se analizaron materiales en tres etapas generales. La **etapa A** evalúa la etapa productiva del material desde la extracción, su procesamiento y su instalación en el edificio. La **etapa B** considera toda la energía directa e indirecta requerida toda vez que el material ya se encuentra en funciones en la edificación (etapa operativa). La **etapa C** analiza la etapa terminal del material hasta su disposición final o incorporación en un nuevo ciclo de vida.

La etapa operativa —etapa B— es la de mayor consumo energético de todas las etapas, el porcentaje energético asignado para esta etapa depende de algunos factores y puede variar de edificio en edificio. De acuerdo con recientes investigaciones que evaluaron el porcentaje de consumo energético tanto para la etapa operativa (B), así como la energía incorporada (A) —etapa de producto/proceso constructivo (A1-A5)—, diferentes autores obtuvieron los siguientes resultados.

- **A:** 80-90 %, **B:** 10-20 % (Ramesh et al., 2010)
- **A:** 85 %, **B:** 15 % (Estokova et al., 2017)
- **A:** 75-80 %, **B:** 20-25 % (Röck et al., 2020)

Figura 4. Etapas detalladas de la evaluación de ciclo de vida (LCA) de materiales de construcción basadas en Estándares Europeos

Límites del LCA		Etapas del ciclo de vida / Módulos de información del LCA	Designación de etapa del ciclo de vida y descripción	
Cradle to Cradle (de la cuna a la cuna)	Cradle to Grave (de la cuna a la tumba)	Etapa de producto (A1-A3)	A1	Extracción y procesamiento de materias primas, procesamiento de materias secundarias.
			A2	Transporte al lugar de manufactura.
			A3	Manufactura.
		Etapa de proceso constructivo (A4-A5)	A4	Transporte al lugar de construcción.
			A5	Instalación en el edificio.
		Etapa de uso - Módulos de información relacionados con el edificio mismo (B1-B5)	B1	Uso o aplicabilidad del producto instalado.
			B2	Mantenimiento.
			B3	Reparación.
			B4	Reemplazo.
			B5	Remodelación.
		Etapa de uso - Módulos de información relacionados con la operatividad del edificio (B6-B7)	B6	Uso de energía operacional.
			B7	Consumo de agua operacional.
		Etapa final de vida (C1-C4)	C1	Deconstrucción, demolición.
			C2	Transporte a procesamiento de residuos.
			C3	Procesamiento de residuos para su reutilización, recuperación y/o reciclado.
			C4	Disposición final.
		Beneficios más allá del límite del sistema "Cradle to Grave"	D	Reutilización, recuperación y/o reciclado de cada uno de los elementos.

Nota. Adaptado de "Environmental impacts and benefits of the end-of-life of building materials - calculation rules, results and contribution to a "cradle to cradle" life cycle" (p. 38), por Silvestre et al., 2014, Journal of Cleaner Production, 66.

Röck et al. (2020), contemplaron una evaluación del ciclo de vida de 650 casos de estudio, obteniendo como resultado destacable **una reducción de consumo energético** en la **etapa operativa** de los edificios (B) debido a las mejoras operativas de las construcciones. En casos de edificaciones con alta eficiencia energética, la energía incorporada (A) ascendió al 45-50%, y en casos aislados llegó a estar por encima del 90%, lo que nos indica una tendencia al alza de la etapa de construcción (A) y los materiales empleados en ella (A).

1.1.2. Residuos plásticos

Por otra parte, debido al incontrolable desarrollo industrial, el mundo se encuentra inundado por residuos sólidos. Dentro de esa gran pila de residuos se encuentra los **plásticos**, mismos que, en su etapa final de vida —cuando no son reciclados—, estos terminan en rellenos sanitarios —en el mejor de los casos—, y —en el peor de ellos—, en los océanos. Esto ha traído como consecuencia innumerables problemáticas medioambientales.

Se estima que desde el periodo que comprende de 1950 a 2015 se han producido 8 300 millones de toneladas (Mt) de plástico virgen de las cuales 6 300 Mt de plástico se han convertido en desecho. De esas 6 300 Mt, **difícilmente un 9% se ha reciclado**, un 12% incinerado y el restante 79% se encuentra dispuesto en rellenos sanitarios, en vertederos clandestinos y disperso en los océanos. Si la producción de resinas plásticas y la tendencia de manejo de residuos continua, se calcula que para el año 2050 un total de 12 000 Mt de plástico se encontraran dispuestas tanto en rellenos sanitarios como en el medio ambiente (Geyer *at el.*, 2017). Para contextualizar, conforme a la población global en 2015 de acuerdo a la ONU —misma que se pondera en los 7 300 millones de habitantes—, podemos decir que por cada

persona viva en 2015 —y hasta esa fecha—, se produjeron 1.13 toneladas de plástico¹, así como 0.83 toneladas de desechos plásticos².

De acuerdo con la información presentada hasta el momento, surge entonces —y de carácter urgente— la necesidad de, por una parte, hacer frente a la **merma energética** que ha tenido lugar en la **climatización de los espacios dentro de los edificios** y que tiene una relación estrecha con las propiedades de los materiales de la envolvente arquitectónica, especialmente con las propiedades térmicas de los materiales constructivos, en donde existe un déficit en lo que a desarrollo de materiales de construcción respecta. Lo anterior, debido a que el estudio de los materiales se ha centrado en el estudio de las propiedades mecánicas (Benjelloun *et al.*, 2015) y las propiedades superficiales (Johansson *et al.*, 2014).

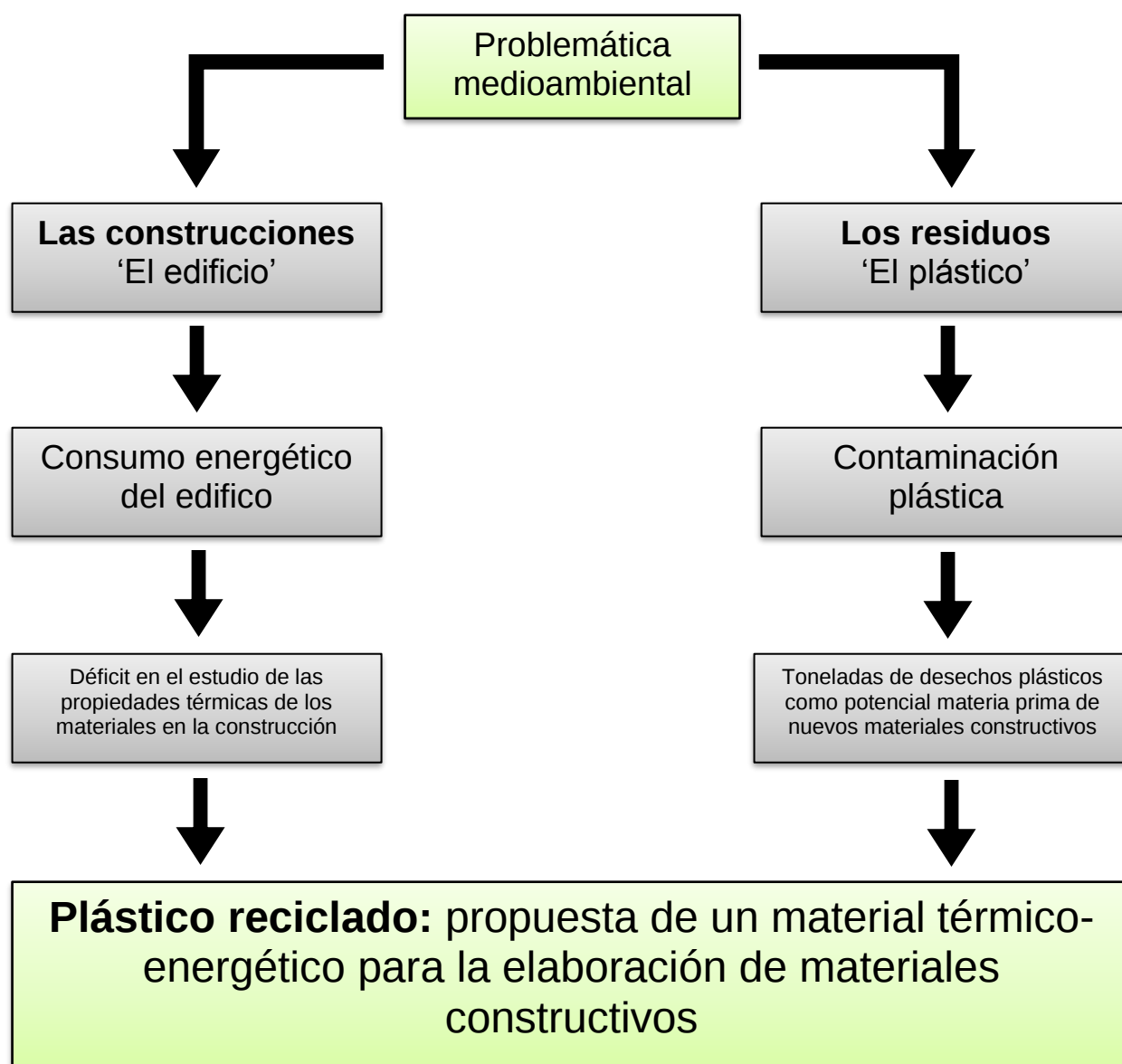
Por otro lado, los residuos plásticos —que representan cerca de cuatro quintas partes de la producción global de plástico— en estos momentos se manifiestan en forma de contaminación; sin embargo, es también un material potencial a ser utilizado como materia prima para nuevos materiales. La generación de condiciones favorables que adecuen el precio de los plásticos reciclados puede ser creada al utilizar plástico como un material primario dentro de los materiales de construcción para viviendas pequeñas (Gulhane & Gulhane, 2017).

Por lo tanto, el presente estudio se enfocó en atender las dos problemáticas anteriormente mencionadas y como éstas a su vez se pueden relacionar con la búsqueda de información que pueda ser utilizada para la generación de soluciones que resuelvan desde un enfoque energético y del aprovechamiento de los residuos, una faceta de la problemática medioambiental. La problemática que da título a esta investigación, se representa gráficamente en la Figura 5.

¹ 8 300 Mt de plástico global producido / 7 300 millones de personas = 1.13 toneladas / persona

² 6 300 Mt de desechos plásticos generados / 7 300 millones de personas = 0.83 toneladas / persona

Figura 5. Esquema grafico del planteamiento del problema y su relación con el tema de investigación.



1.1.3. Justificación al planteamiento del problema

El **consumo energético de los edificios** y la **generación de residuos plásticos** tienen una relación directa con la creación y existencia de siete de los diecisiete objetivos de desarrollo sostenible emitidos por las Naciones Unidas (ver Figura 6, p. 34). Asimismo, estas dos problemáticas son responsables en gran medida de una de las principales problemáticas que

enfrenta el planeta: el cambio climático. De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC³), las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son la principal causante del cambio climático (IPCC, 2013).

Figura 6. Objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030 emitida por las Naciones Unidas en 2015.



Nota. Adaptado de *Objetivos de desarrollo sostenible*, por Organización de las Naciones Unidas, 2015, ONU (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>)

Una vez reconocido el protagonista responsable del cambio climático, encontramos entonces el elemento que aglutina y da pertinencia a ambas problemáticas anteriormente mencionadas. Por lo tanto, es importante hacer notar la huella de carbono —indicador de GEI— que genera tanto el consumo energético de los edificios, así como la generación de residuos plásticos.

³ *International Panel on Climate Change* por sus siglas en Ingles.

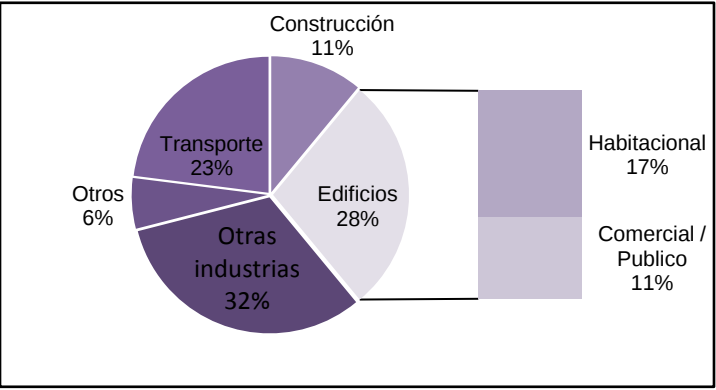
De acuerdo con recientes investigaciones por parte de la Agencia Internacional de Energía, y como se puede observar en la Figura 7, tanto la operatividad de los edificios, así como la construcción de los mismos, fueron responsables de cerca de dos quintas partes de las emisiones globales de GEI, siendo la industria de la

construcción responsable de un 11%, y la operatividad de los edificios de carácter habitacional, comercial y público responsables de un 28%.

La comparación entre la Figura 2 y la Figura 7 muestra clara evidencia de que existe una estrecha relación entre las emisiones globales de GEI y el consumo global de energía por parte de la operatividad de los edificios con 28% y 30%, respectivamente. Con lo anterior, se puede presumir lo siguiente: **la disminución del consumo energético en los edificios traerá como consecuencia una disminución en las emisiones de GEI; lo anterior, de acuerdo con Balaras, 1996, podría lograrse al optimizar los materiales constructivos empleados en la envolvente arquitectónica.**

En otro contexto, los desechos plásticos también tienen una repercusión en las emisiones de GEI, lo anterior debido a la energía empleada para su disposición final —siempre y cuando se gestione el destino final de los desechos plásticos—. La Tabla 1 muestra el resultado de un meta-análisis en donde se compararon tres posibles escenarios para el destino final de los desechos plásticos, los cuales son: **reciclaje (R), relleno sanitario (S) e incineración (I).** Dependiendo el tipo del tipo de plástico, se valoró el impacto que tienen los tres posibles destinos finales tanto en emisiones de GEI, así como la energía total utilizada. (R-S-I significa que reciclaje

Figura 7. Emisiones globales de GEI por sector en 2017.



Nota. Adaptado de *Global share of buildings and construction final energy and emissions*, por International Energy Agency, 2018, 2018 Global Status Report.

(R) tiene el menor impacto, seguido por relleno sanitario (S), después incineración (I) —siendo esta última la de mayor impacto—).

Tabla 1. Valoración de 3 destinos finales —reciclaje (R), relleno sanitario (S) e incineración (I)— para los desechos plásticos según las emisiones de GEI y la energía total utilizada.

p. | 36

Referencia	Material / aplicación	Emisiones de GEI mejor-medio-peor	Energía total utilizada mejor-medio-peor
Arena <i>et al.</i> (2003)	PE y contenedores líquidos de PET	R-S-I	R-I-S
Beigl and Salhofer (2004)	Envoltorios plásticos	R-I	-
Chilton <i>et al.</i> (2010)	PET	R-I	-
Craighill y Powell (1996)	PET, LDPE y PVC	R-S	-
Dodbiba <i>et al.</i> (2008)	PE, PS y PVC	R-I	-
Eriksson y Finnveden (2009)	Plásticos no reciclables	I-S	-
Eriksson <i>et al.</i> (2005)	PE, PP, PS, y PET	R-I-S	R-I-S
Finnveden <i>et al.</i> (2005)	PVC	R=I-S	R-I-S
	PE, PP, PS, PET and PVC	I-S-R	I-R-S
Foolmaun y Ramjeeawon (2012)	PET	R-S-I	R-I-S
Grant <i>et al.</i> (2001)	PET, HDPE y PVC	R-L	R-S
Moberg <i>et al.</i> (2005)	PET	R-I-S	R-I-S
Perugini <i>et al.</i> (2004)	PE y contenedores líquidos de PET	R-S-I	R-I-S
Perugini <i>et al.</i> (2005)	PE y contenedores líquidos de PET	R-S-I	R-I-S
Rajendran <i>et al.</i> (2013)	Plásticos	R-I	-
US EPA (2006)	PET, HDPE y LDPE	R-I-S	R-I-S
Wenisch <i>et al.</i> (2004)	Plásticos	R=S	-
Wollny <i>et al.</i> (2001)	Envoltorios plásticos	R-S-I	R-I-S
M. Al-Maaded <i>et al.</i> (2012)	Plásticos	R-S-I	R-I-S
Shonfield (2008)	Plásticos	I-S-R	-

Nota. Adaptado de “Environmental and economic life cycle analysis of plastic waste management options. A review”, por Bernardo *et al.*, 2016, AIP Conference Proceedings, 1779.

De manera casi unánime, el **reciclaje (R)** —en comparación con el **relleno sanitario (S)** y la **incineración (I)**— es el destino final de los desechos plásticos de menor generación de

emisión de GEI y que mejor energía consume (Al-Maaded et al., 2012; Arena et al., 2003; Beigl & Salhofer, 2004; Chilton et al., 2010; Craighill & Powell, 1996; Dodbiba et al., 2008; Environmental Protection Agency, 2006; O. Eriksson et al., 2005; O. Eriksson & Finnveden, 2009; Foolmaun & Ramjeeawon, 2012; Grant et al., 2001; Moberg et al., 2005; Floriana Perugini et al., 2004; Floriane Perugini et al., 2005; Rajendran et al., 2013; Shonfield, 2008; Wenisch et al., 2004; Wollny et al., 2001).

1.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Los residuos plásticos representan un problema a nivel mundial, pero al mismo tiempo, son materia prima potencial para el desarrollo de nuevos materiales de construcción. Estudios han demostrado cómo este sustituto de la madera, el concreto, y el acero —todos, materiales contemporáneos—, se ha ido desarrollando en los últimos años de tal manera que ha pasado de ser un material para la elaboración de mobiliario urbano, hasta material constructivo para el desarrollo de vivienda de uno o dos niveles (Gulhane & Gulhane, 2017; Krishnaswamy & Lampo, 2001). Sin embargo, al igual que todos los materiales, tiene sus bondades, limitaciones y/o oportunidades de mejora. Al ser éste un material relativamente nuevo en la construcción y aún en desarrollo, surgen las primeras preguntas que nos acercan a la pregunta central de investigación: **¿Dónde están esas áreas de oportunidad? ¿Podría el plástico reciclado coadyuvar a mitigar el consumo energético de los edificios? ¿Qué otro tipo de residuos y/o materiales podrían mezclarse con el plástico en harás de mejorar sus propiedades termofísicas? ¿Qué variables son verdaderamente oportunas de estudiar para hacer del plástico un material térmicamente eficiente?**

Tomando en cuenta que por sí mismo, las propiedades termofísicas del plástico varían considerablemente dependiendo su origen (petróleo, gas natural u otro), su clasificación (#1 PET,

#2 HDPE, #3 PVC, #4 LDPE, #5 PP, #6 PS, #7 otros), su temperatura de fabricación, su método de fabricación (inyección, extrusión, compresión u otro), combinación entre plásticos y/o otros materiales; surge la pregunta central de esta investigación:

¿Qué **método, materiales y herramientas** generan un material reciclado con un retraso térmico (Δt) mayor y un decremento térmico (ΔT) menor a los materiales constructivos contemporáneos?

1.3. OBJETIVOS

Dentro de los termoplásticos, existe una amplia gama de plásticos dependiendo principalmente de su estructura química interna. Dependiendo del total de procesos que sufrió la resina virgen desde que fue extraída del subsuelo —ya sea como petróleo o gas natural—, hasta que pasó a convertirse en un producto, éste adquirió ciertas propiedades químicas, mecánicas, físicas, eléctricas y **térmicas**.

El objetivo principal de esta investigación se centra en reconocer la disponibilidad de residuos termoplásticos post-consumo y post-industriales de la ciudad de Ensenada y alrededores. Una vez descubierto el abanico de residuos termoplásticos de los que se puede echar mano, analizar sus propiedades termofísicas para seleccionar un termoplástico que fungirá como: matriz (base). Luego entonces, generar combinaciones con otro tipo de residuos mediante un proceso de reciclaje de plástico, para poder analizar nuevamente sus propiedades termofísicas, con el objetivo principal que consiste en generar un material con propiedades térmico-energéticas tales que pueda contribuir a obtener temperaturas estables y confortables al interior de los edificios. Asimismo, que esto represente en un ahorro energético por climatización.

1.3.1. Objetivo general

- **Desarrollar** material de construcción a partir de **residuos plásticos**. Material con **propiedades termofísicas** óptimas para la envolvente arquitectónica con el objetivo de **reducir el consumo energético** por climatización de los edificios.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar un **análisis exhaustivo** de la **literatura** para **reconocer** las **propiedades termofísicas** de los residuos **plásticos**, otro tipo de **residuos** y **materiales** constructivos.
- Identificar la **disponibilidad** de **residuos plásticos**, otro tipo de **residuos** y **materiales** en la ciudad de Ensenada y alrededores.
- **Determinar** posibles combinaciones plástico/residuos y/o materiales que puedan **incrementar** el **retraso** (Δt) y **reducir** el **decremento térmico** (ΔT) con respecto a los materiales contemporáneos (mamposterías, concreto, acero).
- **Determinar** el **proceso de reciclaje** que sea **factible** y permita la **combinación** de **plásticos** y/o **materiales** para la creación de especímenes.
- Analizar las **propiedades termofísicas** de los especímenes desarrollados.
- Generar **simulación térmica** para **comparar** los **materiales desarrollados** con uno de los **materiales contemporáneos**.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Ha quedado de manifiesto que la operatividad de los edificios es responsable del 30% del consumo global de energía (International Energy Agency, 2018), y que la optimización de los materiales que conforman la envolvente arquitectónica puede coadyuvar a reducir el consumo energético de los mismos (Balaras, 1996). La ciencia de materiales —en materia de materiales constructivos— tiene bien caracterizado las propiedades físicas de los mismos, especialmente aquellas con fines estructurales (Benjelloun et al., 2015) y de exposición a la humedad (Johansson et al., 2014). Es hasta fechas recientes que las propiedades térmicas comenzaron a ser ampliamente estudiadas (Gonzalez-Trevizo, 2015).

p. | 40

Si bien, **los residuos plásticos** representan un gran problema a nivel mundial, al mismo tiempo, significan **materia prima** para el desarrollo de **nuevos materiales de construcción**. La baja conductividad térmica de los plásticos en comparación con otros materiales de construcción como el acero y el hormigón representa una gran posibilidad en esta necesidad por generar nuevos materiales sustentables que pueden contribuir a la reducción del consumo de energía.

La generación de residuos y el consumo desmedido de energía, son ambas problemáticas que preocupan a la comunidad científica (Chavan et al., 2019). En este sentido, la caracterización de propiedades termofísicas —**densidad, conductividad térmica y calor específico**— de nuevos materiales constructivos desarrollados con residuos plásticos —donde se exploren **métodos, materiales y herramientas**—, suma y contribuye a mitigar las problemáticas anteriormente mencionadas.

Asimismo, los resultados de esta investigación serán una aportación a la academia, a la comunidad científica, a desarrolladores de materiales, y a la industria de la construcción, en el desarrollo nuevos materiales térmico-energéticos.

1.5. DESCRIPCIÓN DE CAPÍTULOS

1.5.1. CAPÍTULO 1. ARQUITECTURA, ENERGÍA Y

El presente capítulo tiene por objetivo, dar a conocer al lector la ‘razón de ser’ de esta investigación. Presenta la problemática que emana a través de la relación que tienen los residuos plásticos y el consumo energético de los edificios, y da apertura a una solución. A su vez, presenta una pregunta de investigación, objetivos y justificación de la misma.

p. | 41

1.5.2. CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Este capítulo, comprende el análisis y entendimiento de cuatro disciplinas principales (**energía, plástico, reciclaje, residuos y otros materiales**) que confinan el tema principal de esta investigación: **La propuesta de un material constructivo térmico-energético que utilice como materia prima plástico reciclado**. El objetivo de este apartado es tener una perspectiva panorámica y pleno conocimiento de todos los componentes que tiene de alguna manera relación directa o indirecta con el tema de investigación.

1.5.3. CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE

El capítulo 3 comprende una revisión sistemática de la literatura de los últimos 10 años. Se analizaron un total de 60 artículos originales revisados por pares. Dependiendo del tipo de relleno (residuo o material no plástico), se clasificaron 89 compuestos plásticos en seis categorías. El objetivo principal de esta revisión consistió en conocer las tendencias en materia de desarrollo de compuestos plásticos, conocer los tipos de materiales y porcentajes, técnicas de reciclaje y de elaboración de muestras, métodos de análisis térmico, normativas, y las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de los compuestos. Con lo anterior, se buscó poder

responder a las preguntas: **¿Qué falta por investigar? ¿Hacia dónde mira la comunidad científica? ¿Cuál puede ser mi aportación en esta investigación?**

1.5.4. CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

p. | 42

En este capítulo se presenta el enfoque de esta investigación, mismo que es de carácter **cuantitativo** y de tipo **experimental**, su desarrollo puede dividirse en dos procesos:

1. La **creación de especímenes** (muestras).
2. El **análisis** de los mismos y comparación de datos.

El **primer proceso** consiste en la creación de especímenes utilizando como materia prima plástico recuperado y otros materiales de relleno. Para el desarrollo de especímenes, se realizaron compuestos plásticos utilizando como **matriz**: polipropileno (PP), y como **rellenos** un mineral y dos subproductos: tierra, aserrín y restos de café. Se realizaron tres combinaciones diferentes: **Suelo-PP, Aserrín-PP, Café-PP**.

El análisis se centra en el estudio de las propiedades de carácter **físico y térmico**, por lo que el **segundo proceso** consiste en el análisis del desempeño de los especímenes con un enfoque **térmico-energético**.

1.5.5. CAPÍTULO 5. RESULTADOS

Este capítulo presenta todos los resultados obtenidos a través del proceso metodológico de desarrollo de especímenes y caracterización termofísica de los mismos. Por lo anterior, los resultados se presentan divididos en dos secciones conforme al producto de cada proceso. En la primera parte se muestra a través de fotografías, la **sección transversal y capa superficial** las muestras obtenidas posteriormente al proceso productivo de especímenes. La segunda sección presenta los resultados obtenidos de la **caracterización termofísica**.

1.5.6. CAPÍTULO 6. ANÁLISIS TÉRMICO-ENERGÉTICO

El capítulo 6, es un capítulo adicional que ayuda a interpretar los resultados obtenidos a través de un software de simulación energética: OPAQUE 3.0. Por medio de este programa, es posible estimar cómo se comportarían las propiedades termofísicas de los resultados obtenidos en la realidad. Nos permite comprar el comportamiento térmico-energético de los materiales desarrollados en comparación con otros materiales contemporáneos en un día de diseño frente a una situación real. Para este análisis, se tomó como referencia los datos climáticos de la ciudad de Mexicali, Baja California.

p. | 43

1.5.7. CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

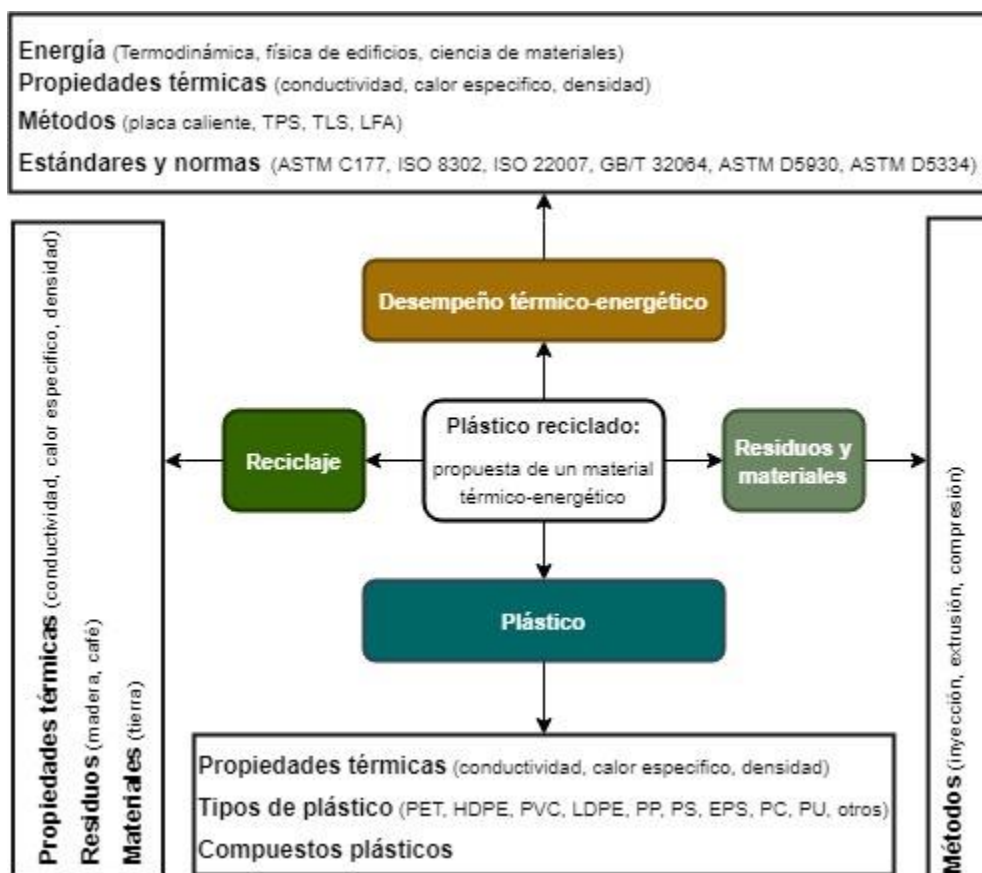
Por último, en este capítulo se presenta una síntesis argumentativa de los resultados sobresalientes. Asimismo, se presentan recomendaciones para el seguimiento de esta o futuras investigaciones relacionadas.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Energía, plástico, reciclaje, residuos y otros materiales, son las cuatro disciplinas que confinan el Marco Teórico del tema central de esta investigación. La Figura 8 representa de

p. | 44

Figura 8. Esquema de Marco Teórico



2.1. ANTECEDENTES

El termino plástico proviene del griego: '*plastikós*'. Su denominación: plástico, hace referencia a materiales conformados por una variedad de compuestos orgánicos, sintéticos o semi-sintéticos; al ser un material maleable, puede ser moldeado en objetos sólidos (PlasticsEurope, n.d.). En este sentido y conforme al cortometraje publicado por *National*

Geographic en 2018, la existencia del plástico data de hace 3 500 años cuando los Olmecas de México utilizaban plásticos provenientes de fuentes naturales como la savia de los árboles, de goma o de caucho para crear la pelota de goma. Durante la mitad del siglo XIX y el siglo XX los plásticos sintéticos hicieron su debut y se utilizaron por décadas, sin embargo, a diferencia de los plásticos orgánicos, estos derivan de combustibles fósiles utilizando el petróleo y el gas natural como materia prima (National Geographic, 2018)

Recycled Plastic Lumber (RPL) —madera plástica reciclada por sus siglas en inglés—, es un material utilizado en la construcción que está hecho a base de plástico reciclado. Es utilizado como sustituto de materias primas en estructuras hechas de concreto, metal y madera. La producción de RPL requiere de pocos procesos químico-industriales (Krishnaswamy & Lampo, 2001).

Analizando el uso de RPL en la construcción a través del tiempo, Krishnaswamy (2001) precisa que uno de los primeros usos de RPL fue su aplicación en mobiliario urbano, así como elementos de estrés bajo y estructuras exteriores de carga no crítica. Posteriormente, y gracias al desempeño satisfactorio, éste comenzó a ganar popularidad y se empezó a aplicar en pasarelas, muelles y *decks* (Krishnaswamy & Lampo, 2001). Consecuentemente, fabricantes y diseñadores estructurales se dieron a la tarea de mejorar el comportamiento tanto del material como del diseño de RPL lo que resultó en la aplicabilidad de este material en estructuras donde el concreto, el acero y la madera suelen ser los materiales tradicionales, tal es el caso de estructuras como viguetas, pilotes marinos, puentes y viviendas de uno o dos niveles (Gulhane & Gulhane, 2017).

2.2. TERMODINÁMICA, FÍSICA DE EDIFICIOS Y CIENCIA DE MATERIALES

El **principio de conservación de la energía** es una de las leyes más importantes y fundamentales de la naturaleza. Esta afirma que, durante una interacción, la energía puede pasar de una forma a otra, pero al final la cantidad total de energía siempre permanece constante (Buche & Jerde, 1996). De ahí, la tan concurrida frase:

p. | 46

“La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma”

La **energía** entonces se puede definir como la capacidad para realizar un trabajo y/o generar cambios (Buche & Jerde, 1996). La energía está presente en el universo de varias maneras, como energía térmica, mecánica, química, electromagnética y nuclear. La termodinámica es una de las ciencias que estudia la energía, el término proviene de las palabras griegas *therme* (calor) y *dynamis* (fuerza).

2.2.1. Mecanismos de transferencia de calor

Antes de hablar sobre los mecanismos que utiliza la energía para transportarse y manifestarse en forma de calor, vale la pena concretar el concepto mismo de **calor**. Que es precisamente una forma de **energía** que se transfiere entre dos sistemas o entre un sistema y el exterior (medio ambiente) gracias a una diferencia de temperatura entre los mismos (Buche & Jerde, 1996). Existen tres mecanismos básicos de transferencia de calor: **conducción**, **convección** y **radiación**. En todos estos tres mecanismos se requiere que haya una diferencia de temperatura y todos pasan del sistema de alta temperatura a uno de menor temperatura (Çengel et al., 2019).

Conducción. Es la transferencia de calor entre partículas de una sustancia con mayor energía, hacia las adyacentes con menos energía, como producto de sus interacciones —al estar en contacto—. Puede ocurrir en sólidos —debido a vibraciones de la red de partículas y/o

transporte de energía por medio de electrones libres— y/o líquidos y gases —debido a colisiones de las partículas y a difusión molecular— (Çengel et al., 2019). La tasa de transferencia de conducción se rige bajo la *Ley de Fourier de conducción de calor*, que indica que la tasa de conducción de calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa misma dirección. Dicha tasa se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

A = Área de transferencia de calor, m^2 .

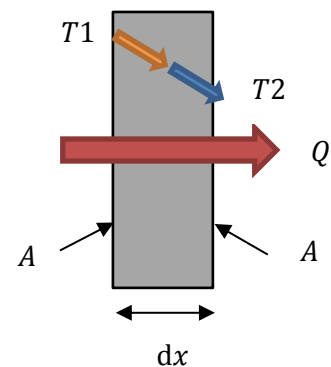
dT = Diferencia de temperaturas entre el extremo 1 y el extremo 2 ($T_1 - T_2$).

dx = Espesor del material.

k = Constante de conductividad térmica (λ) del material, $W/(m \cdot K)$.

Q = Calor transferido por unidad de tiempo, W .

Figura 9. Diagrama de la Ley de Fourier



Convección. A diferencia de la conducción, la convección involucra una transferencia de calor un líquido o gas en movimiento y una superficie sólida, combinando el efecto de conducción y un **fluido en movimiento** (Çengel et al., 2019). La tasa de transferencia de convección se rige bajo la *Ley de enfriamiento de Newton*. Dicha tasa se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_f) \quad (W) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

A = Área de transferencia de calor, m^2 .

T_s = Temperatura de la superficie.

T_f = Temperatura del fluido lejos de la superficie.

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

Q = Calor transferido por unidad de tiempo, W.

Radiación. A diferencia de la conducción y la convección, la radiación no requiere la presencia de un medio interventor para transportar la energía, sino que lo hace a través del vacío en forma de ondas electromagnéticas o fotones. Este mecanismo de transferencia es el más rápido de los tres, y lo puede hacer a la velocidad de la luz (Çengel et al., 2019). Es exactamente la manera en como la energía llega del Sol a la Tierra. Todos los cuerpos a una temperatura superior al cero absoluto ($-273.15^\circ C$) emiten radiación térmica. La tasa máxima de transferencia de radiación se rige bajo la *Ley de Stefan-Boltzmann*. Dicha tasa se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_{emitida} = \epsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (W) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

A_s = Área transversal a la transferencia de calor, m^2 .

T_s = Temperatura de la superficie en escalas absolutas, e.g. grados Kelvin (K).

σ = Constante de Stefan-Boltzmann = $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$.

ϵ = Emisividad, 0-1.

Q = Calor transferido por unidad de tiempo, W.

2.2.2. Física de edificios

En algún momento de vida, se ha experimentado esa sensación de estar en el exterior en una tarde calurosa, pasar al interior de una vivienda con grandes muros de tierra o piedra (**materiales de construcción**), y sentir esa sensación de frescura desde el primer segundo en que pasamos el exterior al interior. Asimismo, se ha percibido la sensación opuesta al entrar a

un gran galerón con paredes y techos de lámina galvanizada (**material de construcción**), en el que al entrar comienzan las gotas de sudor, y la primera pregunta que llega a la mente es:

“¿Cómo puede una persona estar aquí?”

p. | 49

En ambos casos, la razón de ser de esa sensación de frescura o calor es consecuencia de una serie de estrategias de **diseño bioclimático** que se llevaron a cabo, o simplemente se omitieron. Una de esas estrategias, es precisamente la selección de **materiales constructivos**.

Un correcto diseño bioclimático de la envolvente del edificio siempre tendrá como encomienda el siguiente objetivo: **promediar la temperatura del ambiente de la evolución diaria, buscando mantener una temperatura al interior constante (o inferior a la media de la temperatura extrema), en ausencia de otros mecanismos (activos)** (Cervantes & Raymundo, 2012). Lo que también se puede entender cómo: **mantener una temperatura agradable dentro del edificio, independientemente de las variaciones de temperatura que existen a lo largo del día en el exterior**.

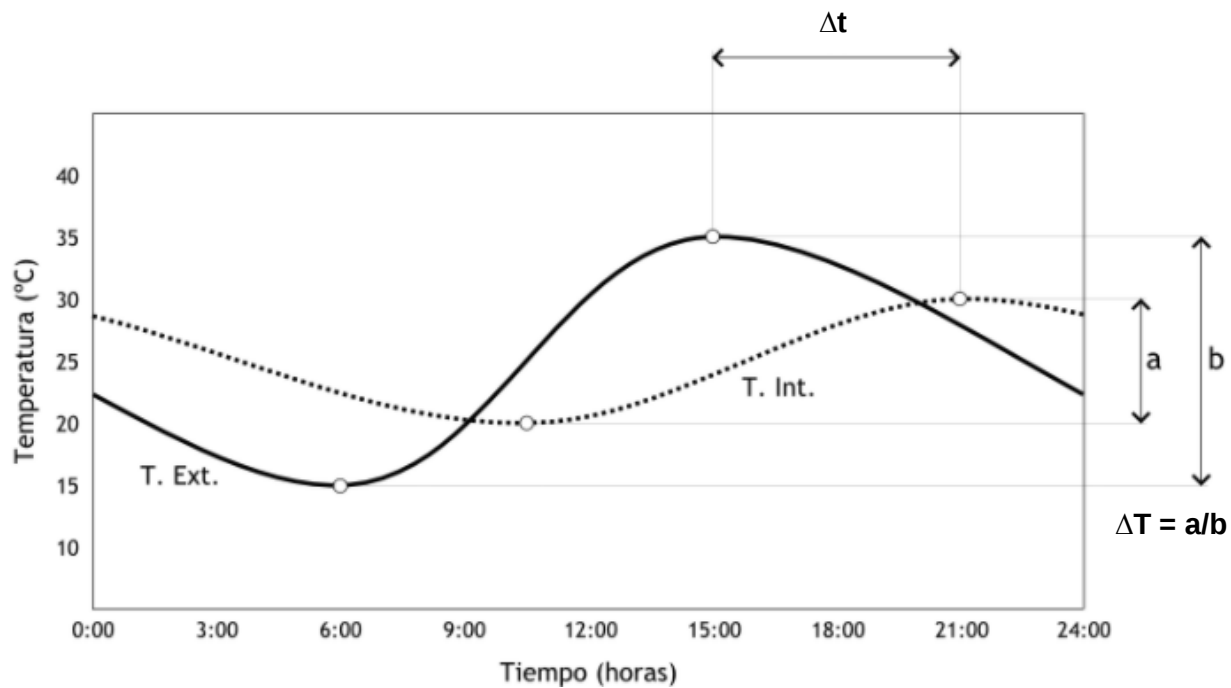
Para hablar de materiales, especialmente aquellos que forman parte de la envolvente arquitectónica, primero es necesario hablar de **inercia térmica** de los materiales, que es la **capacidad** de un material para **almacenar** energía (calor), **conservarla** y **liberarla** paulatinamente (Çengel et al., 2019). Ésta depende de propiedades físicas como la masa, la densidad (ρ), la conductividad térmica (λ) y el calor específico (C_p).

Retraso térmico (Δt). Retardo o desfase térmico, es una magnitud que expresa el **tiempo** que la energía (calor) tarda en pasar de un lado a otro (Seiscubos, 2018). En otras palabras, es el tiempo de diferencia que existe en cada una de las caras de un material entre la temperatura máxima del exterior (T_{ext}) con respecto a la del interior (T_{int}). Generalmente se mide en horas (h).

Decremento térmico (ΔT). También conocido como **amortiguamiento térmico**, es una magnitud que expresa la reducción de la temperatura cíclica de la superficie exterior, con respecto a la superficie del interior (Seiscubos, 2018). Este valor se expresa en valor fraccional o porcentaje.

La Figura 10 es una representación esquemática del **Retraso térmico (Δt)** y **Decremento térmico (ΔT)** de un cerramiento.

Figura 10. Representación esquemática del retraso térmico (Δt) y decremento térmico (ΔT) de un cerramiento.



Nota. Adaptado de *Representación del retraso térmico y el amortiguamiento térmico*, por Seiscubos, 2018, Seiscubos (<https://www.seiscubos.com/conocimiento/nivel-de-masa-termica>)

Coefficiente global de transferencia de calor (Valor-U). Este valor considera la transferencia de calor con conducción y convección en ambos lados de un material. Es una magnitud que representa la velocidad de transferencia de energía que se da en un material o sistema constructivo desde el aire exterior al interior pasando por los materiales (Cromer &

Fernández-Ferrer, 1986). Es el inverso de la suma del total de resistencias de un sistema constructivo. El Valor-U se puede medir en $W/(m^2 \cdot K)$.

2.2.3. Propiedades físicas de los materiales

p. | 51

Una propiedad física es una característica que describe un objeto (material) o una sustancia (Buche & Jerde, 1996). Se basa principalmente en la estructura del objeto, y por tanto es visible y medible.

Densidad (ρ). La densidad se puede definir como la cantidad de masa que se encuentra contenida en un determinado volumen de un objeto o sustancia (Buche & Jerde, 1996). La densidad se puede medir en kg/m^3 .

2.2.4. Propiedades térmicas de los materiales

Las propiedades térmicas son a su vez propiedades físicas (Buche & Jerde, 1996). Son aquellas propiedades que determinan el comportamiento que tiene un material frente a un cambio de temperatura, es decir, frente al aumento o disminución de calor (energía).

Conductividad Térmica (λ). Es una forma de **medición**, para poder conocer la **capacidad** que tiene un **material** de **conducir calor** (DA & DAF, 1988). La conductividad térmica se puede medir en $W/(m \cdot K)$.

Resistividad Térmica (Rho). Es la capacidad que presenta un material a oponerse al flujo de energía, es decir, la resistencia térmica contra la conducción de calor (DA & DAF, 1988). Su magnitud inversa es la conductividad térmica, por lo que esta propiedad se puede medir en $(m \cdot K)/W$.

Calor específico (Cp). Es la capacidad de un cuerpo para almacenar calor. El calor específico es una propiedad intensiva, pues no depende de la cantidad de materia que posee un cuerpo. Nos permite conocer cuánta energía o calor se requiere para que un material cambie en una **unidad de temperatura**, una **unidad de masa** (DA & DAF, 1988). También se puede entender como la mayor o menor dificultad que presenta un cuerpo para experimentar cambios de temperatura bajo el suministro de calor.

La definición histórica de la caloría es, la cantidad de energía que se necesita para aumentar la temperatura de un gramo de agua, en un 1 °C. Una caloría equivale a 4.1868 J (Çengel et al., 2019), por lo tanto, se requiere de 4 186.8 J (1000 calorías) para aumentar a 1 kg de agua, 1 °C. El calor específico se puede medir en J/(kg·°C).

Calor específico volumétrico (VCp). Es el producto de la densidad del material, multiplicado por el calor específico (Cp). Esta propiedad depende de las mismas variables que el calor específico (Cp); sin embargo, la magnitud del calor específico volumétrico depende además de la cantidad de masa —al ser una propiedad extensiva—. La gran diferencia entre ambas es que la magnitud de **VCp** está dada por **unidad de volumen** (DA & DAF, 1988), mientras que la magnitud de **Cp** está dada por **unidad de masa**. El calor específico volumétrico se puede medir en MJ/(m³·K).

Difusividad térmica (D). Es un parámetro que indica la relación entre la capacidad de conducción de energía de un material, respecto al calor que puede almacenar. Es decir, es el valor que se obtiene al dividir la conductividad térmica (λ) de un material, entre el producto de su densidad (ρ) y calor específico (Cp) del mismo; o lo que es lo mismo: λ/Vcp (DA & DAF, 1988). Es un indicador que expresa velocidad de cambio y flujo de temperaturas en un material hasta alcanzar el equilibrio térmico. La difusividad térmica se puede medir en mm²/s.

2.2.5. Propiedades superficiales de los materiales

Constantemente recibimos radiación del contexto que nos rodea, a ésta característica de emisión de los cuerpos se le conoce como: **emisividad**. Por lo tanto, todo cuerpo se encuentra en una constante exposición a la radiación que proviene de todas direcciones (Ibarra-Salzar & Rojas-Pacheco, 2012). Cuando la radiación choca con la superficie de un material, una parte es absorbida, otra parte es reflejada, y la parte restante —si la hay— es transmitida a través del material.

p. | 53

Emisividad (ϵ). Llamada antiguamente emitancia, es la capacidad de la superficie de un objeto de emitir radiación. Una superficie ideal que emite radiación al 100% se le denomina **cuerpo negro**, en un cuerpo negro ideal, $\epsilon = 1$. A este fenómeno se le conoce como **radiación de cuerpo negro**. Por el contrario, en una superficie que no transmite radiación, $\epsilon = 0$. Por lo tanto, esta propiedad la emisividad es un valor que se encuentra en el rango de 0 a 1 (Incropera & De Witt, 1999).

Absortividad. Es el valor de energía de radiación que incide sobre una superficie que es absorbida por la misma (Incropera & De Witt, 1999). Al igual que la emisividad, su valor se encuentra en el rango de 0 a 1.

Reflectividad. Contrario a la absortividad, la reflectividad es el valor de energía de radiación que incide en una superficie, que es reflejada por el mismo (Incropera & De Witt, 1999). Su valor se encuentra en el rango de 0 a 1.

2.2.5. Análisis térmico de los materiales (métodos, normas y estándares)

Método de prueba estándar para medición de flujo de calor en régimen estacionario y propiedades de transmisión térmica mediante el aparato de placa caliente protegida. Este método se utiliza para el análisis térmico de materiales con conductividad térmica baja,

materiales comúnmente denominados como: aislantes (ASTM International, 2019; International Organization for Standardization, 1991). Requiere de un riguroso control en el área, espesor y densidad de los materiales, así como del ambiente del laboratorio. En algunos casos es posible que la prueba dure horas o hasta días hasta lograr un estado térmico estable.

- ASTM C177
- ISO 8302

(TPS⁴). Método para determinar la conductividad y difusividad térmica mediante una fuente de calor plana transitoria (disco-caliente).

- ISO 22007 (plásticos)
- GB/T 32064 (materiales constructivos)

(TLS⁵). Método para determinar la conductividad térmica mediante una fuente de línea transitoria (sonda de aguja).

- ASTM D5930 (plásticos)
- ASTM D5334 (suelos y rocas)

2.2.6. Análisis físico de los materiales (métodos, normas y estándares)

Método de prueba estándar para dimensiones físicas.

- ASTM D5947 (plásticos)

Método de prueba para determinar la densidad.

⁴ *Transient plane source method (hot-disk)* por sus siglas en Ingles

⁵ *Transient line source method* por sus siglas en Ingles

- ISO 1183 (plásticos)
- ASTM D792 (plásticos)

Método de prueba para determinar el porcentaje de humedad.

p. | 55

- ASTM D2216 (suelos y rocas)

2.3. PLÁSTICOS

De acuerdo con la clasificación de plásticos ampliamente reconocida creada por la Asociación de la Industria de Plásticos (PIA⁶) en 1988, el amplio inventario de termoplásticos creado hasta ahora se divide en siete clasificaciones:

- #1 Polietileno tereftalato (PET)
- #2 Polietileno de alta densidad (HDPE)
- #3 Policloruro de vinilo (PVC)
- #4 Polietileno de baja densidad (LDPE)
- #5 Polipropileno (PP)
- #6 Poliestireno (PS)
- #7 Otros (ej., acetato de polivinilo, poliuretano, policarbonato, etc.).

PET, LDPE, PVC, HDPE, PP, PS; estos y otros plásticos contribuyen al 80% del uso total de plásticos, que pertenecen a la categoría de termoplásticos. Mientras que el otro 20% pertenece a la categoría de termoendurecibles. Plásticos como Baquelita, Epoxi, Melamina, Poliéster, Poliuretano, etc. (Gulhane & Gulhane, 2017). La Figura 11 muestra las principales

⁶ *Plastic Industry Association* por sus siglas en inglés

aplicaciones de productos por tipo de plástico de acuerdo con la clasificación por parte de la Asociación de la Industria de Plásticos.

2.3.1. Desempeño termofísico del plástico

p. | 56

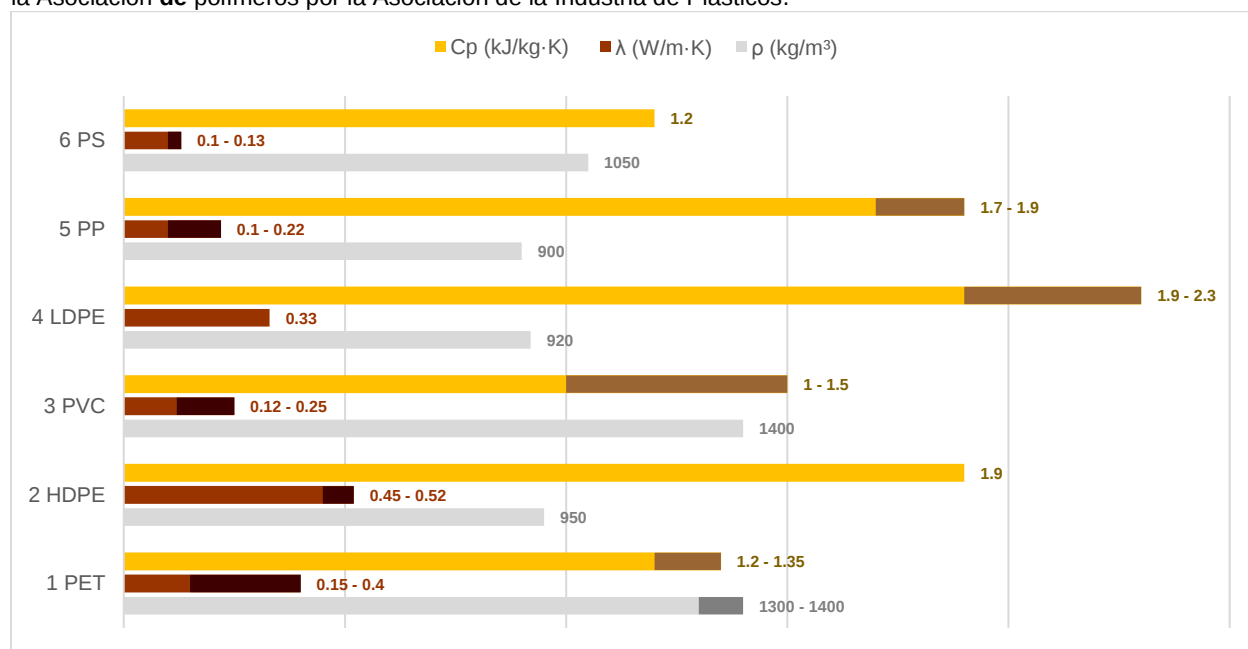
La Figura 11 presenta usos del plástico de acuerdo la clasificación emitida por la PIA. La Figura 12 muestra los rangos de densidad (ρ), calor específico (C_p) y conductividad térmica (λ) de los seis primeros termoplásticos de acuerdo con la clasificación de polímeros por la Asociación de la Industria de Plásticos.

Figura 11. Usos del plástico por clasificación

	PET – Tereftalato de polietileno Botellas de bebidas, agua, salsas y condimentos, envases de aceite, cosméticos y medicamentos.	
	PEAD – Polietileno de alta densidad Bolsas de compras, tuberías para agua, baldes, botellas de lácteos, botellas de shampoo, suavizantes y detergentes.	
	PVC – Policloruro de vinilo Tarjetas bancarias, lonas y carteles publicitarios, calzado deportivo, suelas de todo tipo de calzado, envoltura para golosinas, cables, hules y artículos para oficina. botellas	
	PEBD – Polietileno de baja densidad Bolsas para alimentos congelados, bolsas de compras, sacos industriales, cubetas para hielo, bolsas para suero y tapas flexibles.	
	PP – Polipropileno Vajilla reusable para microondas, elementos de cocina, contenedores para yogurt, mamilas, tapas en general, vasos no desechables y hieleras.	
	PS – Poliestireno Cajas para huevos, tazas, platos, bandejas y cubiertos desechables, envases de helado, ganchos para ropa, peines, cepillos y bolígrafos.	
	OTROS – Discos compactos, gabinetes de aparatos electrónicos, lentes de sol y recetados, lámparas para automóviles, teléfonos y juguetes. Policarbonatos, empleados en garrafas y biberones	

Nota. Adaptado de [Descripción de material correspondiente a cada número de clasificación y sus aplicaciones], por Asociación Nacional del Envase de PET, 2021, ANEP (<https://www.anep-pet.com/informes/bulos-sobre-el-pet-y-los-plasticos-razones/>)

Figura 12. Propiedades termofísicas de los seis principales termoplásticos de acuerdo a la clasificación por parte de la Asociación de polímeros por la Asociación de la Industria de Plásticos.



Nota. Adaptado de *Polímero – Propiedades Térmicas*, Goodfellow, s.f., Goodfellow (www.goodfellow.com/sp/)

Tomando en cuenta la conductividad térmica (λ) máxima, PS es el polímero que presenta la menor λ con 0.13 W/(m·K), seguido por PP y PVC con 0.22 y 0.25 W/(m·K), respectivamente. Sin embargo, de los tres termoplásticos mencionados anteriormente, PP presenta un mayor calor específico con un rango entre 1 700 y 1 900 kJ/(kg·K). La densidad del PP es de 900 kg/m³.

2.4. MÉTODOS DE RECICLAJE DE PLÁSTICO

2.4.1. Trituración

El proceso de trituración de plástico consiste en reducir el volumen de piezas de plástico al no pasar la prueba de calidad en la industria de producción de artículos de plástico, o toda vez que un residuo plástico es recuperado y enviado a reciclaje. Por medio de cuchillas, el plástico es triturado o molido en pequeñas partículas que dependen de la criba que se esté usando (diámetro de las perforaciones). Una vez triturado, el plástico pasa por diferentes procesos de limpieza —mismo que permite tener un material puro—, para poder ser reciclado mediante

procesos de producción de productos plásticos como **inyección**, **extrusión**, **compresión**, entre otros.

Figura 13. Polipropileno triturado en partículas $\leq 3/8"$ en el Centro de acopio Tierra Viva de la ciudad de Ensenada.



2.4.2. Inyección

El proceso de inyección es utilizado para fabricar y producir objetos mediante la inyección de materia prima fundida en un molde. El moldeo por inyección se puede realizar con una gran cantidad de materiales que incluyen principalmente metales, vidrios, elastómeros, dulces y, mayormente en polímeros termoplásticos y termoendurecibles. La materia prima es introducida en un barril con alta temperatura, para posteriormente ser inyectado en un molde, donde se enfría y se solidifica de acuerdo a la configuración del molde (Todd et al., 1994). La Figura 14 muestra un proceso de inyección manual para el reciclaje y donación de caretas de protección frente al COVID-19 realizado en mayo de 2020, proyecto en el que participaron estudiantes, docentes y egresados de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Para conocer más sobre la historia detrás de la donación de más de 1000 caretas de protección recicladas, la Figura 14

presenta un código QR en la parte inferior-derecha, mismo que conduce a un video informativo en *YouTube*.

Figura 14. Inyección manual de polipropileno para reciclaje de caretas de protección.



p. | 59

2.4.3. Compresión

El moldeo por compresión es uno de los métodos de procesamiento originales para la fabricación de piezas de plástico desarrollado al comienzo de la industria del plástico. De hecho, fue ampliamente utilizado en la industria de la panadería para moldear galletas o pasteles antes de que existieran los materiales plásticos. Aunque también es aplicable a los termoplásticos, el moldeo por compresión se usa comúnmente en la fabricación de piezas de plástico termoendurecibles. Las materias primas para el moldeo por compresión suelen estar en forma de gránulos, masas similares a masillas o preformas. Primero se colocan en una cavidad de molde abierta y calentada. Luego se cierra el molde y se aplica presión para forzar al material a llenar la cavidad. A menudo se utiliza un ariete hidráulico para producir suficiente fuerza durante

el proceso de moldeo. El calor y la presión se mantienen hasta que se cura el material plástico (efunda, n.d.). La Figura 15 muestra la máquina a compresión desarrollada por la comunidad de *Precious Plastic*, máquina semi-industrial para la producción de láminas de plástico reciclado.

Figura 15. Máquina a compresión semi-industrial de reciclaje de plástico.



Nota. Adaptado de [PRO MACHINES - Sheetpress], por Precious Plastic, 2020, Precious Plastic, (www.preciousplastic.com/solutions/machines/pro.html)

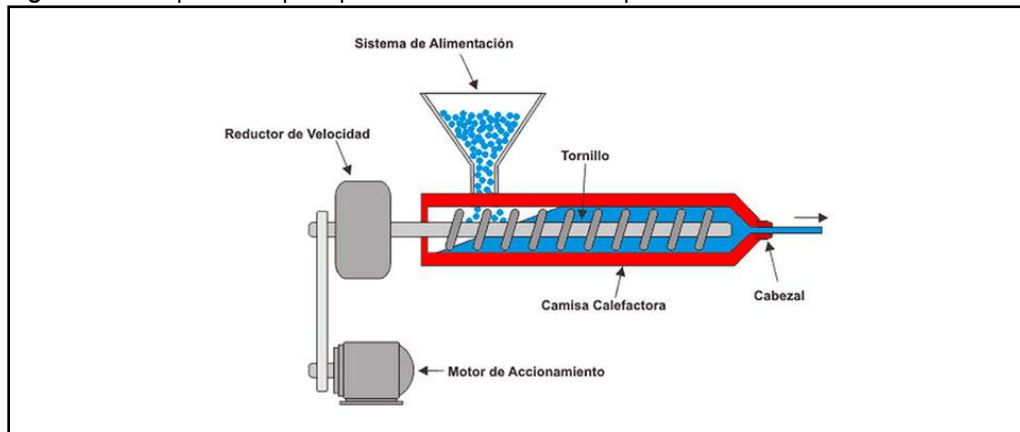
2.4.4. Extrusión

Este proceso comienza con la alimentación de material plástico (pellets, gránulos, o polvo), mismo que es depositado en una tolva y, que a su vez, es canalizado al barril de la extrusora. El polímero es fundido de manera gradual, gracias a la energía mecánica producto del movimiento rotatorio de tornillos y, por las resistencias térmicas que calientan el barril. Luego, el plástico fundido es forzado a pasar a través de un dado o cabezal, que da forma al plástico y, que es solidificado durante el proceso de enfriamiento (TEPPFA, n.d.).

La extrusión se puede dividir en procesos de una o dos etapas. En la extrusión de una sola etapa, la mezcla de materiales y la extrusión de perfiles se realizan en un solo paso, mientras que, en la extrusión de dos etapas, la combinación y la extrusión de perfiles siguen dos procesos

separados. Una extrusora está equipada con una tolva, un barril y un tornillo simple o doble. En la primera, las materias primas se cargan en la tolva y luego se introducen en la extrusora, ya sea como pellets pre-compuestos o materiales separados no compuestos (Gardner et al., 2015). En la segunda, la extrusora produce una mezcla de material homogénea y fácilmente modificable mediante fricción, presión y calor y empuja la mezcla a través de un dado-cabezal. Luego, el perfil producido se calibra, se enfría y se corta a una cierta longitud (Wagner et al., 2014).

Figura 16. Componentes principales de una extrusora de plástico



Nota. Adaptado de [Método de extrusión de plásticos, proceso], por Aristegui Maquinaria, 2020, Aristegui Maquinaria (<https://www.aristegui.info/metodo-de-extrusion-su-proceso-y-aplicacion/>)

2.5. COMPUESTOS PLÁSTICOS.

Hoy en día, los materiales se clasifican normalmente en cinco grupos principales: metales, cerámicos, polímeros, semi-conductores y compuestos. Los materiales compuestos están formados por dos o más materiales: un material **matriz** que transmite las tensiones mecánicas y un **relleno** que actúa como refuerzo para soportar las tensiones del compuesto (Horta et al., 2017). Los compuestos se clasifican según el tipo de matriz y la clasificación se presenta en tres categorías principales: orgánicos, minerales y metálicos. Además de la matriz, los compuestos están formulados con materiales secundarios como: rellenos, fibras (refuerzos) y aditivos (Hsissou et al., 2021). En los compuestos plásticos, la matriz puede ser termoplástica o

termoendurecible. La función de la matriz polimérica es entrelazar fibras y/o rellenos, proporcionando resistencia química a la estructura y dando la forma deseada al material (Arabpour et al., 2020; Zheng et al., 2019).

El **relleno**, es simplemente cualquier material adicional agregado a la matriz, su función es mejorar las propiedades mecánicas, térmicas o eléctricas del compuesto; además, los rellenos pueden reducir el precio del material compuesto (Sauer et al., 2013; Sijercic & Leung, 2016; P. R. Souza et al., 2020). Estos se pueden encontrar en: **Orgánicos** (celulosa, madera, cáscara de frutas, fibras vegetales, almidones), **Minerales** (carbonatos, sílice, talcos, dióxido de titanio, óxido de zinc y magnesio, alúmina, óxido de berilio, óxido de antimonio, hidróxido de aluminio y magnesio, negro de carbón y nanotubos), **Cargas metálicas** (aluminio, cobre, zinc, bronce) (Hsissou et al., 2021).

Los refuerzos (fibras) son un tipo de relleno que se enfoca en mejorar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos como la resistencia a la tracción y la rigidez; en lugar de ser partículas alargadas, se encuentran como fibras continuas tanto orgánicas como inorgánicas (Ahmadijokani et al., 2020; Yuan et al., 2013). Por último, se utilizan **aditivos** en baja concentración para mejorar el comportamiento reológico del compuesto en el proceso de producción. Con base en su efecto principal, estos se dividen comúnmente en lubricantes, plastificantes, estabilizadores, anti-choques, colorantes y pigmentos (Benhiba, Hsissou, et al., 2020; Benhiba, Serrar, et al., 2020; Hsissou et al., 2021; Lee et al., 2020; Rana et al., 2020).

Una revisión sistemática desarrollada en la Escuela de Ingeniería Amrita, Coimbatore en India, evaluó las tendencias en la utilización de compuestos de desechos plásticos como materiales de construcción. Los investigadores clasificaron los compuestos por tipo de relleno.

1. Hormigón y mortero, donde se utilizan polímeros como agregados y como agentes de unión

sustituyendo al cemento. 2. Tierra, arena y arcilla. 3. Residuos naturales (fibras de madera y otros residuos orgánicos). 4. Otros materiales (Mohan et al., 2021).

2.6. RESIDUOS Y OTROS MATERIALES.

p. | 63

De acuerdo al Banco Mundial, en 2015, México generó 53.1 Mt de residuos, la generación per cápita diaria se estimó en 1.2 kg (Kaza et al., 2018). Más de la mitad de los desechos generados, son residuos orgánicos producto de la pérdida y desperdicio de alimentos (Ojeda-Benitez & Saldaña-Durán, 2019).

Un estudio de generación de residuos sólidos urbanos de la ciudad de Ensenada, Baja California, estimó que la generación per cápita diaria se presenta en un rango de 0.779 ± 0.019 kg, con un intervalo de confianza de 98%. En el análisis de composición residuos, la mayor parte es conformada por desechos orgánicos con 36.25%, seguido por papel y cartón con 21.85%, y plástico con 12.30% (Taboada-gonzález et al., 2012). La Tabla 2 presenta la composición de residuos en diferentes regiones de México y el mundo.

Tabla 2. Composición de residuos en diferentes regiones de México y el mundo.

Ubicación	Residuo	Orgánico %	Papel %	Plástico %	Autor
Ensenada, México		36.3	21.9	12.3	Taboada-gonzález et al. (2012)
Guadalajara, México		40.7	10	9	Bernache-Pérez et al. (2001)
Morelia, México		50.6	7.6	7.7	Buenrostro Delgado (2001)
Chihuahua, México		48	16.1	11.9	Gómez et al. (2008)
Portugal		27.4	20.3	18	Gomes et al. (2008)
Missouri, USA		21	41	16	Zeng et al. (2005)
Chipre		39	24	5	Eleftheriou (2007)

Nota. Adaptado de “Seasonal analysis of the generation and composition of solid waste: Potential use - A case study”, por Taboada-gonzález et al., 2012, Environmental Monitoring and Assessment, 185 (6).

Se puede observar que, en la región norte y centro de México, el porcentaje de residuos orgánicos y plásticos se encuentra en un rango entre el 36.3-50.6% y 7.7-12.3%, respectivamente.

2.6.1. Borra de Café

La borra de café se encuentra entre los residuos más comunes en el mundo. Son residuos orgánicos sólidos, que se encuentran disponibles en cantidades considerables debido al uso masivo del café como una de las bebidas más consumidas a nivel mundial (Lachheb et al., 2019).

La reutilización de residuos de café en la industria de la construcción puede representar un desafío relevante. Se emplearon restos de café para producir nuevos materiales de construcción de geopolímeros (Mussatto et al., 2011). Para cumplir con los requisitos reglamentarios relacionados con el aislamiento térmico sin afectar la resistencia a la compresión de los ladrillos, se han realizado pruebas a compresión con diferentes porcentajes de borra de café. Se demostró que la adición de un 17% de residuos de café reduce la conductividad térmica hasta en un 50% (Velasco et al., 2016). Otro estudio realizó mezclas de cantidades mayores de café molido con arcilla. Los autores informaron que los ladrillos con 3 - 5 m%⁷ de café, son una alternativa prometedora con propiedades mecánicas, físicas y térmicas satisfactorias (Eliche-Quesada et al., 2011). Un estudio experimental evaluó el efecto en las propiedades térmicas del compuesto de yeso al agregar restos de café. Los resultados mostraron que la conductividad térmica del material de construcción resultante se puede reducir de 0.5 a 0.31 W/(m·K) añadiendo 6 m% de restos de café. Para ilustrar energéticamente y ambientalmente el beneficio de utilizar el material propuesto, se llevaron a cabo simulaciones anuales para una casa típica marroquí ubicada en Marrakech. Los resultados indicaron que hasta un 20% de las cargas de refrigeración y

⁷ Masa expresada en porcentaje, *percentage by weight* por sus siglas en inglés.

calefacción del edificio pueden reducirse si el material propuesto sustituye al convencional (Lachheb et al., 2019).

Este residuo puede presentar una densidad entre 308 y 399 kg/m³ (AMETEK Brookfield, 2018). Dependiendo del nivel de tostado, su densidad puede variar desde los 280 a los 430 kg/m³, con una densidad de partículas de 910 kg/m³ (Nakilcioğlu-Taş & Ötleş, 2019). Los valores de conductividad térmica, calor específico y densidad para los granos de café con un tostado grado 1, son de 0.112 W/(m·K), 0.905 kJ/(kg·K) y 368 kg/m³, respectivamente (Cardoso et al., 2018).

Figura 17. Borra de café al salir de una cafetera expreso.



2.6.2. Residuos de madera

La madera es un material natural y renovable que se ha utilizado en aplicaciones, como la **bioenergía** (Mardoyan & Braun, 2015; Pradhan et al., 2018), el **biorrefino** (Akim, 2016; Maroufi & Aşak, 2018) y **biochar**.

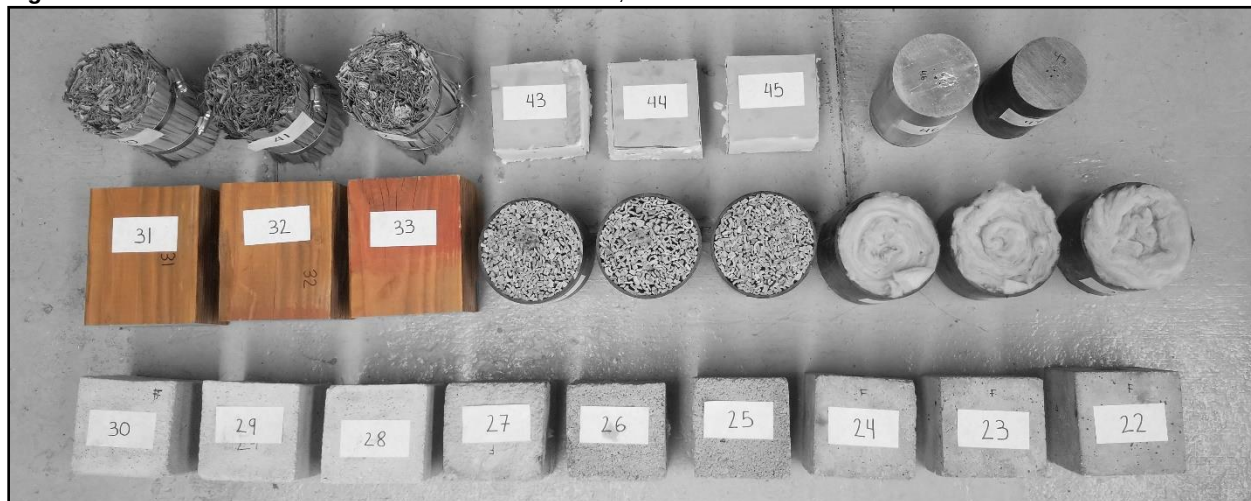
Los compuestos a base de madera con tecnologías de procesamiento simples y bajos requisitos energéticos y financieros son uno de los usos más importantes de la madera. Los compuestos de madera livianos con propiedades de aislamiento térmico y acústico tienen excelentes perspectivas de aplicación para su uso en envolventes de edificios (Qi et al., 2020).

Un estudio que probó con tableros de fibra de densidad ultra baja, obtuvo resultados de conductividad térmica baja y un coeficiente de reducción de sonido alto (Xie et al., 2011). Otros estudios han demostrado que la conductividad térmica disminuye con la densidad de los compuestos de fibra natural porque los gases tienen una conductividad térmica inferior y una transferencia de calor menor que los sólidos (Binici et al., 2012).

DOE-2.2, es un programa de análisis de costos y uso de energía para edificios financiado principalmente por el Departamento de Energía de los Estados Unidos. De acuerdo al reporte de propiedades termofísicas de materiales constructivos emitido en 2009, la madera natural se encuentra en un rango de conductividad térmica entre 0.115 y 0.121 W/(m·K), calor específico entre 837 y 1 381 kJ/(kg·K), y una densidad entre 513 y 721 kg/m³ (Lawrence Berkeley National Laboratory & James J. Hirsch & Associates, 2009).

Para poder comprar los datos del DOE-2.2, se realizó un ejercicio experimental en relación con la estructura procedimental de la norma ASTM D5930 para distintos materiales de construcción, con el propósito de hacer una comparación entre los valores de conductividad y calor específico de los materiales constructivos de la zona noroeste de México. Para evaluar las propiedades térmicas de cada material, se utilizó un método dinámico en régimen transitorio, a temperatura ambiente entre un rango de 14°C a 30°C. Una explicación detallada del método dinámico para la determinación de conductividad térmica se puede apreciar en 4.2.2. Método de análisis térmico (ver p. 145). La Figura 18 presenta el total de materiales que se evaluaron junto con la madera de pino.

Figura 18. Caracterización de materiales de construcción, zona noroeste de México.



p. | 67

Para la realización de experimento, se realizaron tres muestras de **madera de pino** de 8.5 x 12.4 x 15.1 cm. Los resultados mostraron que tanto la densidad, como las propiedades térmicas, se encontraron ligeramente por debajo que las presentadas por el DOE-2.2. La conductividad se presentó en un rango entre 0.093 y 0.104 W/(m·K), el calor específico volumétrico osciló entre 0.483 y 0.632 MJ/(m³·K). Por otro lado, la densidad fue de 462.46 - 477.09 kg/m³.

Figura 19. Análisis de propiedades térmicas de la madera de pino



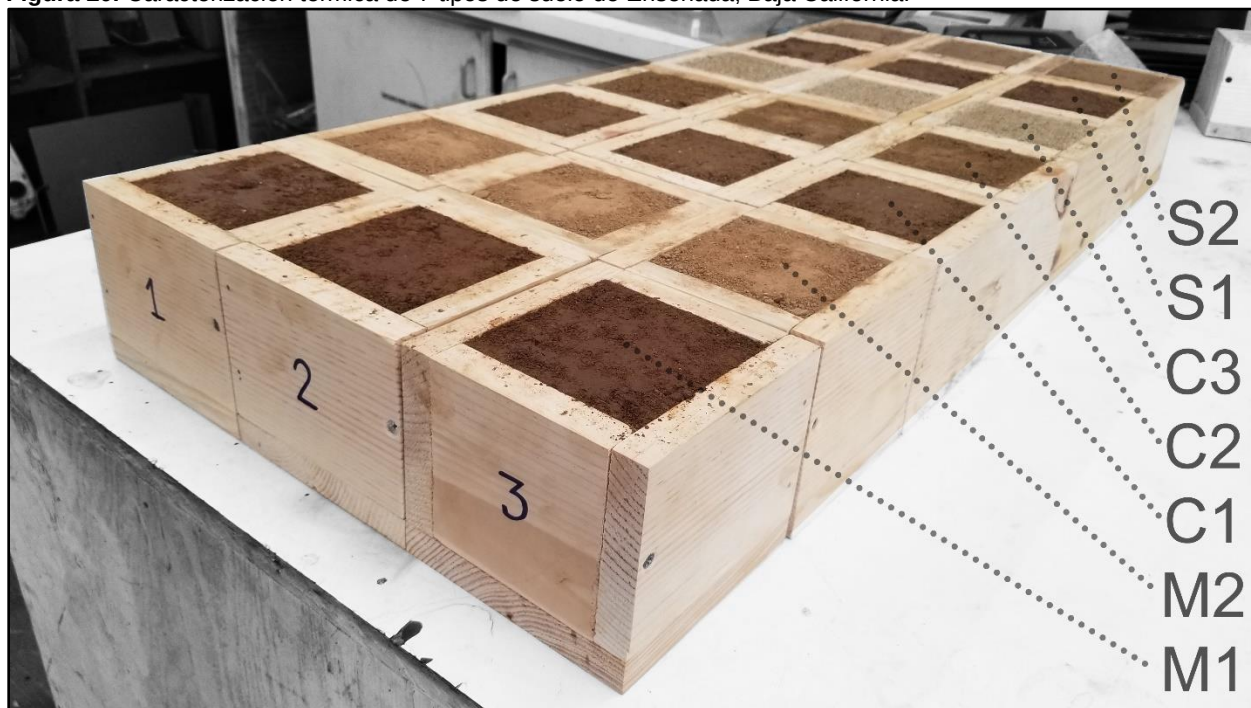
2.2.3. Suelo

El suelo es un material suelto y no consolidado en la corteza terrestre, y está formado por la meteorización de rocas sólidas (Puttaraj et al., 2014). El material de construcción a base de tierra se ha utilizado desde la antigüedad, pero últimamente se ha considerado principalmente con fines de restauración de la arquitectura tradicional en lugar de un material de construcción ecológico para nuevos edificios (Muñoz et al., 2020). Las economías de ingresos bajos y medianos muestran edificios históricos e incluso residenciales realizados con material a base de tierra (e.g. Perú, Chile y Colombia, entre otros) (Bestraten & Hormias, 2011; Zami & Lee, 2010).

Actualmente, se estima que el 30% de la población mundial vive en edificios de adobes (Williams et al., 2010). La tierra como material de construcción tiene buenas propiedades físicas cuando se considera un diseño ecológico y consciente de la energía, y también cumple con todos los requisitos de resistencia y capacidad de servicio para la transmitancia térmica (Ashour et al., 2015).

Se participó en una investigación encabezada por miembros del MyDAUD⁸, que consistió en ofrecer una **alternativa de acondicionamiento pasivo de bajo costo que permita mejorar la temperatura del aire interior de los espacios arquitectónicos en clima templado-seco de la ciudad de Ensenada, Baja California, a partir del aprovechamiento del potencial térmico del suelo**. Se analizaron siete tipos de suelos diferentes (ver Figura 20), provenientes de tres diferentes zonas de la ciudad, y a diferente profundidad. Estos suelos fueron: **Maneadero (M1, M2)**, Chapultepec (**C1, C2, C3**) y Sauzal (**S1, S2**). La letra corresponde a la zona, y el número a la profundidad, e.g. **S2** = Sauzal, 2 m de profundidad.

Figura 20. Caracterización térmica de 7 tipos de suelo de Ensenada, Baja California.



⁸ Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño de UABC

Para la realización de este estudio, se recurrió al método de Pozo a Cielo Abierto bajo la norma NMX-C-430-ONNCCEE-2002. Este método utilizado para estudios geotécnicos consiste en la excavación de un pozo lo bastante ancho y profundo, de tal manera que la inspección del estado natural de los diferentes estratos, pueda ser realizada directamente por un técnico. La Figura 21 muestra la excavación realizada en el predio ubicado en la zona Sauzal, así como un proceso preliminar de análisis térmico in-situ. Las dos muestras

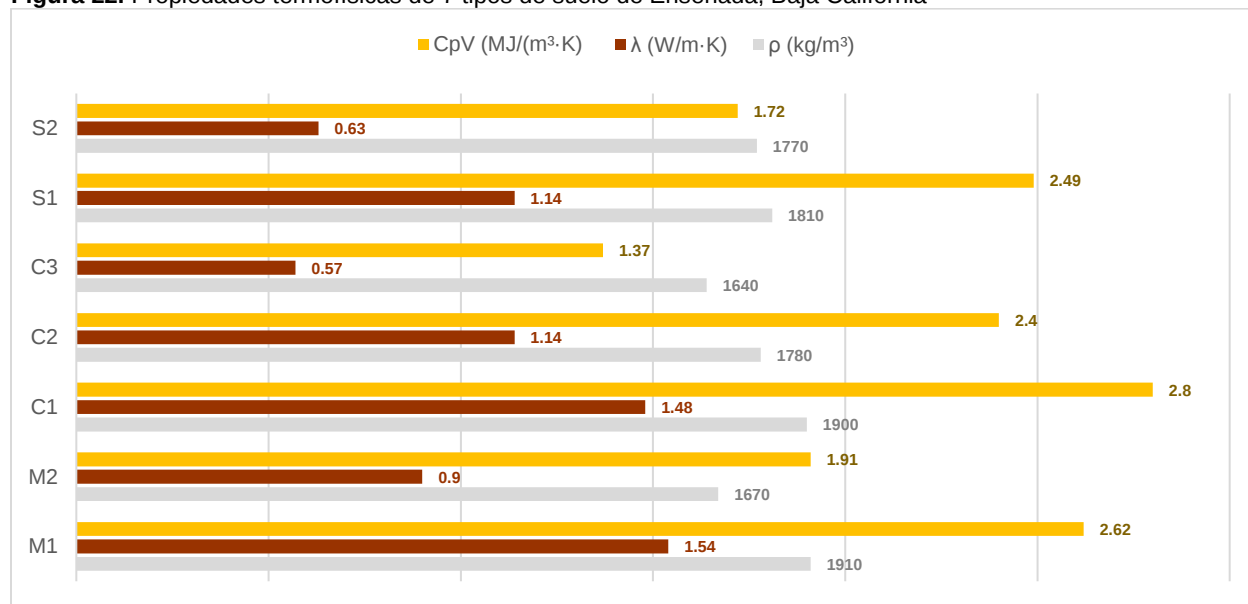
Figura 21. Análisis térmico in-situ (Sauzal, Ensenada)



obtenidas de este predio, así como las cinco muestras restantes fueron trasladadas herméticamente en bolsas de LDPE al laboratorio de ingeniería de la UABC.

Para el análisis termofísico, se elaboraron tres especímenes por tipo de suelo. Se elaboraron cubos de madera de pino de dimensiones internas de 10.2 ± 0.2 cm en cada uno de sus tres lados. Los cubos de madera sirvieron para contener las muestras de suelo, por lo que la cara superior de madera fue omitida. Los resultados de las pruebas termofísicas se pueden apreciar en la Figura 22.

Figura 22. Propiedades termofísicas de 7 tipos de suelo de Ensenada, Baja California



M1 y **C1** fueron los dos tipos de suelo que presentaron la mayor conductividad térmica (λ) y calor específico volumétrico (VCp), 1.54, 1.48 W/(m·K) y 2.62, 2.8 MJ/(m³·K), respectivamente. Ambos tipos de suelo se encontraron a una profundidad entre 0 y 1 m de profundidad. La densidad de **M1** y **C1** fueron prácticamente idénticas —1 907 y 1 899 kg/m³—. En contraste, **C3** y **S2** fueron los tipos de suelo que presentaron las menores propiedades térmicas, 0.57, 0.63 W/(m·K) y 1.37, 1.72 MJ/(m³·K), respectivamente. A diferencia de **M1** y **C1**, **C3** y **S2** si presentaron una ligera diferencia de densidades, **C3** con 1 640 kg/m³ y **S2** con 1 769 kg/m³. Es importante mencionar que la muestra **C3** se obtuvo a una profundidad de 3 m, mientras que **S2** a una profundidad de 2 m.

Pese a tener **C3** una conductividad 0.06 W/(m·K) menor con respecto a la λ de **S2** (0.63 W/(m·K)), la difusividad térmica —valor que se obtiene al dividir la conductividad térmica, entre el calor específico volumétrico (λ/V_{cp})— de **S2** fue menor a **C3**, 0.369 y 0.418 mm²/s, respectivamente. Una simulación en el software OPAQUE 3.0, permitido evaluar el retraso térmico (Δt) y decremento térmico (ΔT) de ambos sustratos. Los resultados fueron los siguientes. **C3**, Δt : -6.96 h, ΔT : 0.28. **S2**, Δt : -7.48 h, ΔT : 0.23.

El tipo de suelo ubicado en la zona Sauzal a 2 m de profundidad (**S2**), presentó un retraso térmico de 0.52 h mayor que **C3**. Asimismo, un factor de decremento 0.05 menor. Por lo anterior, el tipo de suelo **S2**, fue el que se seleccionó para la realización de muestras en el CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.

2.7. HIPÓTESIS

La literatura ha demostrado que el plástico ha tenido aplicaciones en diversas industrias, sustituyendo incluso materiales contemporáneos como la madera, el concreto y el acero. Por otra parte, debido a la **baja conductividad térmica** de los **polímeros** en comparación con los materiales actualmente empleados en la construcción de edificios, los residuos plásticos representan una alternativa en el desarrollo de nuevos materiales constructivos retardantes de calor, mismos que pueden contribuir a la **reducción del consumo de energía de los edificios**. En este sentido, el **polipropileno** es un termoplástico con **conductividad térmica baja**, y un **calor específico alto** en comparación con otros termoplásticos. A su vez, al ser un material maleable, tiene la capacidad de fungir como elemento aglutinante en la combinación con otro tipo de materiales y residuos, sumando hacia la perspectiva de generar nuevos materiales sostenibles. Con lo anterior podemos definir que:

La utilización del polipropileno como matriz termoplástica en un compuesto, permitirá desarrollar compuestos plásticos reciclando residuos y materiales, incrementando el retraso térmico (Δt), y reduciendo el decremento térmico (ΔT), con respecto a los de los materiales constructivos contemporáneos.

CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE

La revisión de la literatura de los últimos años muestra diversas facetas del plástico como materia prima reciclada aplicable en los edificios; además, nos permite reconocer cómo se está desarrollando este material en distintas zonas geográficas, así como responder a las preguntas: ¿Con qué tipos de residuos plásticos se está experimentado?, ¿Qué procedimientos de reciclaje se están empleando?, ¿Qué instrumental se está usando para analizar las propiedades térmicas y bajo qué normas/estándares?, y, sobre todo, ¿En qué se están aplicando estos materiales o en qué se podrían aplicar?

p. | 72

Se desarrolló una revisión sistemática basada en la guía '*Collaboration for Environmental Evidence's guidelines*' (Collaboration for Environmental Evidence, 2013). Una vez establecida la pregunta de revisión:

"¿Qué **residuos**, **subproductos** y **otros** tipos de **desechos**, en combinación con un **polímero matriz** reciclado, pueden desarrollar un **material de construcción sostenible** en términos de **eficiencia energética**? y, ¿Cuáles son sus propiedades termomecánicas?"

La recopilación de artículos se obtuvo a través de la base de datos científica Scopus. "thermal properties"; "mechanical properties"; recycled plastics; "building materials", fueron las cuatro palabras clave principales utilizadas en combinación con el operador "AND" para el proceso heurístico. Luego de una exhaustiva filtración en la que se descartaron cientos de artículos por no reunir las características necesarias para ser exploradas en esta revisión, se analizaron un total de 60 artículos originales revisados por pares en los que se extrajeron los siguientes elementos.

- Año, autores, título del manuscrito.
- Área de estudio, tanto región como país (ej., América Latina, México).

- Materiales (matriz, relleno y aditivos).
- Porcentaje de materiales y dimensiones de las muestras.
- Técnica de reciclaje o técnica de elaboración especímenes.
- Método de análisis térmico.
- Estándar, norma, guía, etc.
- Propiedades físicas (ρ : densidad).
- Propiedades térmicas (λ : conductividad, C_p : calor específico).
- Propiedades mecánicas (CS: resistencia a la compresión, FS: resistencia a la flexión, TS: resistencia a la tensión).

El 97% de los 60 artículos analizados se publicaron entre 2014 y 2020 en diferentes ubicaciones geográficas. Con respecto al total de artículos inspeccionados, estos se organizaron y dividieron en siete regiones principales del mundo: África, Asia, Oriente Próximo, Europa, América Latina, América del Norte y Oceanía. La mayor parte de la literatura explorada (70%) procedía de Europa y Asia, 40% y el 30%, respectivamente. El resto de manuscritos pertenecen a las otras cinco regiones mencionadas, 30%. La Figura 24 presenta una visualización completa de los porcentajes por región (ver p. 110).

3.1. COMPUESTOS PLÁSTICOS

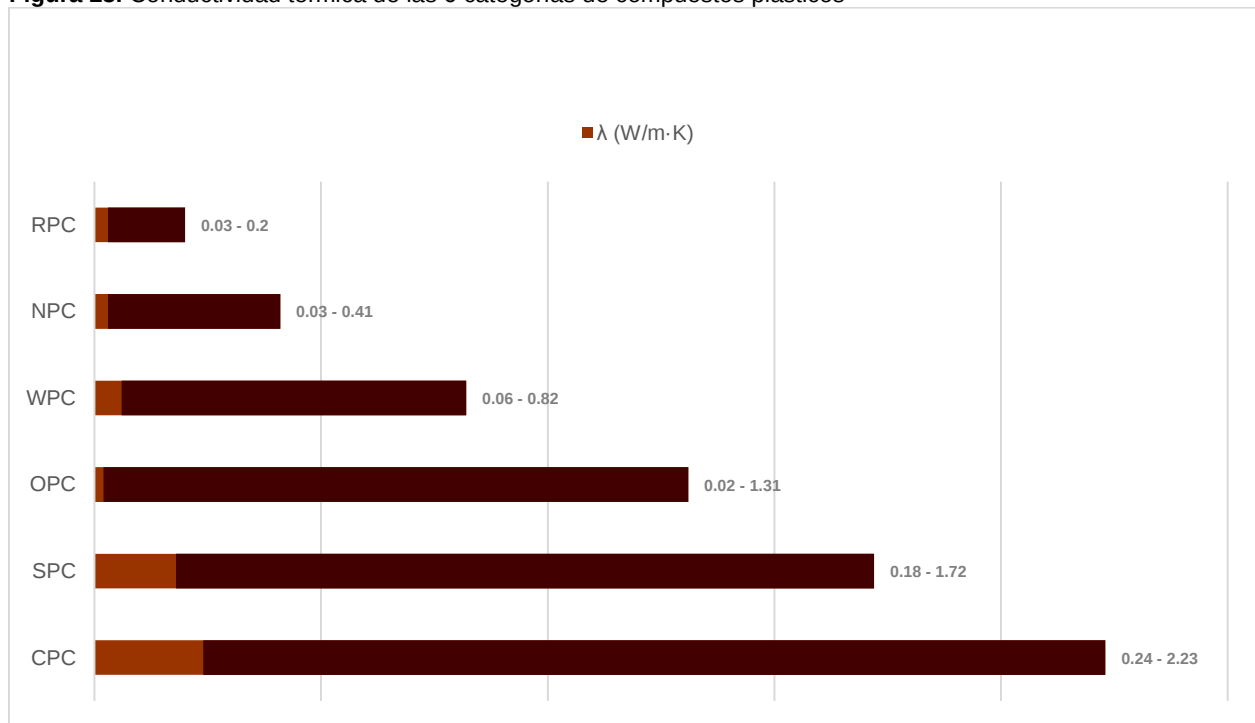
Como propósito de esta revisión sistemática, según el tipo de **relleno** y en función de los criterios de categorías de compuestos plásticos (Hsissou et al., 2021), y compuestos de residuos plásticos como materiales de construcción (Mohan et al., 2021), se clasificaron 89 compuestos plásticos en seis clasificaciones principales:

- Compuestos plásticos reciclados (RPC)
- Compuestos plásticos con residuos naturales (NPC)

- Compuestos de madera plástica (WPC)
- Compuestos plásticos con fibras y/o minerales (OPC)
- Compuestos plásticos con tierra (SPC)
- Compuestos plásticos cementosos (CPC).

La Figura 23 presenta el rango de **conductividad térmica** por **categoría** de la clasificación desarrollada a partir de los 89 compuestos plásticos encontrados en el total de las 60 investigaciones anteriormente mencionadas. Un análisis detallado por compuesto plástico en los que se proporcionaron **propiedades termofísicas** se puede apreciar en La Figura 26 y Figura 27. La conductividad térmica por compuesto fue el parámetro seleccionado para organizarlos de menor a mayor.

Figura 23. Conductividad térmica de las 6 categorías de compuestos plásticos



3.2. COMPUESTOS PLÁSTICOS RECICLADOS (RPC)

La clasificación RPC solo considera **termoendurecibles** y/o **termoplásticos** vírgenes o reciclados. No se contemplan en esta categoría **rellenos**, **fibras** o **aditivos**. Ésta es la categoría base y en todas las clasificaciones consecutivas, se considera como **matriz** a los polímeros ya mencionados.

p. | 75

3.2.1. [R01] Compuestos de residuos de PET y PU

Investigadores del departamento de ingeniería civil y medio ambiente de la Universidad de Teknologi Petrona en Malasia, crearon especímenes conformados por residuos de Polietileno Tereftalato (PET) y Poliuretano (PU) mediante un proceso de moldeo. Las diferentes pruebas fueron analizadas mecánica y térmicamente, esta última mediante el método de placa caliente guardada (TGHP), lo anterior conforme al estándar ASTM C177. Los resultados mostraron que los compuestos de PET-PU tienen un rango de conductividad térmica (λ) entre 0.15 a 0.2 W/(m·K), siendo la proporción 80/20 % m/m⁹ la de menor valor de λ . En una proporción 60/40 % m/m, se determinó que —conforme al análisis mecánico—, este compuesto podría ser utilizado como bloques en muros de mampostería no-estructurales, así como en muros divisorios (Alaloul et al., 2020).

3.2.2. [R03] Compuestos de PU, PET y retardante contra el fuego

Investigadores del Departamento de Producción, Construcción y Agroindustria de la Universidad del Sur de Santa Catarina en Brasil, realizaron especímenes con residuos de Polietileno Tereftalato (PET) en proporciones 30, 50 y 55 m%, un retardante al fuego —trihidrato de alúmina (ATH)— y dos de los componentes para la creación de poliuretano, polyether polyol

⁹ Masa concentrada de una solución expresado en porcentaje, *mass-to-mass* por sus siglas en inglés.

y toluene-2,6-diisocyanate. El esfuerzo a la compresión se presentó en el siguiente rango: 1-3 kg/cm². Los diversos compuestos con PU, ATH y PET en diferentes proporciones y tamaños de partícula cumplieron los requisitos relacionados con la resistencia mecánica a la compresión, el aislamiento térmico y acústico y la resistencia a la propagación de la llama, según los ensayos realizados. Cabe destacar que la fórmula que contiene 55% de PET, fue el compuesto recomendado para la preparación de paneles porque el PET tiene un mayor potencial de reciclaje, además de cumplir técnicamente con los requisitos de aislamiento térmico y acústico. Esto permite una reducción del 55% en la espuma de poliuretano para producir tableros para la industria de la construcción, lo que representa una alternativa técnicamente factible para reducir las materias primas de fuentes no renovables (Valdevino et al., 2018).

3.2.3. [R04] Compuestos de residuos de HDPE, LDPE y PP

En el este de Australia, investigadores de la Facultad de Salud, Ingeniería y Ciencias de la Universidad del Sur de Queensland, realizaron pruebas mecánicas a especímenes elaborados con diferentes residuos plásticos. El material se obtuvo a partir de residuos sólidos plásticos post-industriales y post-consumo que se componen de una mezcla patentada de HDPE, LDPE, PP que tiene un índice de fluidez en fusión de 3.1 y una densidad de 857 kg/m³. Los valores de resistencia a la tensión, compresión y flexión fueron de 151, 202 y 204 kg/cm², respectivamente. El coeficiente de variación de las propiedades medidas fue inferior al 10%, lo que indica que se pueden obtener propiedades consistentes de los residuos plásticos reciclados. Destaca que, las propiedades de resistencia obtenidas son comparables a las de la madera estructural de madera blanda (Muni et al., 2016).

3.2.4. [R06] Compuestos de caucho y látex

En la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato en Ecuador, investigadores realizaron pruebas mecánicas a compuestos de látex y caucho granulado. Los resultados de las muestras de esfuerzo a la tensión mostraron una resistencia en un rango entre 20-54 kg/cm². Por otro lado, conforme a la norma ecuatoriana NTE INEN 889, se obtuvo una compresión residual entre 18.8-30.66%. Se determinó que el material con características mecánicas óptimas fue la muestra con una composición volumétrica 60 m% de látex y 40 m% de granulado de caucho reciclado, con tensión máxima de tracción 54 kg/cm², y la menor compresión residual de 18.8% (Pérez et al., 2018).

p. | 77

3.3. COMPUESTOS PLÁSTICOS CON RESIDUOS NATURALES (NPC)

Las fibras naturales se pueden utilizar como rellenos de refuerzo en compuestos plásticos (Mohanty et al., 2005). Varios estudios han demostrado que, además de la madera, hay otras fibras que pueden utilizarse como refuerzo en polímeros; tal es el caso de la celulosa de molienda (Lahtela et al., 2017; Soucy et al., 2018), lodos primarios (Stoica et al., 2009), celulosa reciclada (Espert et al., 2003).

La categoría FPC considera todos los residuos naturales, excepto aquellos provenientes de la madera (salvo que el autor haya experimentado con madera y otros residuos naturales).

3.3.1. [N01] Compuestos de EPS y hoja de palma datilera

En otras latitudes, investigadores del Laboratorio de Ingeniería de Energía y Materiales en la Universidad de Biskra Argelia, crearon muestras utilizando restos de hoja trituradas de palma datilera como elemento de refuerzo, y poliestilero expandido (EPS) disuelto en gasolina —elemento aglutinador—. Los compuestos de hoja de palma datilera y EPS (LPC) con

proporciones 70/30, 75/25 y 80/20 % m/m presentaron un rango de densidad entre los 542-824 kg/m³, misma que es similar a la de los materiales compuestos convencionales como los tableros rígidos, aglomerado, MDF y, Plywood; sin embargo, el valor de λ de los LPC —mismo que oscila entre los 0.11 a 0.16 W/(m·K)—, es 50% mayor aislante en comparación los compuestos de madera reciclados (WW-EPS). El análisis térmico fue realizado mediante la técnica de fuente de plano transitorio (TPS), conforme al estándar ISO Standard 22007, y utilizando un disco-caliente TPS 1500 (Masri et al., 2018).

3.3.2. [N02] Compuestos de espuma de PU y cáscara de trigo

Por otra parte, investigadores del departamento de procesamiento de madera y biomateriales de la Universidad Checa de Ciencias de la Vida en Praga, hicieron pruebas con restos de espuma de poliuretano suave —proveniente de restos de colchones—y cáscara de trigo. La creación de especímenes involucro adhesivo NEOPUR M 2238 R, mismo que fungió como elemento aglutinador con una proporción de 20 m% en todas las muestras. Las cáscaras de trigo y los restos de poliuretano suave fueron mezclados y comprimidos por un día en proporciones 0/80, 20/60, 40/40, 60/20, 80/0 % m/m, con un rango de densidad de 50-150 kg/m³, un valor de λ 0.0418–0.0574 W/(m·K), y calor específico volumétrico (C_p) de 0.105-0.237 MJ/m³K. Las pruebas térmicas se realizaron mediante el método de fuente lineal de calor transitorio (TLS), utilizando una sonda de aguja Isomet 2104. Los resultados arrojaron que las propiedades térmicas fueron inferiores con la ausencia de cáscara de trigo, y conforme esta última iba aumentando en m%, asimismo lo hacían la densidad, λ y C_p (Hysek et al., 2019)

3.3.3. [N03, W15] Compuestos de HDPE y celulosa, tratados con agentes de unión

En Reino Unido, científicos del departamento de ingeniería civil y medio ambiente de la Universidad Brunel en Londres, realizaron pruebas con mecánicas a compuestos conformados por HDPE (52-55 m%), y residuos de papel (40 m%) o harina de madera (40 m%). Lubricante, iniciador y agentes de unión fueron añadidos en el porcentaje restante para incrementar el desempeño estructural. Los compuestos con papel (N03) mostraron una FS entre 102-245 kg/cm². Por el otro lado, los compuestos con harina de madera (W15) mostraron una FS entre 92-255 kg/cm². Ambos compuestos alcanzaron la máxima resistencia con la incorporación de agentes de unión. De acuerdo a los autores, ambos materiales cuentan con las propiedades necesarias para ser utilizados como *decks* o perfiles para cercas (Zhou, Stanchev, et al., 2019).

p. | 79

3.3.4. [N04] Compuestos de TDI, cáscara de arroz y corcho expandido

Miembros del Instituto de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Construcción, Energía, Medio Ambiente y Sostenibilidad en Coímbra Portugal, hicieron exhaustivas pruebas físicas a compuestos conformados por cáscara de arroz y corcho expandido (100/0, 75/25, 50/50, 25/75 %), y utilizando como elemento aglutinador un pre-polímero de poliuretano TDI¹⁰ en una proporción estimada del 20% de la masa total del compuesto. Los especímenes fueron realizados mediante un proceso de compresión térmica entre 180-200 °C. El análisis térmico fue utilizando el método TGHP bajo la norma ISO 8302, se realizaron especímenes con diferente densidad (200, 300, y 400 kg/m³), los valores de λ oscilaron entre 0.0481-0.0748 W/(m·K), el Cp entre 1.329-1.782 kJ/(kg·K). Conforme a las densidades, los valores de (CS) se presentaron de la siguiente manera: 200 kg/m³ = 0.63-1.77 kg/cm², 300 kg/m³ = 2.21-3.04 kg/cm², y 400 kg/m³ =

¹⁰ Diisocianato de tolueno, Toluene diisocyanate por sus siglas en inglés.

4.67-5.16 kg/cm². De acuerdo con los autores, la incorporación de corcho expandido en m%, contribuye a reducir la conductividad térmica y mejora las propiedades mecánicas (Marques et al., 2020).

3.3.5. [N05] Compuesto de PLA, retardante de llamas y restos de restos de fibra de lana

En China, científicos del Instituto de Textiles y Confección de la Universidad Politécnica de Hong Kong realizaron pruebas mecánicas y diversas pruebas térmicas como: Espectroscopía infrarroja por transformada de fourier (FTIR¹¹), índice de comportamiento frente al fuego (FPI¹²), e índice de crecimiento del fuego (FGI¹³). Los especímenes examinados, estuvieron compuestos por ácido poliláctico (PLA) en proporciones 77-100 m%, retardante de llama¹⁴ (0-3 m%), y restos de lana (0-20 m%). Los resultados obtenidos muestran que se lograron reducciones considerables en la tasa de liberación de calor, el calor total liberado, el CO y el CO₂ producido al añadir retardante de llama al 3 m%, así como distintas proporciones de fibra de lana. FPI y FGI mejoraron en un 38.2 y un 48.1% respectivamente. Asimismo, se observó una mejora significativa en el esfuerzo a la tensión (TS: 530-743 kg/cm²) y el módulo de Young con el aumento del contenido de lana (Tawiah et al., 2019).

3.3.6. [N06] Compuestos de RPUF, lodos de papel y TCPP

En Lituania, científicos del Instituto de Aislamiento Térmico de la Universidad Técnica de Vilna Gediminas, analizaron las propiedades físicas y mecánicas de compuestos conformados por lodos residuales de la producción de papel (0-20 m%), Polialcohol —aceite de pino, subproducto obtenido de la producción de pasta de papel— como espuma rígida de poliuretano

¹¹ Fourier transform infrared por sus siglas en inglés.

¹² Fire performance index por sus siglas en inglés.

¹³ Fire growth index por sus siglas en inglés.

¹⁴ phenylphosphonic 3(2-aminobenzothiazole)

(RPUF) y, el retardante de fuego TCPP¹⁵. La densidad obtenida osciló entre los 38.5-63.8 kg/m³, el valor de λ entre 0.0233-0.0275 W/(m·K), el método de análisis térmico implementado fue mediante el aparato de flujo de calor (HFM) con el instrumental *Linseis Heat Flow Meter* 200. Los resultados muestran que la utilización de lodos residuales de la producción de papel reduce la conductividad térmica en un 15% (Pundien, 2020).

3.3.7. [N07] Compuestos de EPS y polvo residual de piel de camello

Investigadores del Departamento de Ingeniería Mecánica de Universidad de los Emiratos Árabes Unidos realizaron muestras de poliestireno expandido (EPS) y polvo residual proveniente del pulido de la piel de camello. Las proporciones de este último polvo residual variaron entre 0 y 25 m%, las dimensiones de las muestras para las pruebas fueron de 110 x 110 x 3 mm —conductividad térmica— y 20Ø x 20 mm —resistencia a la compresión—. Los resultados fueron los siguientes: densidad: 525-575 kg/m³, λ : 0.044-0.056 W/(m·K), CS: 84-118 kg/cm², y FS: 107-301 kg/cm². Este estudio muestra que la adición de un 10 m% de piel de camello a los compuestos de EPS, reduce la conductividad térmica de las muestras en un 13%. Los investigadores concluyeron que los residuos del pulido de la piel de camello como relleno en las placas de aislamiento de poliestireno mejoran las propiedades de aislamiento térmico del material compuesto sin deteriorar las otras propiedades físicas —densidad— y mecánicas —resistencia a la flexión y compresión— (Hittini et al., 2019).

3.3.8. [N08, N09, N10] Compuestos de fibras naturales y resina epóxica

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Checa de Ciencias de la Vida de Praga, investigadores realizaron pruebas térmicas y mecánicas a compuestos de fibras de algodón, cáscara de bonote de coco, caña de azúcar, y utilizando como agente aglutinador: resina

¹⁵ Tris (1-chloro 2-propyl) phosphate

epóxica. Las muestras se hicieron con proporciones de 10, 15 y 20 m% para todas las fibras naturales, el porcentaje restante lo compuso la resina. Los resultados termomecánicos para los tres compuestos de fibras naturales fueron los siguientes: algodón (N08), λ : 0.373-0.421 W/(m·K), FS: 733-833 kg/cm². Cáscara de coco (N09), λ : 0.303-0.373 W/(m·K), FS: 298-407 kg/cm². Caña de azúcar (N10), λ : 0.342-0.414 W/(m·K), FS: 169-303 kg/cm². La resistencia al impacto, así como la resistencia a la flexión, aumenta al incrementar el contenido de fibra en todos los tipos de fibra celulósica porque la fase de fibra/refuerzo es el principal componente portador de carga en un sistema compuesto. Entre las muestras investigadas, los compuestos reforzados con fibra de algodón tienen la mayor resistencia a la flexión, seguidos por los compuestos de fibra de coco y caña de azúcar. Un aumento en el contenido de fibra disminuye la conductividad térmica y, por lo tanto, aumenta la resistencia térmica. Entre los tres tipos de fibras, los compuestos reforzados con fibra de algodón muestran una conductividad superior debido a una densidad de fibra mayor y una porosidad relativamente menor de las fibras de algodón en comparación con el coco y la caña de azúcar. Además, la porosidad en las fibras de coco es mayor debido al área del lumen general que es responsable de la menor conductividad térmica. Se encuentra que los materiales compuestos mejoran la difusividad térmica debido al refuerzo fibroso (Hassan et al., 2020).

3.3.9. [N11] Madera plástica con lana mineral reciclada

En Finlandia, científicos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Tecnología de Lappeenranta, realizaron pruebas mecánicas a compuestos de madera plástica y lana mineral reciclada. La resistencia a la flexión y tensión se presentó en un rango de 174-238, 87-175 kg/cm², respectivamente. El aumento de la cantidad de lana mineral reciclada en los compuestos tuvo efectos ligeros efectos negativos en la resistencia a la flexión, ya que los especímenes con 30 y 40 m% tuvieron resistencias a la flexión 24.9% y 26.7% inferiores que el compuesto sin lana, respectivamente. Asimismo, la adición de lana mineral disminuyó

considerablemente la resistencia a la tensión. Las pruebas con lana al 20, 30, 40 m% tuvieron un 21.4%, 50.4%, y 39.4% menor resistencia que las muestra sin lana mineral. Este material mejoró notablemente las propiedades de resistencia a la humedad de los compuestos, pero disminuyó algunas propiedades mecánicas. Si se puede mejorar la adhesión interfacial entre las fibras de lana mineral y la matriz de polipropileno, también se podrían mejorar las propiedades mecánicas. Esto podría lograrse mediante la adición de un agente de acoplamiento diferente o un tratamiento superficial de las fibras de lana mineral (Väntsi & Kärki, 2014).

3.3.10. [N12, N13, W04, W05, O19, O20] Compuestos de HDPE y residuos naturales y minerales

En éste estudio, se examinaron las propiedades mecánicas de compuestos con HDPE y subproductos de la industrial de la construcción, el papel y de una fábrica de revestimientos. Las muestras se realizaron utilizando en todos los casos HDPE al 50 m%, agente de unión MAPE al 3 m% y lubricante al 3 m%. El material de relleno comprendió un porcentaje del 44 m% siendo los residuos: lana de roca (HDPE/SWO), harina de roca (HDPE/SDU), lodos primarios de papel (HDPE/SLU), residuos de celulosa (HDPE/CEL), recubrimiento en polvo y harina de madera (HDPE/PCO+WFL), y por último, harina de madera (HDPE/WFL) como material de referencia. Los resultados de las pruebas físico-mecánicas fueron las siguientes: Lana de roca (O19), densidad: 1090 kg/m³, TS: 143 kg/cm². Harina de roca (O20), densidad: 1220 kg/m³, TS: 122 kg/cm². Lodos de papel (N12), densidad: 950 kg/m³, TS: 219 kg/cm². Celulosa (N13), densidad: 880 kg/m³, TS: 148 kg/cm². Recubrimiento en polvo + harina de madera (W04), densidad: 680 kg/m³, TS: 71 kg/cm². Harina de madera (W05), densidad: 960 kg/m³, TS: 219 kg/cm². Los materiales a base de roca no mejoraron las propiedades de tensión del compuesto. Los especímenes de la industria del papel difirieron entre sí. El lodo de papel fue el mejor de estos dos, ya que su resistencia a la tensión fue igual a la de referencia (HDPE/WFL). Las propiedades mecánicas del compuesto con recubrimiento en polvo fueron las inferiores de todos los

compuestos, sin embargo, la densidad del compuesto HDPE/PCO+WFL disminuyó claramente. Esta propiedad lo hace útil para aplicaciones donde se requiere una baja densidad del material. Según las propiedades probadas en este artículo, el compuesto con lodos de papel tiene propiedades prometedoras para su utilización como relleno polimérico, ya que fue el único de los compuestos fabricados que pueden competir con el material de referencia en cuanto a sus propiedades mecánicas (Keskisaari et al., 2019).

3.3.11. Compuestos de R-HDPE y residuos de café

Científicos del Instituto de Macromoléculas Profesora Eloisa Mano, de la Universidad Federal de Rio de Janeiro, realizaron pruebas mecánicas con polietileno de alta densidad reciclado (R-HDPE) y restos de café molido (COFD). La creación de especímenes para las pruebas se realizó mediante el método de extrusión. Las pruebas de esfuerzo a la compresión (CS) muestran que el compuesto R-HDPE/COFD con proporción 70/30 % m/m es similar a la resistencia obtenida de las muestras puras de R-HDPE. No se realizaron pruebas de conductividad térmica (Cestari et al., 2014).

3.3.12. Compuestos de fibras naturales y HDPE reciclado

En China, investigadores de la Escuela de Arquitectura Forestal y Paisajista, en la Universidad Agrícola de Anhui, realizaron muestras conformadas por HDPE (47, 37, 27 m%), fibras de madera poplar (50, 60, 70 m%), aserrín (50 m%), cáscara de arroz (50 m%), anhídrido maleico (1 m%), y tres tipos de lubricantes (2 m%). Se realizaron pruebas de temperatura de degradación térmica, temperatura de fusión, temperatura de cristalización, la cristalinidad y la viscosidad de compuestos de madera plástica (WPC) con fibra de madera fueron ligeramente superiores que las de los WPC con aserrín y cáscara de arroz. Por otra parte, la presencia de lubricante redujo la viscosidad y aumentó la pseudoplasticidad de los WPC, lo que es ventajoso

para la estabilidad dimensional de los WPC a baja temperatura, mientras que lo empeora a altas temperaturas (Li et al., 2019).

3.4. COMPUESTOS MADERA PLÁSTICA (WPC)

p. | 85

La categoría WPC considera los desechos de madera como refuerzo base (ej., harina de madera, aserrín, polvo de lijado de madera, etc.).

3.4.1. [W01] Compuestos de madera plástica con residuos de PE, PP y harina de madera

Investigadores del Laboratorio de compuestos de fibra de la Universidad de Tecnología de Lappeenranta en Finlandia, realizaron compuestos de madera plástica utilizando como materias primas mezclas de residuos plásticos (PE y PP), harina de madera, anhídrido maleico y lubricante, en proporciones 40/54/3/3. Las mezclas residuos plásticos se clasificaron manualmente de modo que solo se realizaron con PE y PP. El material consistía en plásticos de embalaje y no embalaje. Se clasificaron además de modo que contenía principalmente material de embalaje flexible, y una muestra de material duro que no era de embalaje (tuberías y muebles). Una muestra se produjo a partir de residuos plásticos mixtos municipales. Los resultados de las pruebas mecánicas se presentaron de la siguiente manera: FS: 107-194 kg/cm², y TS: 60-158 kg/cm². La presencia de Polipropileno podría reforzar la mezcla de PP y PE, y la resistencia del compuesto en general debido a las propiedades naturalmente fuertes (resistencia y módulo) del PP. Se demostró que las fibras de madera eran efectivas en la mejora del módulo y rigidez de los especímenes (Irina Turku et al., 2017).

3.4.2. [W02] Compuestos de madera plástica expuestos a pruebas de intemperismo acelerado

En otra investigación por parte de los científicos finlandeses, se realizaron pruebas mecánicas y de intemperismo acelerado a compuestos de madera plástica utilizando como materias primas mezclas de residuos plásticos (PE y PP), harina de madera, anhídrido maleico y lubricante, en proporciones 40/54/3/3. Las muestras compuestas se sometieron a la intemperie en condiciones estándar de ciclo de congelación-descongelación acelerada y luz de arco de xenón. Posterior a las pruebas de intemperismo acelerado, las propiedades mecánicas se presentaron de la siguiente manera: FS: 56-178 kg/cm², y TS: 57-155 kg/cm². Los resultados mostraron que los materiales compuestos tuvieron cambios significativos en sus propiedades de tensión y flexión. Se detectó que la resistencia a la flexión disminuyó en un 2-26% dependiendo el tipo de prueba/plástico. Sin embargo, la resistencia a la flexión de algunas muestras mejoró ligeramente. En general, el intemperismo acelerado tuvo un impacto mayor en las muestras hechas de desechos plásticos en comparación con una muestra hecha de material virgen. (Irina Turku et al., 2018).

p. | 86

3.4.3. [W03] Compuestos de madera huecos mediante tubos de PVC, rellenos de Polietilenglicol (PCM)

En China, científicos del Laboratorio de Ciencias e Ingeniería de la Madera de la Universidad Forestal de Beijing hicieron pruebas termofísicas a especímenes de fibras de madera poplar y tubos de PVC. Las muestras de 350 x 350 x 20 mm se realizaron mediante un prensado en caliente, en donde los tubos de PVC de 7 mm de diámetro exterior y un grosor de pared de 0.5 mm, quedaron ahogados entre las fibras de madera y posteriormente rellenos de un material de cambio de fase: polietilenglicol (PEG). La conductividad térmica se presentó en un rango de 0.06 a 0.07 W/(m·K) a una temperatura de 33 °C, y la adición de tubos huecos de

PVC y relleno de PEG solo afectó ligeramente la conductividad térmica. La densidad de las diferentes muestras osciló entre los 274 y los 308 kg/m³. Tanto los datos experimentales como los resultados de la simulación realizada por los investigadores mostraron que la adición de PEG disminuyó la temperatura de la superficie superior de las muestras cuando la superficie inferior se calentó continuamente. En comparación con el hormigón, el uso de este material como muro no estructural resultó en una temperatura interior inferior, lo que demuestra su potencial prometedor para su uso como material de construcción de aislamiento térmico y cambio de fase (Qi et al., 2020).

3.4.4. [W06] Compuestos de madera plástica reciclada con fibra de vidrio y nanoarcilla

En Corea del Sur, investigadores del Departamento de Productos Forestales y Biotecnología de la Universidad de Kookmin en Seúl, hicieron pruebas mecánicas a compuestos conformados por residuos de madera plástica (WPC) nanoarcillas y fibra de vidrio. Para el caso de este estudio, WPC consiste en harina de madera, polipropileno, polietileno, talco, estabilizador UV y otros materiales. La nanoarcilla incluía 50 m% de nanoarcilla, 25 m% de polipropileno y 25 m% de polipropileno injertado con anhídrido maleico. La fibra de vidrio contenía 50 m% de fibra de vidrio y 50 m% de polipropileno. Se hicieron 16 diferentes proporciones con los tres materiales anteriormente mencionados y se obtuvieron los siguientes resultados, el esfuerzo a la tensión se presentó en un rango entre los 296-377 kg/cm², mientras que el esfuerzo a la flexión lo fue entre 321-602 kg/cm². De acuerdo al análisis de las propiedades mecánicas, la incorporación simultánea de nanoarcilla y fibra de vidrio mejoró tanto la resistencia a la tensión como a la flexión (Birm-june et al., 2019).

3.4.5. [W07, R05] Madera plástica de LDPE y pino

En Brasil, científicos del Departamento de Ingeniería de Materiales de la Universidad de São Paulo, realizaron muestreo de madera plástica con LDPE y restos de madera de pino. Las muestras para ensayos de tensión se expusieron a diferentes tiempos de envejecimiento fotoquímico. Durante el envejecimiento, los conjuntos de muestras de prueba se retiraron del equipo después de 48, 168, 672, 1344 y 4032 horas para monitorear las propiedades del material mediante pruebas mecánicas. La resistencia a la tensión posterior a los diferentes tiempos de exposición fotoquímica fue para LDPE (R05) de 25-127 kg/cm², y para LDPE/pino (W07) en ratio 70:30 de 92-125 kg/cm². El compuesto LDPE/pino presentó una mayor resistencia a la exposición fotoquímica que la muestra sin fibra celulósica, mostrando que la presencia de fibras naturales de pino residual conduce a la estabilización de la matriz polimérica de LDPE (Moreno et al., 2018).

3.4.6. [W08] Bio-compuestos de madera y PLA

En el Instituto de Recursos Naturales de Finlandia, se realizaron pruebas térmicas y mecánicas de partículas de madera de Álamo temblón y Salix. Como matriz, se utilizó un biopolímero: ácido poliláctico (PLA). Proporciones tanto para el Álamo, como para el Salix, aglutinado con PLA fueron las siguientes: 10/90, 20/80, 30/70 y 40/60 % m/m. La densidad obtenida fue de 1220-1330 kg/m³, y el esfuerzo a la tensión (TS) de: 44-52 Mpa. Los resultados muestran que, al agregar partículas de madera, algunas propiedades mecánicas como TS y el esfuerzo a la flexión (FS) se reducen entre el 20 y 40%, sin embargo, la rigidez flexional incrementa desde un 50, hasta un 90%. Los autores concluyen que este compuesto es un potencial y excelente material para la producción de bio-compuestos (Kumar et al., 2020).

3.4.7. [W09] Compuestos de madera plástica y agentes de unión

En el Reino Unido, científicos del Departamento de Ingeniería Civil y Medio Ambiente de la Universidad Brunel en Londres, realizaron pruebas mecánicas a compuestos conformados por PE (40, 43 m%) y harina de madera (50 m%). El resto de porcentaje restante fue conformado por diferentes lubricantes (12-HSA, TPW 709) y agentes de unión (MAPE, Si69, VTMS). La resistencia a la tensión de las diferentes pruebas se presentó en un rango entre 54-127 kg/cm². La aplicación de MAPE, Si69 y VTMS condujo a un aumento significativo de la resistencia a la tensión de las muestras en un 135.40%, 15.63% y 77.40%, respectivamente (Zhou et al., 2017).

p. | 89

3.4.8. [W10] Compuestos de madera plástica y caucho de llantas

En otra investigación por parte de los científicos ingleses, se realizaron pruebas mecánicas a compuestos conformados por PE (40, 43 m%), harina de madera (30 m%), y residuos de caucho de llantas (20 m%). Distintos lubricantes (12-HSA, TPW 709) y agentes de unión (MAPE, Si69, VTMS) fueron añadidos en el porcentaje restante para incrementar el desempeño mecánico. La resistencia a la tensión de las diferentes pruebas se presentó en un rango entre 54-85 kg/cm². La adición de agentes de acoplamiento MAPE y VTMS condujo a un ligero incremento del 6.40% en la resistencia a la tensión, mientras que la adición de Si69 resultó en un aumento del 31.07% (Zhou, Wang, et al., 2019).

3.4.9. [W11] Madera plástica de HDPE, aserrín de pino y MAPE

En el Departamento de Química de la Universidad de Coimbra en Portugal, investigadores realizaron pruebas mecánicas a especímenes elaborados con aserrín de pino, HDPE y MAPE como agente de unión. Estos compuestos fueron diseñados específicamente para la producción de un sistema de sombreado innovador para aplicar en los edificios, lo que requiere una combinación adecuada de propiedades del material en cuanto a resistencia a las condiciones

climáticas, con el rendimiento mecánico y funcional del producto final. Las pruebas de resistencia a la tensión se presentaron en el rango de 202-291 kg/cm². Los resultados mostraron que los compuestos con mejores propiedades para la aplicación proyectada estaban hechos de 55% en masa de HDPE, 35% en masa de aserrín de pino y 10% en masa de MAPE. Esta proporción de componentes origina un compuesto que presentó suficiente resistencia mecánica —224 kg/cm²— para ser aplicado como unidad de persiana desde un sistema de sombreado. La alta resistencia mecánica se deriva del alto contenido de relleno y también de la buena adherencia interfacial, que fue causada por la adición del agente de acoplamiento (Martins et al., 2017).

3.4.10. [W12] Madera plástica de HDPE, aserrín de pino y Fusabond E265

En Portugal, científicos del Centro para el desarrollo rápido y sostenible de productos, realizaron muestras de madera plástica con aserrín de pino, HDPE y Fusabond E265 al 10 m% como agente de unión. El resultado de las pruebas de resistencia a la tensión mostró que tal cual se esperaba, la adición de residuos de madera y el agente de unión, incrementó esta propiedad mecánica en un rango de 189-235 kg/cm². Se pudo observar que los materiales obtenidos siguen las tendencias esperadas en la respuesta mecánica de los compuestos reforzados con partículas, pero el material polimérico base mostró una baja deformación plástica, lo cual fue inesperado, incluso para un material termoplástico reutilizado. Esto puede deberse a las condiciones de procesamiento. Sin embargo, la adición de aserrín al HDPE reciclado base junto con un agente compatibilizante ha demostrado mejorar la respuesta mecánica, especialmente en términos de módulo y, en menor medida, a la tensión máxima. Las condiciones de procesamiento, especialmente el proceso de moldeo por inyección, son de gran importancia para acceder al potencial de estos materiales de ser una ventaja competitiva para las industrias, y deben estudiarse a fondo (Horta et al., 2017).

3.4.11. [W13, W14] Madera plástica con PP posconsumo y textil

En la Facultad de Ciencias de la Universidad de Nueva Gales del Sur en Australia, científicos realizaron pruebas mecánicas a especímenes de madera plástica con residuos de PP posconsumo y textil. Las muestras de PP posconsumo (PPp) se fabricaron a partir de envases de alimentos, y las de PP de textiles (PPt) a partir de batas de laboratorio. Los especímenes se realizaron con la relación plástico-madera 40:60 sin el añadido de lubricantes y/o agentes de unión. Los resultados de las pruebas fueron los siguientes: PPp (W13), densidad: 750 kg/m³, FS: 102-133 kg/cm². PPt (W14), densidad: 600 kg/m³, FS: 127-224 kg/cm². Estos resultados sugieren que las muestras de madera-PPt obtuvieron mejores resultados en cuanto a rendimiento mecánico, posiblemente como consecuencia de los mecanismos de mayor ductilidad y flujo plástico, característicos de las fibras textiles de PP (Echeverria et al., 2020).

p. | 91

3.4.12. [W16] Compuestos de madera plástica y grafito (WPC)

Científicos de la Facultad de Materiales y Energía de la Universidad Agrícola del Sur de China, realizaron pruebas termomecánicas a compuestos de madera de poplar (50 m%), polietileno (27, 32, 37, 42, 47 m%), grafito (0, 5, 10, 15, 20 m%), y anhídrido maleico (3 m%). La creación de especímenes de 100 x 100 x 5 mm se realizó mediante el método de extrusión. La conductividad térmica se obtuvo mediante la técnica transitoria del hilo caliente y las propiedades mecánicas de acuerdo a la norma ASTM D638. Los resultados fueron los siguientes: λ : 0.34-0.82 W/(m·K), TS: 325-433 kg/cm², y FS: 532-684 kg/cm². De acuerdo con las conclusiones de los investigadores, la conductividad térmica incrementa significativamente con la incorporación de grafito, pero ésta disminuye con la temperatura. Asimismo, las propiedades mecánicas disminuyen ligeramente al aumentar el contenido de grafito (Zhang et al., 2018).

3.4.13. [W17] Tableros de madera, caucho y agentes de unión

En la Facultad de Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad Forestal de Beijing, científicos chinos realizaron pruebas de esfuerzo a la tensión a paneles de madera/caucho con proporción 60:40 y agentes de unión (PDMI 6 m%, UF 10 m%). El uso de PMDI es favorable en la producción de compuestos de caucho-madera resistentes en comparación con la resina UF convencional; sin embargo, el uso de PMDI es económicamente mayor que la resina UF convencional. El propósito de este estudio fue explorar la factibilidad de la utilización de PMDI en combinación con UF como agentes de unión para la manufactura de compuestos de caucho-madera. Se realizaron muestras con diferente densidad (800, 1000, y 1200 kg/m³), los valores de resistencia a la tensión se presentaron de la siguiente manera: 800 kg/m³ = 83-93 kg/cm², 1000 kg/m³ = 124-153 kg/cm², y 1200 kg/m³ = 139-156 kg/cm² (Jun et al., 2008).

p. | 92

3.4.14. [W18, W19] Compuestos con HDPE y madera (comparación de materias primas recicladas y vírgenes)

En Alemania, científicos del Instituto Thünen de Investigación de la Madera, realizaron pruebas físico-mecánicas a dos compuestos elaborados, uno con HDPE y pellets de madera (ambos vírgenes), y otra prueba más con ambos materiales reciclados. La densidad de ambas muestras se presentó en un rango entre 1050-1170 kg/m³. Por otra parte, las pruebas mecánicas tuvieron resultados similares, siendo las muestras con material virgen las que obtuvieron resistencias ligeramente superiores en comparación con las elaboradas con material reciclado, cuyos resultados se muestran a continuación: HDPE/madera V. (W18), FS: 259-434 kg/cm², y TS: 189-240 kg/cm². HDPE/madera R. (W19), FS: 256-311 kg/cm², y TS: 160-260 kg/cm². En general, la resistencia a la flexión aumenta al aumentar el contenido de madera. Por otro lado, la resistencia a la tensión de las muestras vírgenes y recicladas no fueron significativamente

diferentes. TS disminuyó al agregar un 30% de contenido de madera, y aumentó ligeramente al agregar un 60% de fibras naturales (Sommerhuber et al., 2015).

3.4.15. [W20, W21] Madera plástica con residuos de ABS y PS

p. | 93

En Alemania, científicos del Instituto Thünen de Investigación de la Madera realizaron pruebas mecánicas con residuos de PS y ABS de equipos eléctricos y electrónicos (WEEE), madera y SMA como agente de acoplamiento. Los resultados se muestran a continuación: PS/madera (W20), densidad: 1043-1247 kg/m³, FS: 406-594 kg/cm², y TS: 186-300 kg/cm². ABS/madera (W21), densidad: 1054-1257 kg/m³, FS: 668-874 kg/cm², y TS: 362-499 kg/cm². Los resultados de las propiedades físicas mostraron un aumento de densidad del 9-19%. Los resultados de las propiedades mecánicas mostraron un aumento lineal de la resistencia a la tensión y a la flexión al aumentar el contenido de madera. Por un lado, ABS/madera logró resultados satisfactorios sin la adición de SMA. Por otro lado, PS reforzado con madera y SMA si tuvo significativas mejoras mecánicas debido a una mejor unión interfacial del compuesto (Sommerhuber et al., 2019).

3.4.16. [W22] Madera plástica con aserrín de cedro, PET, HDPE y PP

En el Departamento de Ciencias Forestales y de la Madera de la Universidad Federal de Espírito Santo, investigadores realizaron pruebas termofísicas a compuestos elaborados con aserrín de cedro, aditivo de carbonato de calcio (CaCO₃), y residuos de PET, HDPE y PP. Los resultados de las pruebas se muestran a continuación. Densidad: 1050-1105 kg/m³, CS: 184-245 kg/cm², FS: 66-250 kg/cm². La investigación detectó un efecto directamente proporcional entre las proporciones adicionales del aditivo y las propiedades físicas de los especímenes, excepto por su densidad. Por el contrario, el efecto de las proporciones del aditivo fue inversamente proporcional a las propiedades mecánicas de las muestras. Los análisis estadísticos indican que

los termoplásticos tienen una influencia superior al 70% en las propiedades físicas y mecánicas de los compuestos, principalmente cuando se utilizan en proporciones superiores al 50%. Las proporciones con aserrín superiores al 50% tienden a disminuir la resistencia en relación con las propiedades físicas, y a su vez dan como resultado una baja resistencia mecánica. Además, los resultados indican que las mejores proporciones para mejorar las propiedades físicas (densidad: 1050,1105 kg/m³) y mecánicas (CS: 204,245 kg/cm², FS: 127,250 kg/cm²). del compuesto son: 40,45 m% de madera, 50,60 m% de termoplásticos reciclados y hasta 5 m% de aditivo químico (Martinez Lopez et al., 2019).

3.4.17. [W23] Madera plástica reciclada (RPL)

Científicos de la Universidad Nacional de Colombia, realizaron pruebas de comportamiento sísmico a compuestos de madera plástica. Dentro de las múltiples pruebas de carácter físico y estructural, los autores reportaron una densidad de 821 kg/m³, una resistencia a la compresión de 184 kg/cm² y una resistencia a la flexión de 197 kg/cm². La expectativa es que el uso del RPL como material estructural en el sector de la construcción aumente junto con los esfuerzos efectivos en investigación y desarrollo para mejorar su desempeño estructural (Herrera et al., 2018).

3.4.18. [W24, W25] Madera plástica reciclada expuestas a temperaturas extremas

En el Departamento de Ingeniería Básica de la Universidad de Missouri-Rolla en Estados Unidos, investigadores realizaron pruebas de esfuerzo a la compresión, flexión y tensión a compuestos de madera plástica reciclada. La densidad de las muestras se presentó en un rango entre 989 y 1026 kg/m³. Las pruebas mecánicas se realizaron exponiendo los especímenes a dos diferentes temperaturas, -23.3°C (W24) y 40.6°C (W25). Los resultados de las pruebas se

muestran a continuación: RPL (40.6°C), CS: 167-175 kg/cm², FS: 108-175 kg/cm², TS: 11-21 kg/cm². RPL (-23.3°C), CS: 376-400 kg/cm², FS: 343-434 kg/cm², TS: 38-107 kg/cm². La conclusión fue que la madera plástica es un buen material estructural, pero no es apropiado simplemente sustituir la madera plástica por piezas de madera de la misma dimensión en aplicaciones estructurales. (Carroll et al., 2001).

3.4.19. [W26, O18] Compuestos de HDPE con madera y fibra de vidrio

En el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad LUT en Finlandia, científicos realizaron pruebas físico-mecánicas a compuestos utilizando como matriz HDPE, y como relleno fibroso: madera y fibra de vidrio. Los resultados se presentaron de la siguiente manera: HDPE/madera (W26), densidad: 950-1050 kg/m³, TS: 70-177 kg/cm². HDPE/fibra de vidrio (O18), densidad: 1210-1240 kg/m³, TS: 80 kg/cm². La porosidad y el agrupamiento del material de relleno se identificaron como causas principales de variación en las propiedades mecánicas. Esta condición, se le atribuye a la falta de una mezcla en caliente previo al prensado de los especímenes. Esto, probablemente tuvo un efecto negativo en las propiedades mecánicas del compuesto final. Una previa mezcla en caliente habría mejorado la dispersión de los materiales de relleno en la matriz de HDPE (Sormunen, 2019).

3.5. COMPUESTOS PLÁSTICOS CON FIBRAS Y/O MINERALES (OPC)

Los materiales de base mineral como relleno en compuestos plásticos no están tan bien estudiados como los fabricados con fibras naturales (Keskisaari et al., 2019). Sin embargo, algunos estudios han demostrado su viabilidad. La lana mineral (Väntsi & Kärki, 2014) y la lana de roca (Cheng et al., 2011) se han utilizado como refuerzo en compuestos plásticos.

Por otro lado, hay nuevos materiales que todavía se encuentran en un nuevo campo de investigación, como es el caso de un residuo industrial: la pintura en polvo (A. M. Souza et al., 2018).

La categoría OPC considera todas las **fibras de refuerzo**, así como como todos los rellenos de **base mineral**, con excepción de la **tierra** y de **materiales cementosos**.

3.5.1. [O01, O02] Compuestos de LDPE, hexadecano (PCM) y megol

En Túnez, investigadores del laboratorio de materiales y aplicaciones multifuncionales de la Universidad de Sfax, realizaron pruebas con polietileno de baja densidad (LDPE) 15 m%, y variaciones de hexadecano —material con cambio de fase (PCM)— con estireno-etileno-butileno-estireno —conocido como megol— en proporciones 80/5, 75/10, 65/20, y 55/30 % m/m. La creación de los especímenes fue mediante la técnica de mezcla fundida, el análisis térmico fue mediante el método TGHP, y el instrumental que uso fue una placa-caliente TPS 2500S. Los valores de λ fueron los siguientes: sólido $T = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ (O01): 0.253–0.258 W/(m·K), y líquido $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ (O02): 0.241–0.254 W/(m·K). Para difusividad térmica: (sólido $T = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$) = 0.145-0.168 mm²/s, y (líquido $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$) = 0.137-0.158 mm²/s. De acuerdo con los autores, el valor de λ disminuye conforme el porcentaje de hexadecano aumenta, y cuando el compuesto se encuentra en estado líquido ($T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$). Por otra parte, el calor latente aumenta de 106.15 kJ/kg a 179.76 kJ/kg cuando el compuesto contiene 80 m% de hexadecano. En general, las propiedades térmicas se mejoran con la presencia del PCM utilizando en estas pruebas (Chriaa et al., 2020).

3.5.2. [O03, O04] LDPE lineal y grafeno funcionalizado (PCM)

En el Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Nacional de Tecnología de Karnataka en la India, investigador es realizaron pruebas de almacenamiento de energía materiales compuestos por LDPE lineal y un porcentaje de grafeno funcionalizado (1, 3, 5 %wt)

—material con cambio de fase (PCM)—. En general, el aumento en porcentaje de material de cambio de fase, incrementó la conductividad térmica y disminuyó el valor de CP. Sin embargo, esta misma condición mejoró la capacidad de almacenamiento de energía, siendo la fórmula con 3 m% de grafeno el material de mayor eficiencia. De acuerdo a los autores, quedó demostrado que los residuos plásticos se pueden manipular y se pueden utilizar para aplicaciones de almacenamiento de energía térmica como el almacenamiento térmico solar (Chavan et al., 2020). Asimismo, los autores analizaron densidad, conductividad térmica y calor específico de las mismas muestras en una previa investigación. Los resultados obtenidos son los siguientes: densidad: 928-929 kg/m³, λ (sólido, O03): 0.32-0.89 W/(m·K), λ (líquido, O04): 0.33-0.687 W/(m·K), Cp(sólido): 3.40-5.38 kJ/(kg·K), Cp(líquido): 2.39-3.24 kJ/(kg·K) (Chavan et al., 2019).

3.5.3. [O05, O06] Filamento de HDPE/PP y carbón activado (CAC)

Científicos del Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, Universidad Nacional de Tecnología de Taipei, realizaron pruebas mecánicas a filamento reciclado de HDPE y HDPE/PP utilizando carbón activado (CAC) como agente de relleno. Los resultados de las pruebas de esfuerzo a la tensión fueron los siguientes, HDPE+CAC (O05): 133-242 kg/cm², HDPE/PP+CAC (O06): 31-106 kg/cm². La adición de 2 a 8 m% de CAC a ambas muestras de polímeros dio como resultado una mejora significativa en la estabilidad térmica. Sin embargo, la incorporación de CAC como agente de relleno tiende a reducir la resistencia a la tensión y el módulo de Young de las muestras, incluso con un contenido menor del 5 m%. Comparando con los dos tipos de filamentos comúnmente usados en el mercado —filamentos PLA y ABS fabricados por Ultimaker— la muestra de HDPE+CAC con 8 m% tiene el mayor alargamiento de rotura, 60% superior que el filamento ABS Ultimaker, a expensas de una menor resistencia a la tracción (Chong et al., 2020).

3.5.4. [O07, O08] Compuesto de material de cambio de fase microencapsulado (MEPCM) y grafito expandido (EG)

En China, investigadores del Departamento de Ingeniería de Energía y Aire Acondicionado de Refrigeración, Universidad Nacional de Tecnología de Taipéi, realizaron pruebas térmicas a compuestos de microencapsulados de cambio de fase (MEPCM) y grafito expandido (EG). Para la creación de las pruebas, se utilizó MEPCM 28D y MEPCM 37D —siendo las temperaturas nominales de fusión de 28 y 37 °C, respectivamente—. El MEPCM es un polvo fino con un tamaño medio de partícula de 17 a 20 μm ¹⁶. Cada partícula consta de 85 a 90 m% de cera de parafina en el núcleo y de 10 a 15 m% de un polímero que sirve como coraza. La composición de EG consiste en 85 m% de carbono, 12 m% de ceniza y 2 a 3 m% de materia volátil. Las muestras se realizaron agregando un 10, 30 y 50 m% de GE al MEPCM. Los resultados de las muestras se muestran a continuación. MEPCM 28D (O07), λ : 0.22-0.51 W/(m·K), Cp: 18-25 kJ/(kg·K). MEPCM 37D (O08), λ : 0.22-0.35 W/(m·K), Cp: 22-35 kJ/(kg·K). La adición de EG reduce ligeramente el calor específico, al mismo tiempo que aumenta la conductividad térmica, esta condición se presenta de manera significativa en el MEPCM con un punto de fusión de 37 °C. Aunque el MEPCM 37D tiene un calor latente superior, almacenó menos energía ya que la temperatura de la pared es inferior que la temperatura final del cambio de fase (Chiu et al., 2018).

p. | 98

3.5.5. [O09, O10, R02] Paneles aislantes de aerogel de silicio

En el Instituto de Eficiencia Energética de Edificios de la Universidad de Guangzhou en China, científicos realizaron paneles aislantes de aerogel (AIP) e hicieron pruebas térmicas para compararlas con poliestireno expandido (EPS) y fieltro de vidrio (GF). Los AIP se prepararon

¹⁶ El micrómetro, micrón o micra es una unidad de longitud equivalente a una milésima parte de un milímetro.

mediante un proceso sol-gel catalizado por ácido/base de un solo paso y se secaron a presión atmosférica, para este proceso se utilizó como base silicio. Los resultados de los tres materiales aislantes fueron los siguientes: AIP (O09), densidad: 266.2 kg/m^3 , λ : $0.0208 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, C_p : $1.240 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$. EPS (R02), densidad: 20 kg/m^3 , λ : $0.0366 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, C_p : $2.134 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$. GF (O10), densidad: 119.7 kg/m^3 , λ : $0.0380 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, C_p : $1.290 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$. Las conductividades térmicas del EPS y GF son mayores que las del AIP, cuya conductividad térmica es de solo $0.0208 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Sin embargo, el calor específico del EPS es mayor que el de GF y AIP, mismos que oscilan entre 1.24 y $1.29 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$. Estos parámetros termofísicos medidos mostraron un porcentaje de diferencia por debajo del 3 % en comparación con los valores declarados por el fabricante. Con los valores presentados, y mediante un modelo numérico de simulación energética, los resultados mostraron que un muro con AIP tiene disminuciones de $\sim 20\%$ y $\sim 40\%$ en la amplitud de fluctuación de la temperatura interna y el flujo de calor, respectivamente, en comparación con muros con aislantes de EPS y GF (J. Yang et al., 2019).

3.5.6. [O11] HDPE reciclado con grafito (PCM)

En el Reino Unido, científicos del Centro de Almacenamiento de Energía de Birmingham de la Universidad de Birmingham, realizaron muestras de polietileno de alta densidad (HDPE) y grafito expandido (EG) como material de cambio de fase, las proporciones fueron 80, 85, 90, 95, 100 m% y 0, 5, 10, 15, 20 m%, respectivamente. Los resultados de las pruebas termomecánicas se muestran a continuación: λ : $0.51\text{-}1.31 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, C_p ($T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$): $0.98\text{-}1.98 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, CS: $102\text{-}173 \text{ kg/cm}^2$. La conductividad térmica del compuesto aumenta con el contenido de grafito. Cuando la cantidad de grafito es del 20%, el compuesto presenta una conductividad térmica a temperatura ambiente de $1.31 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, resultando en un incremento del 160% respecto al HDPE reciclado ($0.51 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$). Por otra parte, esta misma condición —la incorporación de EG al 20 m%— disminuye la resistencia a la compresión de 173 a 102 kg/cm^2 (C. Yang et al., 2016).

3.5.7. [O12, O13] Compuestos de Polipropileno reforzado con nanoplaquetas de grafeno

En la Escuela de Ingeniería Química, de Petróleo y Gas de Universidad de Ciencia y Tecnología de Irán, investigadores realizaron pruebas de conductividad térmica a especímenes realizados con polipropileno lineal y ramificado (93-100 m%), y utilizando como relleno de refuerzo un nanoplaquetas de grafeno (0-7 m%). La conductividad de las muestras se presentó en los siguientes rangos. PP ramificado (O12), λ : 0.145–0.405 W/(m·K). PP lineal (O13), λ : 0.175–0.250 W/(m·K). En comparación con PP lineal, la mayor conductividad térmica del PP ramificado puede explicarse por la presencia de largas cadenas laterales que pueden actuar como agentes reticulantes entre macromoléculas que facilitan el viaje de fonones y también el movimiento térmico de electrones. Como era de esperar, la incorporación de nanoplaquetas de grafeno condujo a un aumento de la conductividad térmica de los nanocompuestos (Ayorloo et al., 2019).

p. | 100

3.5.8. [O14, O15, O16, O17] Residuos de equipos eléctricos y electrónicos reforzados con grafito

En la universidad LUT de Finlandia, investigadores realizaron pruebas mecánicas de residuos de equipos eléctricos y electrónicos (WEEE). En este estudio se utilizaron cuatro tipos de plásticos de WEEE: ABS, poliestireno de alto impacto (HIPS), PC y PP. Los materiales se obtuvieron de los dispositivos electrónicos posconsumo. Las piezas de plástico de las máquinas de café eran fuentes de PP, las piezas de plástico del refrigerador eran la fuente de PC, las diferentes piezas de plástico de la computadora eran fuentes de ABS y HIPS. Las nuestras se realizaron mediante un proceso de inyección, y fueron reforzadas con grafito al 1, 3, y 5 m%. Los resultados fueron los siguientes: ABS (O14), densidad: 1060 kg/m³, FS: 398-418 kg/cm². HIPS (O15), densidad: 1005 kg/m³, FS: 332-344 kg/cm². PC (O16), densidad: 996 kg/m³, FS: 520-596 kg/cm². PP (O17), densidad: 796 kg/m³, FS: 326-333 kg/cm². La resistencia a la tensión aumentó

solo para PC cuando se aplicó el 5 m% de grafito. En todos los demás casos, la resistencia no cambió o disminuyó ligeramente al agregar grafito. Los resultados mostraron que las partículas de grafito no se dispersaron uniformemente en el polímero, en su mayoría permanecieron ligadas (I Turku & Kärki, 2019).

3.5.9. [O21, O22] Compuestos de lana y biopolímeros como agentes aglutinantes

En Italia, investigadores del Departamento de Ingeniería Civil y Ciencias de la Arquitectura del Politécnico de Bari, realizaron pruebas termofísicas a compuestos elaborados con residuos textiles de lana y dos diferentes biopolímeros: quitosano (O22) y goma arábica (O21). El análisis experimental de las propiedades térmicas evidenció que todas las muestras tienen conductividad comprendida entre 0.049 y 0.060 W/(m·K), independientemente del biopolímero utilizado. Como era de esperar, los valores de λ aumentaron linealmente con el aumento de la densidad de los materiales y la disminución de la porosidad del material. La densidad de las muestras se presentó en un rango entre los 80 y los 197 kg/m³ (Rubino et al., 2019).

3.6. COMPUESTOS PLÁSTICOS CON TIERRA (SPC)

Las botellas de plástico se han llenado con envoltorios de plástico para alimentos (Lenkiewicz & Webster, 2017) y arena (Mansour & Ali, 2015) para formar ladrillos ecológicos. Sin embargo, los termoplásticos también se han utilizado como relleno para mejorar la resistencia a la compresión y la capacidad de absorción de energía de los suelos (Consoli et al., 2002).

La categoría SPC consiste en un relleno a base de suelo como arena y arcilla.

3.6.1. [S01, S02] Ladrillos de arcilla con HDPE y PET como agregado aglutinante

En Marruecos, científicos del Laboratorio de Mecánica, Mecatrónica y Mando, Equipo de Energía Eléctrica, Mantenimiento e Innovación (ENSAM-Meknes), realizaron pruebas térmicas a dos tipos de ladrillos de arcilla, el primero con HDPE, y el segundo PET. El análisis térmico fue realizado mediante la técnica TPS, conforme al estándar ISO Standard 22007, y utilizando un disco-caliente HFM-100. Para los especímenes con HDPE (S01), los resultados fueron los siguientes: λ : 0.20-0.46 W/(m·K), C_p : 0.59-0.86 kJ/(kg·K). Especímenes con PET (S02), λ : 0.18-0.43 W/(m·K), C_p : 0.60-0.89 kJ/(kg·K). De acuerdo a los autores, los resultados prometedores en materia térmica fueron aquellos donde el aditivo (HDPE y PET), conformó una quinta parte de la fórmula (20 m%), en la que λ disminuyó 37% y 42%, respectivamente, con respecto a la muestra sin aditivo. El C_p por otra parte, aumentó un 48% y 53%, respectivamente (Limami et al., 2020).

p. | 102

3.6.2. [S03] Ladrillos de plástico y tierra

Científicos del Departamento de Ingeniería Civil del Colegio de Ingeniería de la India, desarrollaron ladrillos utilizando plástico de desecho (60-80 m%), suelo de laterita y betún de grado 60/70 (2-5 m%). A las muestras realizadas se les aplicaron ensayos mecánicos, obteniendo una resistencia a la compresión en un rango de 22-83 kg/cm². Los investigadores concluyeron que, con la adición de 2% en masa de betún y 70% en masa de PET, se obtuvo la mayor CS de ladrillos de suelo de plástico (Puttaraj et al., 2014).

3.6.3. [S04] Compuestos de botellas de PET y tierra

Un estudio realizado en el Departamento de Tecnología de la Universidad del Estado de Illinois en Estados Unidos, reveló que la mezcla y fundición de hojuelas de botellas de PET en un porcentaje de tierra (20/80, 25/75, 35/65, 45/55 y 50/50 % m/m), logra alcanzar una resistencia a la compresión (CS) similar a la del concreto. La densidad de los compuestos osciló entre los

1522-1786 kg/m³, mientras que la CS lo hizo entre 117-330 kg/cm². La máxima densidad y máxima CS, la obtuvo el espécimen PET-Tierra con proporción 25/75 % m/m (Solanki & Bhattarai, 2019).

3.6.4. [S05] Compuestos de LDPE y arena

Investigadores británicos del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental del Imperial College Londres en el Reino Unido, realizaron pruebas termofísicas y mecánicas a compuestos de polietileno de baja densidad y arena en una proporción 1:3. Se utilizó arena de sílice comercialmente disponible con una densidad de 2650 kg/m³. La arena fue previamente secada y se tamizó para dar cuatro fracciones de tamaño diferente con tamaños de partícula promedio de 0.25, 0.75 mm, 1.68 mm y 3.55 mm. El resultado de las pruebas fue el siguiente: densidad: 1765 kg/m³, λ : 1.72 W/(m·K), VCp: 2.0 MJ/m³·K, CS: 278 kg/cm². El uso de partículas de arena grandes disminuyó la resistencia a la compresión y su densidad. La adición de arena para lograr la máxima resistencia a la compresión fue de 75 m%. La resistencia a la compresión de la arena adherida con LDPE es comparable a la del concreto C20/25 y mayor que la del mortero cemento-arena. Este material tiene potencial para ser utilizado en tejas y tabiques (Jnr et al., 2018).

3.7. COMPUESTOS PLÁSTICOS CEMENTOSOS (CPC)

El hormigón es un material de construcción ampliamente utilizado. Los materiales básicos: arena, agua y cemento, hacen que este material tenga mayor resistencia y menor costo en comparación con el asfalto y la madera. No obstante, en comparación con los dos materiales anteriormente mencionados, el hormigón tiene una resistencia a la tracción significativamente menor (Y. Choi & Yuan, 2005; S. B. Kim et al., 2010). La resistencia a la tensión en el hormigón se puede mejorar mediante la implementación de fibras sintéticas (Y. Choi & Yuan, 2005; Hsie et al., 2008; Ochi et al., 2007; Pacheco-Torgal et al., 2012) tales como: neumáticos usados

(Sukontasukkul, 2009), residuos plásticos (Iucolano et al., 2013), botellas de PET (Y. W. Choi et al., 2005; Fraternali et al., 2013; J. H. J. Kim et al., 2008; Marzouk et al., 2007) y polipropileno reciclado (Fraternali et al., 2011).

La clasificación CPC considera todos los materiales cementosos tales como cenizas volantes, asfalto, betún, cemento, etc.

3.7.1. [C01, C02] Mortero cemento-escoria-arena con aerogel de sílice y caucho de llantas

Un investigador de la Escuela de Estudios Profesionales Avanzados de la Universidad de Beykent en Turquía, realizó pruebas termomecánicas a barras prismáticas de mortero con arena y como aglutinante cemento (50%) y escoria (50%). Se realizaron siete muestras, dos con aerogel de sílice (0.3 y 0.6% del porcentaje de aglutinante), cuatro muestras con restos de caucho de llantas (1.5 y 3% del porcentaje de aglutinante) y una séptima sin ninguno de los dos agregados anteriormente mencionados. Los resultados para los especímenes de cemento-escoria-arena-aerogel de sílice (C01) fueron los siguientes, FS: 86-87 kg/cm², CS: 329-345 kg/cm², λ : 1-1.29 W/(m·K). Para las pruebas de cemento-escoria-arena-caucho (C02), los resultados fueron los siguientes: FS: 75-79 kg/cm², CS: 296-306 kg/cm², λ : 0.89-1.13 W/(m·K). De acuerdo a los resultados presentados por el científico turco, utilizando como punto de partida la muestra sin sílice y caucho, la adición de 0.3% de aerogel de sílice y 3% de restos de caucho, reducen la conductividad térmica en un 25% y 33%, respectivamente. Sin embargo, reduce el esfuerzo a la compresión en un 1% y 14%, respectivamente (Bostanci, 2020).

3.7.2. [C03, C04, C05, C06] Concreto con agregados de HDPE, LDPE, PP y PET

En la Universidad Chulalongkorn en Tailandia, investigadores realizaron pruebas termomecánicas a muestras de concreto con agregados de cuatro diferentes termoplásticos. Se

utilizó una fórmula de cemento, arena y agua prácticamente constante en todas las muestras, mientras que los agregados de plástico en porcentaje de volumen fueron para HDPE (C03), LDPE (C04) y PP (C06) del 5, 10, 15, 20 y 30%. Para PET (C05), el porcentaje fue igual que los ya mencionados, agregando dos muestras más con el 40 y 50% del volumen. Los resultados de los especímenes de concreto con agregados de plástico obtenidos se muestran a continuación:

- HDPE, densidad menor: 1677 kg/m³, CS: 56-168 kg/cm², λ : 0.74-0.96 W/(m·K).
- LDPE, densidad menor: 1853 kg/m³, CS: 87-240 kg/cm², λ : 0.72-0.86 W/(m·K).
- PP, densidad menor: 1892 kg/m³, CS: 102-204 kg/cm², λ : 0.84-0.94 W/(m·K).
- PET, densidad menor: 1960 kg/m³, CS: 163-219 kg/cm², λ : 0.95-1.02 W/(m·K).

De acuerdo a las conclusiones de los autores, las mejores propiedades se obtuvieron al utilizar LDPE al 30% en porcentaje volumétrico. En este caso, la densidad registrada fue de 1911 kg/m³, y la conductividad térmica de 0.72 W/(m·K); sin embargo, para lograr la mínima resistencia a la compresión requerida en muros prefabricados no estructurales de acuerdo a las normas tailandesas —misma que es de 16 MPa—, el porcentaje de LDPE tendría que reducirse al 5% (Rachakornkij et al., 2018).

3.7.3. [C07] Compuestos PS, PC, cemento y ceniza volante

En otro contexto, investigadores de la Escuela de Emprendimiento en Ingeniería del Instituto de Tecnología Kharagpu en India, probaron mezclas de cemento (15 m%), cenizas volantes (15 m%), con residuos plásticos (0-10 m%) —PS, Policarbonato (PC) y mezclas de residuos plásticos), y el restante del porcentaje de arena (60-70 m%). Los especímenes se realizaron mediante mezcla y compactación manual con 25% de agua de la mezcla de materiales. Las muestras fueron térmicamente analizadas mediante el método TGHP. Los resultados obtenidos mostraron que al agregar 10 m% de plástico a la mezcla, la densidad se

redujo de 2060 a 1060 kg/m³, el valor de λ de 0.82 a 0.39 W/(m·K), y el esfuerzo a compresión (CS) de 336 a 177 kg/cm² (Mondal et al., 2019).

3.7.4. [C08] Mortero cemento-arena con PVC residual de cable eléctrico

p. | 106

En Italia, la Agencia Nacional de Nuevas Tecnologías realizó prueba termo-mercancías a especímenes de 29 x 29 x 4.5 mm (pruebas térmicas) y 160 x 40 x 40 mm (pruebas mecánicas). Se realizó una muestra como referencia con cemento, arena y agua, mientras que las otras cinco mezclas, indicadas como PVC10, PVC20, PVC30, PVC40 y PVC50, presentaron una sustitución volumétrica del agregado de sílice por PVC, respectivamente iguales al 10, 20, 30, 40 y 50%. Los resultados fueron los siguientes, densidad: 1650-1950 kg/m³, λ : 0.24-0.43 W/(m·K), CS: 92-224 kg/cm², y FS: 34-61 kg/cm². La muestra PVC50 —misma que presentó una sustitución volumétrica de arena del 50%— fue la que mostró las propiedades termofísicas y mecánicas inferiores con una densidad de 1650 kg/m³, λ : 0.24 W/(m·K), CS: 92 kg/cm², y FS: 34 kg/cm². Por lo que, en acuerdo a las conclusiones de los investigadores, los agregados plásticos reducen la densidad, provocando una disminución en la resistencia a la flexión y compresión de los morteros. Sin embargo, la presencia de agregado plástico conduce a una mejora significativa del aislamiento térmico (Cardinale et al., 2019).

3.7.5. [C09, C10] Concreto asfáltico de HDPE y PP

Científicos del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad King Fahd de Petróleo y Minerales de Arabia Saudita, realizaron especímenes con 78 m% asfalto y 22 m% de HDPE (C09) y PP (C10) reciclado. Dichos compuestos (HDPE/asfalto y PP/asfalto) fueron expuestos a pruebas físico-mecánicas y comparadas con pruebas de concreto con cemento portland y concreto asfáltico. Los resultados fueron los siguientes: HDPE/asfalto, densidad: 1400 kg/m³, CS: 105 kg/cm², FS: 33-69 kg/cm². PP/asfalto, densidad: 1650 kg/m³, CS: 310 kg/cm², FS:

122-184 kg/cm². HDPE/asfalto obtuvo una resistencia a la carga de compresión de magnitud similar a la de los concretos asfálticos. PP/asfalto obtuvo una resistencia a la compresión sorprendentemente alta (310 kg/cm²), cerca de tres veces la de los concretos asfálticos, y comparable con la resistencia obtenida por el concreto con cemento portland. En comparación con HDPE, el polipropileno fluyó con facilidad al alcanzar su punto de fusión, formando una matriz densa y continua alrededor del agregado asfáltico. Además, la resistencia del polímero PP puro, es mayor que la del HDPE puro (Dalhat & Wahhab, 2016).

3.7.6. [C11] Concreto ligero con poliestireno expandido (EPS)

En el Departamento de Ingeniería Civil, Ambiental, de la Construcción, Terrestre y Química del Politécnico de Bari en Italia, investigadores hicieron pruebas termomecánicas de concreto ligero con poliestireno expandido como agregado sustituto de la arena. Las muestras mostraron conductividades y difusividades térmicas inferiores que las referencias de arena. Este resultado se puede atribuir a la baja densidad de los agregados orgánicos. Específicamente, las conductividades térmicas de las muestras de EPS fueron ~80% inferiores que las de referencia. El mejor resultado se obtuvo en el caso de la probeta la muestra donde la arena fue sustituida al 100% por EPS (0.29 W/(m·K)) debido a la densidad inferior. La muestra con 50% arena y 50% EPS obtuvo una conductividad de 0.8 W/(m·K). El valor de λ se presentó en un rango de 0.8-2.23 W/(m·K). La densidad osciló entre 855-2020 kg/m³ y las resistencias mecánicas se presentaron de la siguiente manera: CS: 92-510 kg/cm², FS: 10-76 kg/cm². Estos compuestos ligeros termoaislantes se pueden utilizar en la industria de la construcción como componentes no estructurales, con referencia específica a aplicaciones en interiores (Petrella et al., 2020).

3.7.7. [C12] Compuestos de LDPE, cenizas volantes y retardante contra el fuego

En la India, investigadores del Grupo de Materiales Poliméricos y Blandos de la División de Materiales y Dispositivos Avanzados, realizaron pruebas contra el fuego y mecánicas a compuestos elaborados con bolsas de HDPE recicladas, cenizas volantes y retardante contra el fuego TPP. La densidad aparente de la muestra de baldosas aumenta ligeramente de 900 a 1000 kg/m³ cuando el contenido de cenizas volantes aumenta de 0 a 20 m%. La resistencia a la tensión aumentó significativamente de 54 a 110 kg/cm² conforme el porcentaje de cenizas volantes aumento. Además, con la adición de contenido de TPP en las muestras, la densidad y la resistencia a la tracción fue prácticamente la misma (Dhawan et al., 2019).

p. | 108

3.7.8. [C13] Concreto con plástico pulverizado y suelo de laterita

Investigadores del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Covenant en Nigeria, realizaron concretos elaborados con residuos plásticos pulverizados y un tipo de suelo rico en hierro y carente de sílice: laterita. En el laboratorio se produjeron muestras de especímenes utilizando cantidades variables de arena (30, 20, 10, 0 m%) y plástico pulverizado (35, 45, 55, 65 m%), con cantidades constantes de laterita (30 m%) y cemento (5 m%). Las pruebas mecánicas mostraron que los datos de las pruebas de flexión y compresión de 398 y 1611 kg/cm², respectivamente, fueron los mayores registros con una relación arena: plástico de 0:60. También se observó que existía una relación directa entre la cantidad de plástico utilizado y la resistencia de la pruebas producidas, lo que significa que, a medida que aumenta el contenido de plástico, aumentan las propiedades mecánicas (Kehinde et al., 2019).

3.7.9. [C14] Mortero con agregado arena/PET 3:1

En el Departamento de Ingeniería del Transporte de la Universidad de Shandong en China, investigadores realizaron morteros con betún, cenizas volantes, carbonato de calcio y

Arena/PET con relación 3:1. Los especímenes fueron expuestos a esfuerzos de compresión y flexión, obteniendo los siguientes resultados. CS: 313-358 kg/cm², FS: 64-80 kg/cm². La muestra con 15% de partículas finas tuvo la mayor resistencia a la compresión. Tanto el betún como las cenizas volantes aumentaron la resistencia a la flexión. A medida que el betún aumentó de 0% a 15%, la resistencia a la compresión se incrementó primero y luego se redujo. Sin embargo, para las cenizas volantes, la resistencia a la compresión aumentó a medida que el contenido cambiaba de 0% a 15%. A diferencia del betún y las cenizas volantes, el carbonato cálcico no tuvo un efecto significativo sobre la resistencia (Ge et al., 2014).

3.7.10. [C15] Mortero de cemento y caucho granulado

En la India, investigadores del Departamento de Civil del Colegio de Ingeniería Malla Reddy, realizaron pruebas de esfuerzo a la compresión con morteros de cemento y residuos de caucho granulado proveniente de llantas en desuso. La resistencia obtenida se presentó en un rango de 32-149 kg/cm². La resistencia a la compresión del ladrillo de caucho desmenuzado con un 40% de reemplazo de agregado fino por caucho granulado es de 149 kg/cm². Es similar a la resistencia del ladrillo de cemento convencional (182 kg/cm²) el día 28 (Krishna & Reddy, 2018).

3.7.11. [C16] Mortero cemento-arena con HDPE como agregado sustituto

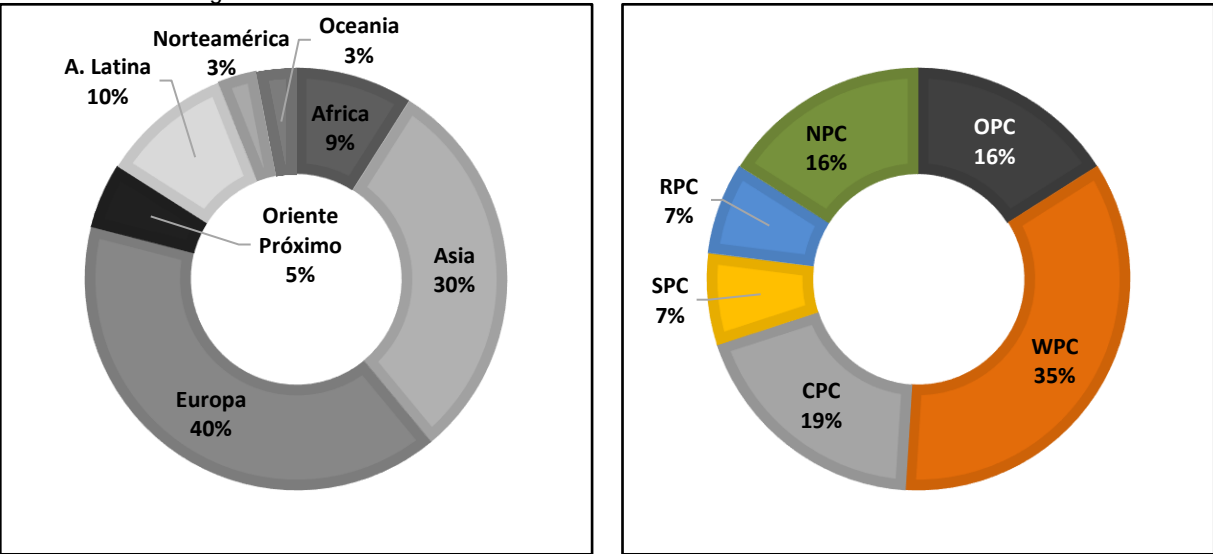
Investigadores del Departamento de Ingeniería Civil del Laboratorio LABMAT en Argelia, realizaron exhaustivas pruebas de carácter mecánico y térmico a especímenes de cemento-arena en los que un porcentaje de arena fue sustituido por HDPE (15, 30, 45, 60 %). La densidad de la muestra cemento-arena fue de 2100 kg/m³, mientras que la muestra que sustituyó un 60% de arena por HDPE fue de 1577 kg/m³. Los resultados de las pruebas mecánicas fueron los siguientes, FS: 20-51 kg/cm², CS: 163-428 kg/cm². Para las pruebas térmicas los resultados

fueron los siguientes: λ : 1-2 W/(m·K), VCp: 1.7-2.05 MJ/m³K. En conclusión, los autores definen que la sustitución del 60% de arena por HDPE reduce la masa un 25%, pero esta misma sustitución reduce el esfuerzo a la compresión un 38%. Por otra parte, esta sustitución, proporciona una desviación de hasta un 41% en la conductividad térmica, con respecto a la muestra cemento-arena (Badache et al., 2018).

3.8. ANÁLISIS CONTEXTUAL DE COMPUESTOS

Tanto los compuestos de madera, como los residuos naturales, representan más de la mitad de los 60 artículos analizados, 35% y 16%, respectivamente. Al mismo tiempo, más de la mitad de ambos compuestos tienen como procedencia la región europea. Esto último no es ninguna sorpresa, ya que Europa es el tercer mayor productor de madera plástica (Carus et al., 2015). Asia fue la región donde los compuestos cementosos y los compuestos con otros residuos tuvieron la mayor influencia relacionada con la literatura explorada, 19% y 16%, respectivamente. Los compuestos plásticos con tierra, y los compuestos plásticos reciclados, representan el 7% cada uno. La Figura 24 muestra una visualización completa de los porcentajes por composición.

Figura 24. (izquierda), porcentajes por región del total de 60 investigaciones; (derecha), porcentajes por compuesto del total de 60 investigaciones.



3.8.1. Métodos de elaboración de muestras.

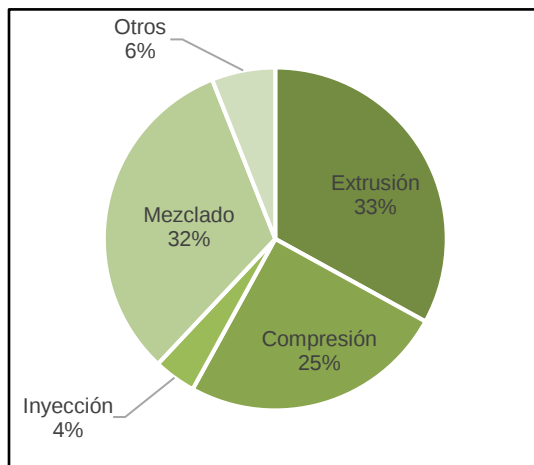
El **especímen** fue la unidad de análisis en cada uno de los estudios presentados en este capítulo. El **número y dimensiones** de los especímenes está directamente relacionado con el tipo de análisis que se realizó (térmico, físico y/o mecánico), pero también tiene su razón de ser debido al **estándar, guía o normativa** en la que se rige.

p. | 111

Toda vez que se tiene bien claro los materiales que se utilizarán, así como el o los análisis que se pretenden realizar, el investigador debe definir el método de realización de los especímenes. Se realizó una exploración de los diferentes métodos de producción y/o reciclaje que utilizaron los autores en sus diferentes investigaciones teniendo mayor presencia los siguientes: extrusión, prensado o compresión, inyección y mezcla manual en caliente o frío. La Figura 25 muestra el porcentaje por método de fabricación de especímenes utilizado en los 60 artículos explorados en este capítulo de **Estado del arte**.

Con 33%, el método de extrusión fue el proceso de fabricación de los compuestos plásticos de mayor presencia (ver Figura 25), pues, como menciona Petri Sormunen en 2019 — quien utilizó el método de compresión en caliente para la elaboración de sus muestras—, **la porosidad y el agrupamiento del material de relleno en un compuesto plástico pueden ser causa en la variación de los resultados de los análisis**. Esta condición se le puede atribuir a la falta de una mezcla en caliente previo al prensado de especímenes (Sormunen, 2019). Como se explica en la sección 2.4.4. Extrusión (p. 60), el método de extrusión somete a los materiales a una temperatura programada, al mismo tiempo que es transportada por uno o dos tornillos giratorios, esto con el objetivo

Figura 25. Porcentaje por método de fabricación de especímenes del total de 60 investigaciones.



de lograr que tanto la matriz (el polímero) y el material de relleno se mezclen lo mejor posible logrando un material homogéneo. A continuación, se muestra la tabla de aquellas investigaciones que reportaron la temperatura a la que sometieron los materiales en el cañón de la extrusora, así como las revoluciones por minuto (RPM) a la que estuvo girando el tornillo del extrusor.

Tabla 3. *Parámetros de temperatura y RPM utilizados en el método de extrusión de compuestos plásticos de la literatura explorada.*

Código	Materiales	RPM	TEMP (°C)	Autor
C12	LDPE / Ceniza volante	120	110-180	Dhawan et al. (2019)
N11	HDPE	25	178-220	Cestari et al. (2014)
N12	PP / Fibra de lana / Lana mineral	13	185	Väntsi & Kärki (2014)
O19-20, N13-14, W04-05	Lana de roca / Polvo de roca / Lodo primario / Celulosa / Pintura en polvo + madera / Harina de madera / HDPE	16-24	144-176	Keskisaari et al. (2019)
R04	PP+ HDPE + LDPE	87	170	Muni et al. (2016)
R05	LDPE	80	120-150	Moreno et al. (2018)
W01	PP + PE / Harina de madera	n/a	160-180	Irina Turku et al. (2017)
W02	PP + PE / Harina de madera	n/a	160-180	Irina Turku et al. (2018)
W06	WPC / Nano-arcilla / Fibra de vidrio	60	120-195	Birm-june et al. (2019)
W07	LDPE + Madera de pino	80	120-150	Moreno et al. (2018)
W12	HDPE + Aserrín de pino	n/a	198	Horta et al. (2017)
W16	Fibra de madera + PE	250	160-175	Zhang et al. (2018)
W18-19	HDPE / Pellets de madera / Residuos de madera	50	170	Sommerhuber et al. (2015)
W20-21	PS / ABS / Madera	80	180-200	Sommerhuber et al. (2019)
W22	PET + PP + HDPE / Harina de madera	n/a	170	Martinez Lopez et al. (2019)

3.8.2. Propiedades termofísicas de compuestos plásticos

La Figura 26 y Figura 27 muestran el total de compuestos plásticos en los que se proporcionaron **propiedades termofísicas**. El **eje vertical** muestra el **código** por compuesto (e.g. E01 = Compuesto plástico de ingeniería 01). La **conductividad térmica** por compuesto fue el parámetro seleccionado para organizarlos de menor a mayor.

Figura 26. Propiedades termofísicas de compuestos (parte 1), si el valor >2.5, la barra del gráfico aparece completamente llena y se especifica el valor real.

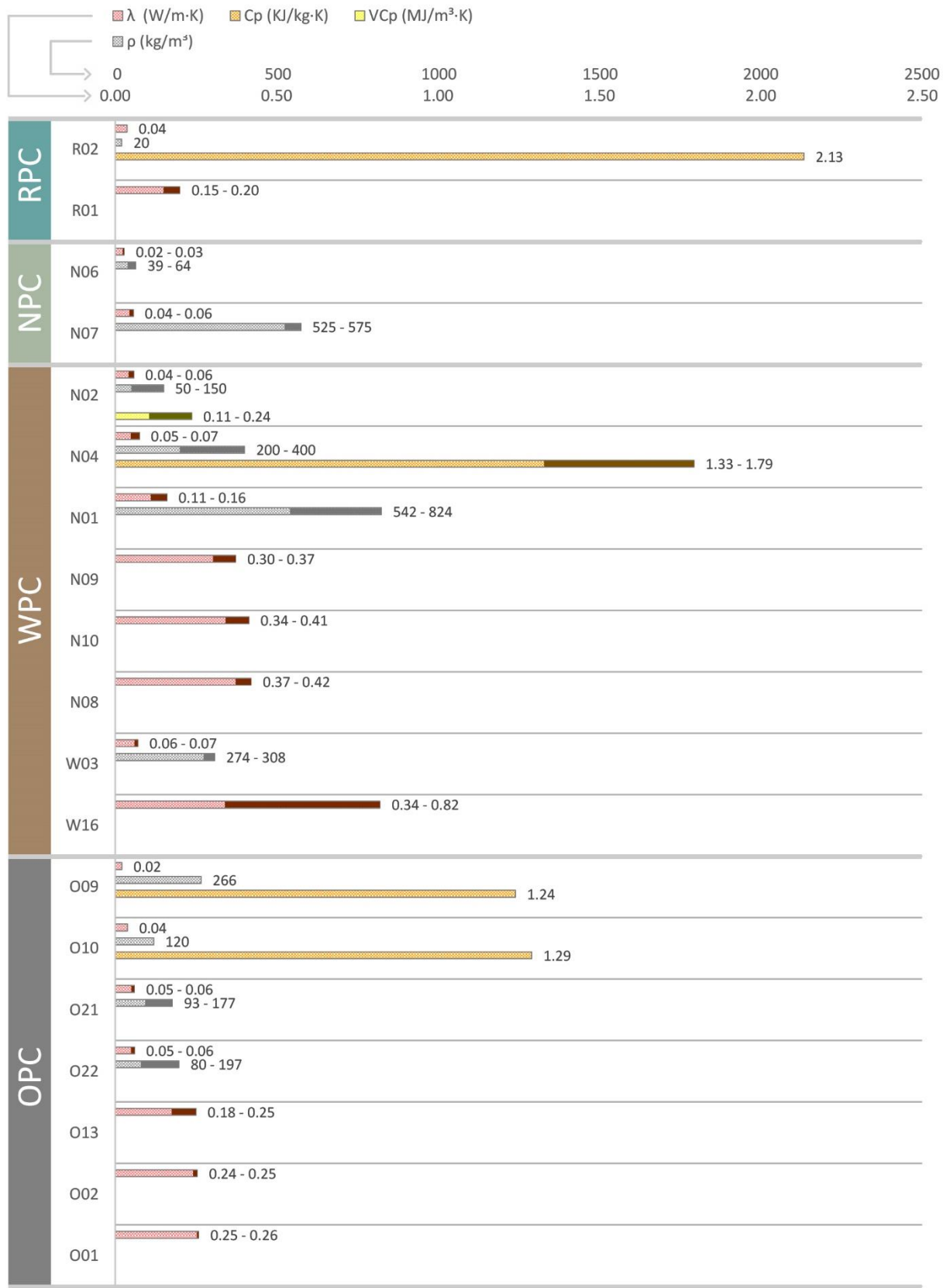
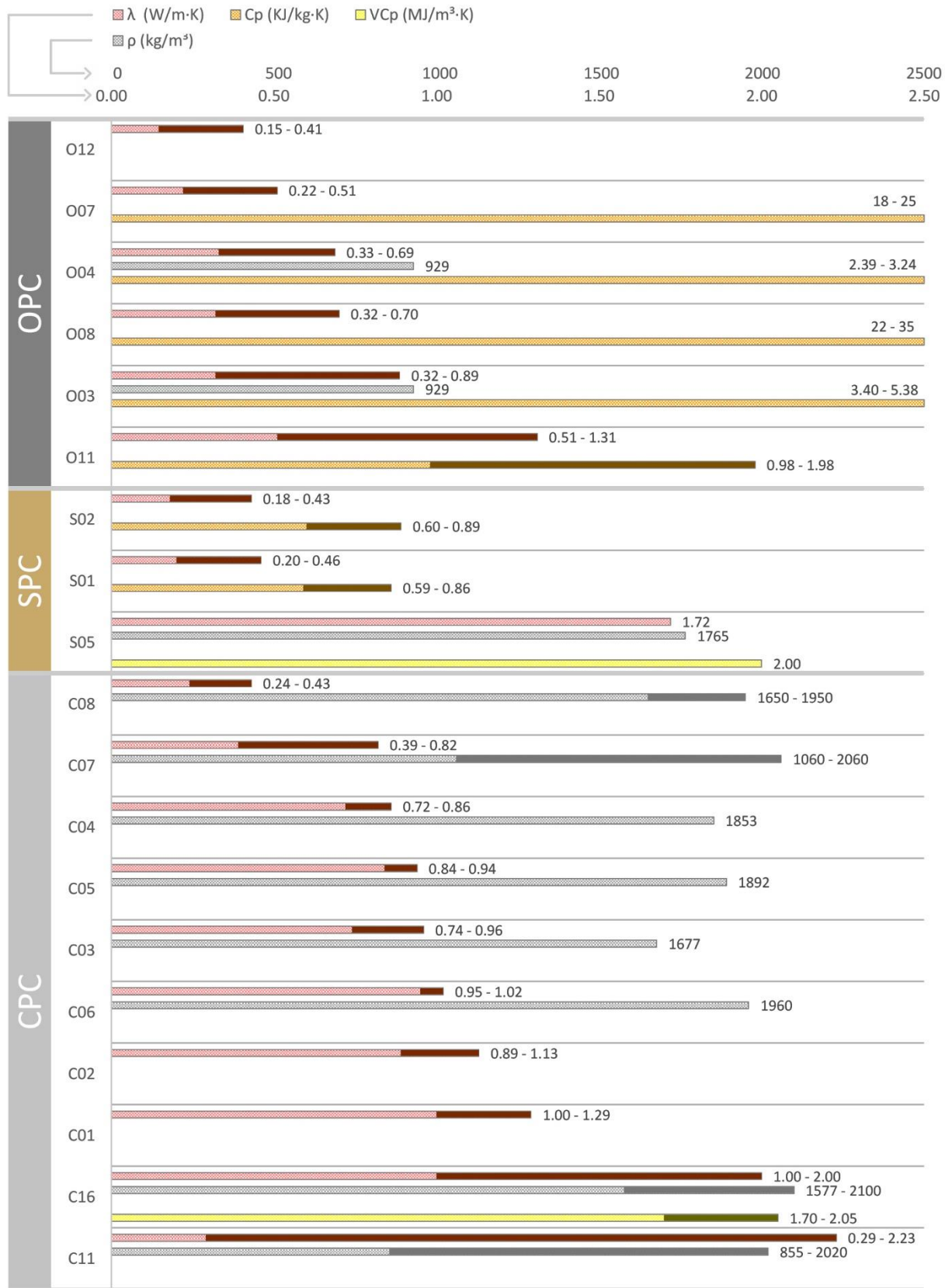


Figura 27. Propiedades termofísicas de compuestos (parte 2), si el valor >2.5, la barra del gráfico aparece completamente llena y se especifica el valor real.



CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

De acuerdo con Hernández Sampeiri (2014), el enfoque de esta investigación es **cuantitativo** y de tipo **experimental**, su desarrollo puede dividirse básicamente en dos procesos:

p. | 115

1. La **creación de especímenes** (muestras)
2. El **análisis** de los mismos y comparación de datos

El **primer proceso** consiste en la creación de especímenes utilizando como materia prima plástico recuperado y otros materiales de relleno. Para el desarrollo de especímenes, se realizaron compuestos plásticos utilizando como **matriz** polipropileno (PP), y como **rellenos** un mineral y dos subproductos: tierra, aserrín y restos de café. Se realizaron tres combinaciones diferentes: **Suelo-PP**, **Aserrín-PP**, **Café-PP**. En todas las combinaciones, se realizaron tres diferentes porcentajes **relleno/matriz** (**16.6/83.4**, **33.3/66.6**, **50/50 % m/m**). Se realizó una prueba de referencia con puro Polipropileno reciclado (RPP). Se hizo una última muestra combinando en **porcentaje de masa** el 50% con PP, y la otra mitad combinando los tres rellenos por igual porcentaje: 16.6% c/u (WSC). Todos los materiales tuvieron una limpieza previa en la búsqueda de tener un material mayormente puro. Todos los materiales fueron expuestos a temperaturas por encima de los 50 °C por lapsos de tiempo variable, con el objetivo de reducir el porcentaje de humedad al mínimo. El desarrollo de las muestras se realizó mediante el método de extrusión de plásticos. La extrusora de plástico que se utilizó fue diseñada y elaborada para fines de esta investigación. El instrumental que se utilizó para la creación de especímenes está inspirado en el diseño de la primera versión de la extrusora de plástico desarrollada por el Ing. industrial holandés: Dave Hakken, y su comunidad '*precious plastic*'. Los materiales fueron premezclados en horno de cocina. Se utilizó un tubo cuadrado de aluminio 6061 de medida nominal 1.5" x 1.5" x 10' de largo y 0.125" de espesor como molde para la creación de todas las muestras. El ancho

y largo de los especímenes fue posteriormente cortado conforme al tipo de prueba. En total se realizaron 10 diferentes muestras y 1 prueba de referencia con PP reciclado al 100%:

RPP, Polipropileno reciclado (referencia): 100%.

C16, Café: 16.6%, PP: 83.4%.

C33, Café: 33.3%, PP: 66.6%.

C50, Café: 50%, PP: 50%.

W16, Aserrín: 16.6%, PP: 83.4%.

W33, Aserrín: 33.3%, PP: 66.6%.

W50, Aserrín: 50%, PP: 50%.

S16, Suelo: 16.6%, PP: 83.4%.

S33, Suelo: 33.3%, PP: 66.6%.

S50, Suelo: 50%, PP: 50%.

WSC, Aserrín: 16.6%, Suelo: 16.6%, Café: 16.6%, PP: 50%.

El análisis se centra en el estudio de las propiedades de carácter **físico y térmico**, por lo que el **segundo proceso** consiste en el análisis del desempeño de los especímenes con un enfoque **térmico-energético**. Una primera etapa consiste determinar masa y volumetría del espécimen para conocer su densidad. La segunda etapa consiste en el análisis de las propiedades térmicas de los especímenes con el fin de conocer propiedades como la conductividad térmica, resistividad térmica, calor específico volumétrico y difusividad térmica. Para esta etapa se utilizó el analizador de propiedades térmicas KD2 PRO. Una última etapa consiste en el análisis del desempeño de materiales (análisis térmico-energético), para este proceso se utilizó el software OPAQUE 3.0., y un archivo climático EPW¹⁷.

¹⁷ *Energy Plus Weather data file* por sus siglas en Ingles.

La Tabla 4 muestra la secuencia metodológica general de esta investigación. Dividida en 11 etapas, se pueden apreciar los **pasos** y **herramientas** que se implementaron en el desarrollo de esta investigación.

Tabla 4. *Proceso metodológico de la investigación.*

Etapas	Pasos	Herramientas
1. Búsqueda de literatura (heurística)	a) Revisión de ‘reviews’ científicos para conocer la semántica del tema de investigación, autores líderes, palabras clave y áreas temáticas. b) Búsqueda en base de datos mediante la utilización de booleanas y palabras clave. c) Selección de artículos conforme al tema y subtemas de investigación.	a) Recursos bibliográficos digitales de información científica y tecnológica (Scopus).
2. Revisión de la literatura (hermenéutica)	a) Clasificación de la información por subtemas. b) Reconocimiento de métodos, herramienta y hallazgos. c) Análisis e interpretación de la información. d) Re-planteamiento de la investigación.	a) Gestor de documentación científica y referencias bibliográficas (Mendeley).
3. Diseño del experimento	a) Reconocimiento de residuos termoplásticos generados y disponibles en la ciudad de Ensenada y alrededores. b) Selección de residuo termoplástico (constante). c) Selección de materiales de relleno (variables). d) Determinar unidad de análisis. e) Definir objetivos del experimento.	a) Lectura de la literatura anteriormente seleccionada. b) Investigación de campo.

	f) Indicar variables y constantes de estudio. g) Diseño de especímenes. h) Diseño de moldes de aluminio. i) Diseño de maquinaria para la creación de especímenes. j) Selección de equipo para obtención de datos. k) Selección de método de análisis.	
4. Creación de extrusora de plástico	a) Creación extrusora de plástico, inspirada en el diseño de la primera versión de la extrusora de la comunidad global de 'Precious Plastic'.	a) Herramientas de corte, manipulación de acero y madera. b) Motor eléctrico de 2HP de 220V. c) Reductor 60-1. d) 5 resistencias térmicas de 220W, 220V. e) 2 controladores digitales de temperatura (PDI) marca INKBIRD, modelo ITC-100VH. f) 2 relés SSR de 25 amperes. g) 2 sensores de temperatura PT100. h) Tubo de aluminio de 1.25" de diámetro interior y 70 cm de largo. i) Broca de presión para extrusora de 30 mm de diámetro y 79 cm de largo. j) Componentes de sujeción y de conexión eléctrica.
5. Diseño de especímenes y creación de moldes de aluminio	a) Revisión de estándares/normas para creación de especímenes de plástico y análisis de propiedades térmicas. b) Determinar medidas de espécimen de conforme a estándar e instrumental a utilizar.	a) ASTM D5930-17. b) Manual de operación de analizador térmico KD2 PRO. c) Tubo rectangular de aluminio de 1.5" x 1.5" x 10' de largo y 0.125" de espesor. d) Solera de aluminio de 0.125" x 4" x 4". e) Taladro de banco.

	c) Creación de 4 moldes de aluminio de 2" de diámetro interior x 5" de largo.	f) Broca de 0.5". g) 4 tornillos de 0.375" x 1". h) 4 tuercas de 0.375".
6. Creación de especímenes	a) Precalentar extrusora a la temperatura necesaria (180-200°C). b) Conectar molde de aluminio a boquilla de extrusora. c) Depositar las materias primas en el embudo de abastecimiento de la extrusora. d) Llenar el volumen interior de molde con el compuesto plástico y de la extrusora. e) Desarmar molde de aluminio y desmoldar. f) Etiquetar espécimen. g) Dejar secar espécimen por 24 horas. h) Hacer barrenos para la inserción de sonda SH-1 y TS-1 del conductímetro KD2 PRO.	a) Extrusora de plástico. b) Moldes de aluminio de 2" de diámetro interior x 5" de largo. c) Taladro de banco. d) Broca de carburo de 1/16" de diámetro. e) Broca de carburo de 2.4 mm de diámetro.
7. Análisis de propiedades físicas	a) Dimensionamiento geométrico de especímenes. b) Obtención de masa de muestras. c) Cálculo de densidad	a) Calibrador vernier digital. b) Báscula digital.
8. Análisis de propiedades térmicas	a) Aplicación de pasta térmica en barreno de espécimen hasta cubrir por completo la oquedad. b) Inserción de sonda SH-1 o KS-1 (de acuerdo a su densidad / conductividad térmica inicial). c) Análisis térmico por parte del instrumental KD2 PRO (duración de proceso: 2 minutos). d) Retiro de sonda SH-1 y limpieza de pasta térmica.	a) KD2 PRO. b) Sonda SH-1. c) Sonda KS-1. a) Pasta térmica.

	a) Recolección de datos (propiedades térmicas).	
9. Análisis térmico-energético	a) Creación de materiales en software conforme a propiedades térmica obtenidas. b) Simulación de desempeño térmico-energético.	a) Software OPAQUE 3.0. b) Archivo climático EPW. c) Software Meteonorm. d) Software Dview.
10. Análisis de resultados	a) Generación de gráficas. b) Interpretación de variables.	a) Hojas de cálculo.

4.1. DESARROLLO DE ESPECÍMENES

Hoy en día, los materiales se clasifican normalmente en cinco grupos principales: metales, cerámicos, polímeros, semiconductores y compuestos. Los materiales compuestos están formados por dos o más materiales: un material matriz que transmite las tensiones mecánicas y un relleno que actúa como refuerzo para soportar las tensiones del compuesto (Horta et al., 2017).

4.1.1. Resumen del desarrollo de especímenes

Para el desarrollo de especímenes —mismos que fueron objeto de pruebas físicas, térmicas y mecánicas—, se realizaron compuestos plásticos utilizando como matriz: polipropileno (PP), y como rellenos, un mineral y dos subproductos: tierra, aserrín y restos de café. Se realizaron tres combinaciones diferentes: PP-tierra, PP-aserrín, y PP-café. En total se realizaron 10 diferentes combinaciones y 1 prueba de referencia con Polipropileno reciclado al 100%. Todos los materiales tuvieron una limpieza previa en la búsqueda de tener un material lo más puro posible. Todos los materiales fueron expuestos a temperaturas por encima de los 50 °C por lapsos de tiempo variable, con el objetivo de reducir el porcentaje de humedad al mínimo. El desarrollo de las muestras se realizó mediante el método de extrusión de plásticos. La extrusora

de plástico que se utilizó fue diseñada y elaborada para fines de esta investigación. Los materiales fueron premezclados en horno de cocina. Se utilizó un tubo cuadrado de aluminio 6061 de 1.5" x 1.5" x 10' de largo y 0.125" de espesor como molde para la creación de todas las muestras. El ancho y largo de los especímenes fue posteriormente cortado conforme al tipo de prueba.

4.1.2. Instrumental (desarrollo de especímenes)

Pichel de plástico. La estimación volumétrica de las partículas de rellenos (café, aserrín y tierra), así como el polímetro matriz (polipropileno), se llevó a cabo con un pichel de polipropileno transparente de 2 litros de capacidad y masa de 97 gramos.

Figura 28. Pichel



Horno. La deshidratación de los rellenos se llevó a cabo dentro del horno de una estufa de cocina convencional marca *Whirlpool* modelo WF5150D00.

Termómetro para horno. El control de la temperatura interna del horno se llevó a cabo con un termómetro para horno marca y modelo *Taylor Precision Products Classic Series 5932*. Este termómetro tiene un rango entre los 100 °F (38 °C) a los 600 °F (316 °C).

Masa¹⁸. El pesaje de especímenes se realizó con la báscula digital marca *Inevifit*, modelo *I-KS001*, con un rango de alcance de 0 a 6 kg, y una precisión de ± 1 gramo.

Figura 29. Báscula digital.



¹⁸ Este instrumental fue utilizado en el siguiente subcapítulo (4.2. ANÁLISIS TERMOFÍSICO DE ESPECÍMENES), por lo que fue omitido en el mismo.

Registrador de datos profesional de humedad y temperatura¹⁹.

La humedad relativa presente en el ambiente al momento del desarrollo de las muestras se capturó con el *Data Logger* marca y modelo DLG-88395. Este registrador de datos presenta un rango de humedad relativa de 0 a 100%, una resolución de 0.1% y una precisión de $\pm 3\%$.

Figura 30. Data Logger DLG-88395.



Extrusora de plástico. La extrusora de plástico que se utilizó fue diseñada y elaborada para fines de esta investigación. El instrumental que se utilizó para la creación de especímenes está inspirado en el diseño de la primera versión de la extrusora de plástico desarrollada por el Ing. industrial holandés: Dave Hakkens, y su comunidad '*precious plastic*'.

La Figura 31 muestra una extrusora de plástico diseñada y desarrollada para poder ser elaborada por personas con conocimientos básicos en equipos y herramientas. Es una extrusora de baja producción que facilita y da apertura a talleres locales, escuelas y pequeños emprendimientos, a adentrarse en el mundo del reciclaje de plásticos. Éste instrumento sigue los mismos principios de una extrusora industrial (ver 2.4.4. Extrusión, p. 60), en donde el plástico se deposita en un embudo o tolva —mismo que canaliza el polímero hacia un barril que es calentado a altas temperaturas—, posteriormente es empujado mecánicamente por un tornillo sinfín al mismo tiempo que es fundido, para finalmente salir por uno de sus extremos conforme la configuración de la boquilla o punta de la extrusora. Éste prototipo fue fuente de inspiración para el desarrollo de una extrusora de plástico con la capacidad para poder reciclar y desarrollar compuestos plásticos.

¹⁹ Este instrumental fue utilizado en el siguiente subcapítulo (4.2. ANÁLISIS TERMOFÍSICO DE ESPECÍMENES), por lo que fue omitido en el mismo.

Figura 31. A la izquierda. Dave Hakkens creando una lampara a base de plástico reciclado. A la derecha. Primera versión de la extrusora de la comunidad global: *Precious Plastic*.

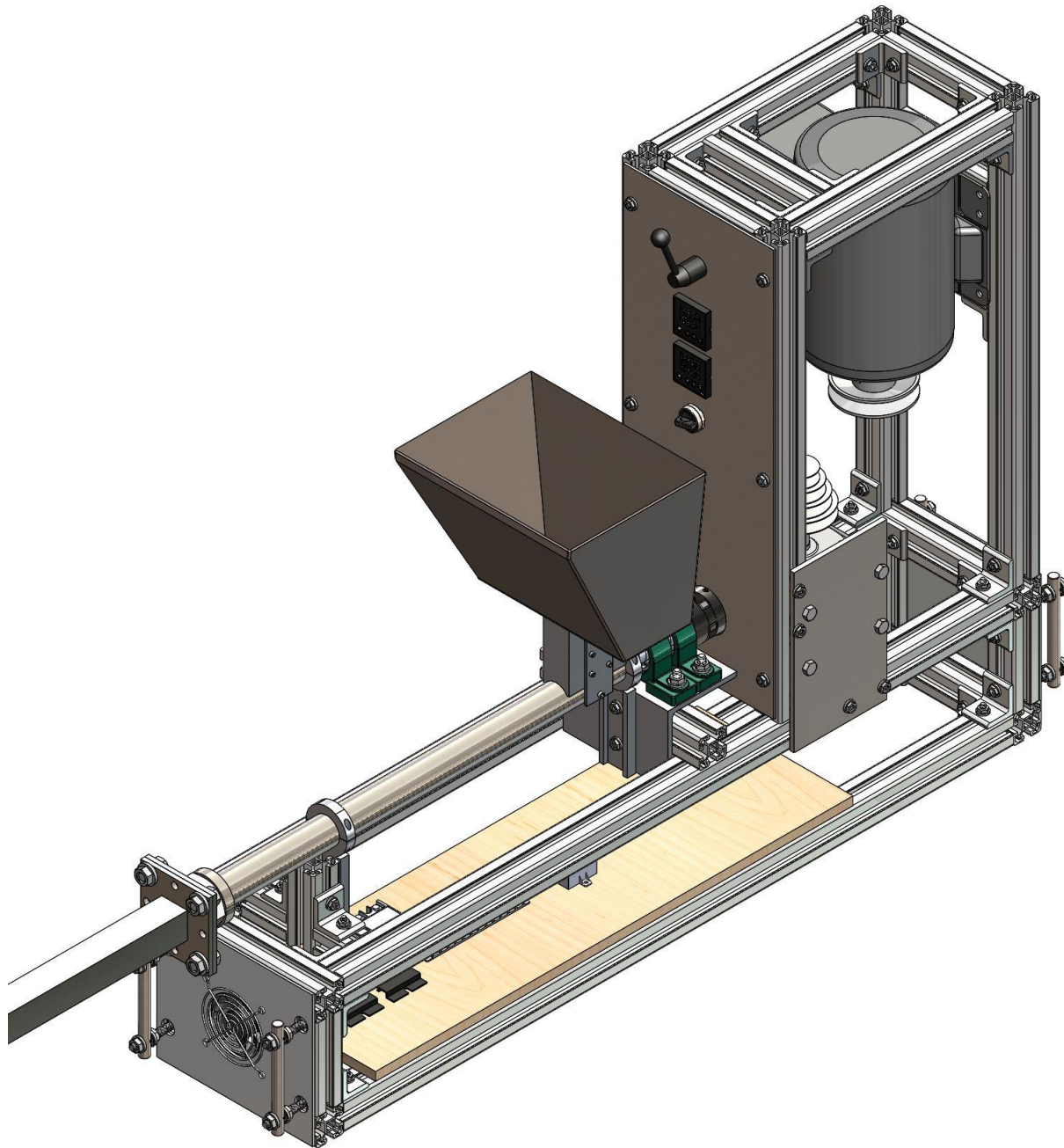


Nota. Adaptado de *Precious Plastic - at work*, por Dave Hakkens, 2016, One Army (<https://www.youtube.com/watch?v=76AFNixYjUE>)

Archivos, planos, información técnica y videos instructivos del desarrollo de la extrusora de plástico, así como de otro tipo de máquinas de reciclaje, pueden encontrarse y descargarse de manera gratuita directamente de la página oficial de la comunidad de '*precious plastic*'.

La Figura 32, es un diseño propio inspirado y adaptado del diseño original de Dave Hakkens, elaborado con el objetivo de poder desarrollar las muestras para el análisis termofísico de esta investigación. Asimismo, en la parte inferior derecha de la imagen, se presenta un código QR que redirige a una carpeta en *google drive*, misma que contiene los archivos descargables en 2D y 3D de la extrusora desarrollada para el reciclaje y elaboración de especímenes de este capítulo.

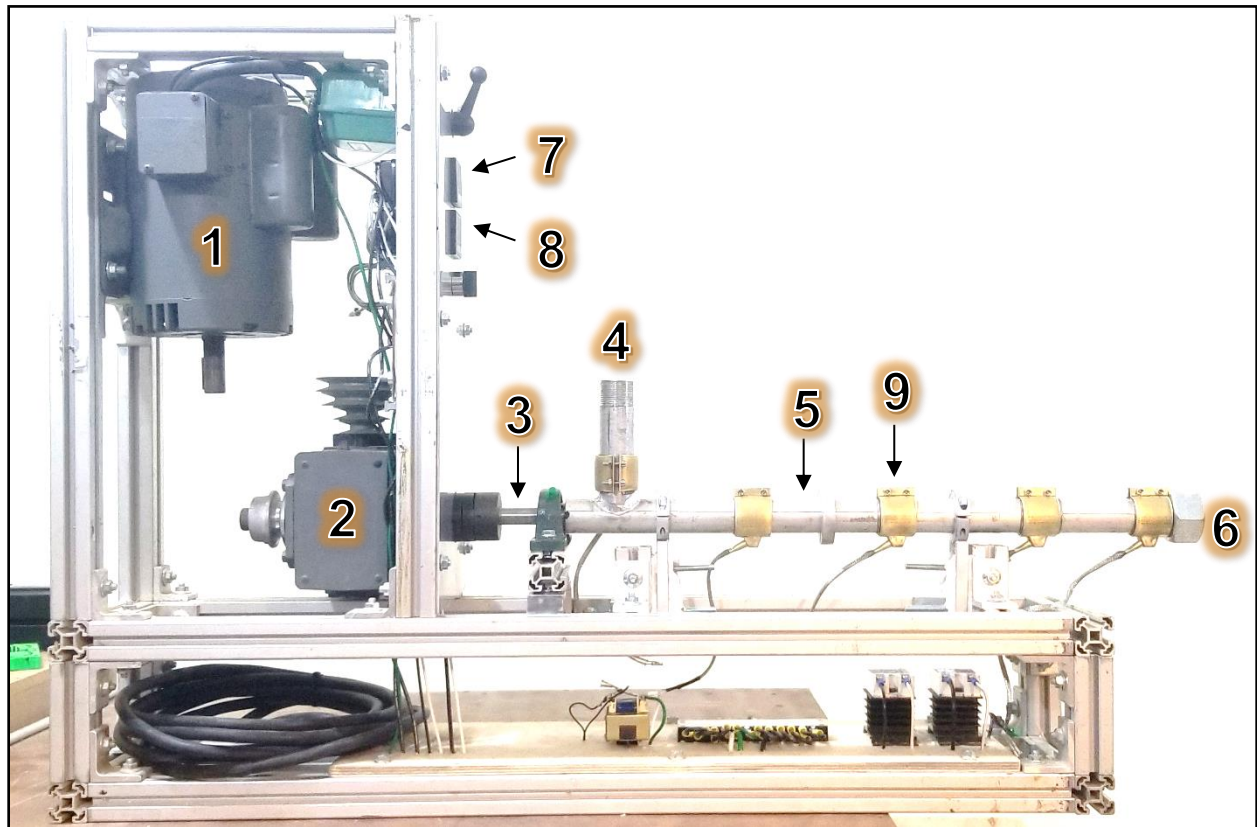
Figura 32. Diseño 3D desarrollado en *Solid Works* de extrusora de plástico adaptada para desarrollo de compuestos plásticos.



Los componentes principales de la extrusora desarrollada son:

- 1) Motor Baldor de 2 HP, 1 740 RPM y 220 V
- 2) Reductor 60:1
- 3) Tornillo de presión ´sin fin´ de 30 mm de diámetro y 79 cm de largo
- 4) Tolva de abastecimiento
- 5) Cañón de procesamiento térmico
- 6) Salida
- 7) PDI²⁰ cañón
- 8) PDI salida
- 9) Resistencia térmica

Figura 33. Extrusora de plástico adaptada para desarrollo de compuestos plásticos de la presente tesis.



²⁰ Controlador Proporcional, Integral y Derivativo, *proportional–integral–derivative controller* por sus siglas en inglés.

La extrusora de plástico adaptada y desarrollada que se puede apreciar en la Figura 33, fue configurada para alcanzar temperaturas por encima de los 260 °C —100 ±5 °C por encima de la temperatura de fusión del polipropileno—. Asimismo, fue configurada para operar en un rango entre 49 y 60 RPM. Por último, se estimó que la capacidad de producción de plástico reciclado en un rango entre 180 y 220 °C, a 60 RPM y con partículas de polipropileno post-industrial de $\leq 0.5''$; fue de 4.5 ± 1 kg/h.

4.1.3. Materiales

Polipropileno (PP). El termoplástico utilizado como matriz y material aglutinante de los compuestos fue el polipropileno. De acuerdo con la ISO 10456 —Materiales y productos para la edificación—, este polímero presenta una conductividad térmica de 0.022 W/(m·K), un calor específico de 1.80 kJ/(kg·K) y densidad de 910 kg/m³. Fue seleccionado como matriz para el desarrollo de esta investigación por ser un residuo disponible y asequible en una gran variedad de productos, por tener una de las menores conductividades térmicas con respecto a los otros tipos de termoplásticos (ver Figura 23, p. 74), y al mismo tiempo, tener propiedades mecánicas sobresalientes respecto a sus semejantes. Este material fue donado por la recicladora de Fernando Puebla Viera ubicada en la ciudad de Tijuana, Baja California. La denominación del polímero por parte de la recicladora fue **polipropileno post-industrial**, por lo que se presume que el material nunca tuvo contacto con otro tipo de residuo orgánico, pues es un residuo producto de los procesos de calidad en la industria. El material se proporcionó ya triturado, en partículas $\leq 0.5''$. En una revisión manual y mediante una separación por densidad, se encontraron minerales, metales ferrosos y no ferrosos

Figura 34. Polipropileno recuperado y triturado.



en un porcentaje menor al 1% —esto debido a que la recicladora trabaja con otros tipos de materiales—.

Café (borra). Este residuo que queda en los filtros de cafeteras fue utilizado como relleno dentro del compuesto Polipropileno-Café (C16, C33 y C50). El material fue donado por la cafetería 'Café Luna de Marzo' ubicada en la ciudad de Ensenada, Baja California. La denominación por parte de la cafetería fue: **café 100% arábica**. Este residuo puede presentar una densidad aparente entre 308 y 399 kg/m³ (AMETEK Brookfield, 2018). Dependiendo del nivel de tostado, la densidad aparente puede variar desde los 280 a los 430 kg/m³, con una densidad de partículas de 910 kg/m³ (Nakilcioğlu-Taş & Ötleş, 2019). Los valores de densidad, conductividad térmica y calor específico para los granos de café verde son de 368 kg/m³, 0.112 W/(m·K), 0.905 kJ/(kg·K), respectivamente (Cardoso et al., 2018).

Figura 35. Borra de café 100% arábica.



Aserrín. Este residuo producto de la creación de artículos de madera, fue utilizado como relleno del compuesto Polipropileno-Madera (W16, W33 y W50). El material fue donado por una carpintería local de la ciudad de Ensenada, Baja California. De acuerdo con la información proporcionada por el propietario, el aserrín utilizado en estas muestras contiene un **90-95 m% de madera poplar**. El porcentaje restante comprende otro tipo de madera residual. Un ejercicio

Figura 36. Aserrín 90-95 m% proveniente de madera de pino.



de caracterización termofísica realizado a tres especímenes prismáticos de madera de pino (ver 2.6.2. Residuos de madera, p. 65) presentó los siguientes resultados, la conductividad se

presentó en un rango entre 0.093 y 0.104 W/(m·K), el calor específico volumétrico osciló entre 0.483 y 0.632 MJ/(m³·K). La densidad fue de 462.46 - 477.09 kg/m³.

Suelo. Este material fue utilizado como relleno del compuesto Polipropileno-Suelo (S16, S33 y S50). El suelo, al igual que otros seis tipos de suelo más de la ciudad de Ensenada, forman parte de una investigación por parte de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño de UABC. De acuerdo con los primeros resultados de la investigación, éste suelo presentó una de las menores densidades y conductividades térmicas en comparación con otros seis tipos

Figura 37. Suelo Sauzal Ensenada, a una profundidad entre 1 y 2 m.



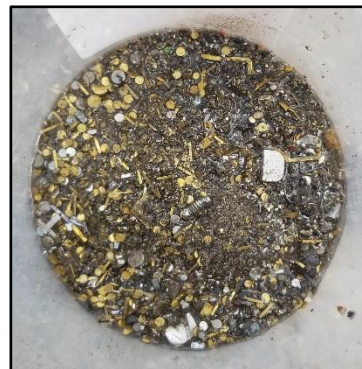
de suelos de las zonas Sauzal, Chapultepec y Maneadero de Ensenada. Fue extraído de la zona conocida como 'el Sauzal', con geolocalización: 31°52'30.4"N 116°39'47.0"W. De acuerdo con la localización y la consulta cartográfica publicada por INEGI, el material forma parte de los suelos regosoles. El tipo de suelo se encontró a una profundidad entre 1 y 2 metros con respecto al nivel del terreno natural. Para ser seleccionado, se realizó un ejercicio de caracterización termofísica realizado a tres muestras de este tipo de suelo (ver 2.2.3. , p. 67). El suelo presentó los siguientes resultados, conductividad térmica, calor específico volumétrico, difusividad térmica y densidad: 0.63 W/(m·K), 1.72 MJ/(m³·K), 0.308 mm²/s, 1 769 kg/m³, respectivamente.

4.1.4. Limpieza de materiales

Limpieza de Polipropileno (PP). Pese a que el plástico post-industrial es en general un material limpio y libre de otro tipo de materiales, el polímero fue sometido a una separación por densidad. Debido a que la recicladora que donó este polímero trabaja con otros tipos de materiales. Se realizó una revisión manual en la que se pudo observar algunos materiales ajenos a los termoplásticos, por lo que el material fue depositado en un recipiente con agua para realizar una separación por densidad. Se

encontraron minerales, metales ferrosos y no ferrosos en un porcentaje menor al 1%. Los materiales obtenidos posterior a la separación por densidad se pueden observar en la Figura 38.

Figura 38. Material contaminante obtenido posterior al proceso de separación por densidad.



p. | 129

Limpieza de Café (borra). Este residuo es perteneciente a los productos de producción de bebidas de café, por lo que el material proporcionado se encontró limpio. El material fue depositado en una caja elaborada con malla de 1/8", misma que fue vibrada manualmente para separar todos aquellos materiales superiores a la dimensión de la malla,

especialmente cualquier tornillo o componente de herramienta de metal que pudiera afectar el proceso de reciclaje de las muestras, dañar la máquina y alterar los resultados de las pruebas térmicas. Este proceso ayudo a deshacer las masas de café en forma de roca que se habían hecho producto de la gran cantidad de humedad. La malla utilizada y la desintegración de las partículas de café se pueden observar en la Figura 39.

Figura 39. Criba de 1/8" para limpieza y selección de partículas $\leq 0.125"$ de café.



Limpieza de Aserrín. Debido a que el material fue proporcionado por una carpintería local, en donde se trabaja con laminados de cartón comprimido, plásticos, fijaciones y otro tipo de materiales; el aserrín fue sometido al mismo procedimiento que la borra de café. Un antes y después del proceso se puede observar en la Figura 40.

Figura 40. Criba de 1/8" para limpieza y selección de partículas $\leq 0.125"$ de aserrín.



Limpieza de suelo. Por la dureza de este material toda vez que este pierde humedad, y por seguridad de la extrusora, el material paso primeramente por la malla de 1/8", y posteriormente por una segunda malla de 1/16". El producto final se puede apreciar en la Figura 41.

Figura 41. Malla de 1/16" para limpieza y selección de partículas $\leq 0.0625"$ de suelo.



4.1.5. Densidad de materiales, deshidratación y porcentaje de agua (DDA)

DDA polipropileno (PP). Eliminar la humedad que se encuentra en la superficie de los polímeros se puede lograr al someter los mismos temperatura cercana a los 50 °C, ya que a partir de los 70 °C comienza el proceso de transición térmica o también conocida como transición vítrea de polímeros (Martins et al., 2017). Por lo anterior, este fue el único material que fue deshidratado de manera pasiva. Posterior a la separación de minerales y metales por densidad en agua, las partículas de polipropileno fueron expuestas a los rayos del sol por tres días soleados, hasta que visualmente se pudo observar completamente seca la superficie de las partículas trituradas de este termoplástico. La densidad de las partículas $\leq 0.5"$ proporcionadas

por la recicladora de Fernando Puebla en Tijuana presentaron una densidad de partículas que osciló entre los 383 y los 418 kg/m³.

Figura 42. Secado al sol de polipropileno.



p. | 131

Sin embargo, en la búsqueda de lograr una mezcla homogénea en el proceso de extrusión de los compuestos, el polímero fue sometido a un segundo proceso de trituración a cargo de la Ing. Ana Palacios Trejo en el Centro de acopio Tierra Viva de la ciudad de Ensenada, Baja California. En este segundo proceso, la trituradora fue configurada con una criba de 0.375", logrando tener partículas $\leq 3/8"$. La densidad final de partículas con el que se realizaron las pruebas osciló entre los 423 y los 428 kg/m³.

Figura 43. PP triturado en partículas de $\leq 3/8"$.



DDA Rellenos. Todos los rellenos (suelo, aserrín y café) fueron sometidos a un proceso de deshidratación inspirado en el método para determinar el contenido de agua (humedad) del suelo y la roca por masa (ASTM, 1998). Los diferentes tipos de rellenos fueron depositados en refractarios de vidrio, ollas de acero inoxidable y charolas de aluminio con una masa ≥ 200 g. Los recipientes fueron secados y pesados previo al depósito de material. Los rellenos fueron puestos en un horno convencional de cocina marca Whirlpool, expuestos a una temperatura de 105 ± 5 °C. Dependiendo el tipo de relleno y del tiempo en horno, se realizaron mediciones de masa cada

1, 2 y 4 horas. El proceso concluyó cuando la masa presentó una diferencia ≤ 1 g. Tal cual lo especifica la norma ASTM D2216, la influencia en el tiempo depende del tipo de material y la experiencia en el método, por lo que este método también fue realizado apoyado en métodos similares utilizados por científicos que experimentaron con polímeros y otros rellenos en diferentes investigaciones (Ayorloo et al., 2019; Birm-june et al., 2019; Cestari et al., 2014; Hittini et al., 2019; Horta et al., 2017; Kumar et al., 2020; Li et al., 2019; Limami et al., 2020; Marques et al., 2020; Martinez Lopez et al., 2019; Martins et al., 2017; Moreno et al., 2018; Pundien, 2020; Rubino et al., 2019; Sommerhuber et al., 2015, 2019; Tawiah et al., 2019; Zhang et al., 2018).

DDA Café (borra). El proceso de deshidratación con este relleno requirió de bastante atención, pues tan pronto la humedad era retirada en su totalidad, el residuo de café entraba en un proceso de descomposición en el cual se empezaba a quemar y carbonizar. El proceso se llevó a cabo con diferentes recipientes y configuraciones de masa y volumen. Se estima que el porcentaje de agua de este residuo fue de $51 \pm 4\%$.

Figura 44. Pesaje inicial de café.



DDA aserrín. Este relleno fue depositado una olla de acero inoxidable de masa 1.570 kg. La masa de aserrín depositado en el mismo fue de 1 kg. Fue expuesto a una temperatura de 105 ± 5 °C por 10 horas, teniendo pesajes cada dos horas. La masa se estabilizó cerca de los 0.925 kg. Este procedimiento se realizó en diferentes recipientes, con diferentes configuraciones de volumetría y en diferentes cantidades de horas y lapsos de medición. Se estima que el porcentaje de agua que contenía el aserrín utilizado osciló entre 7 y 8%.

Figura 45. Pesaje inicial de aserrín.



DDA suelo. Este material fue depositado en una charola de aluminio con masa de 1.487 kg. La masa de tierra fue depositada en la charola fue de 2.144 kg. Al igual que los residuos anteriores, fue expuesta a una temperatura de 105 ± 5 °C. La masa se estabilizó cerca de los 2.075 kg en un lapso de dos horas, con pesaje cada hora. Se estima que el porcentaje de agua que contenía la tierra al momento de la prueba fue del 3.22%. Es importante mencionar que este proceso se llevó a cabo 16 meses posterior a que la muestra fue extraída del predio, por lo que es probable que haya perdido la humedad que contenía a la profundidad de la que fue extraída (1 a 2 metros de profundidad). Pese a carecer de los datos de humedad original, en la Tabla 5 se reporta el porcentaje de agua al momento de la prueba, pero la densidad inicial corresponde a la estimada en el momento en que las muestras fueron obtenidas del sitio —mismas que se reportan junto con las propiedades térmicas en 2.2.3. (ver p. 67)—.

Figura 46. Pesaje inicial del total de tierra disponible.



La densidad aparente del polímero matriz y de rellenos se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Densidad inicial y seca de polímero matriz y rellenos.

Material	ρ inicial (kg/m ³)	material (%)	Agua (%)	ρ seca (kg/m ³)
Polipropileno	423 – 428			
Suelo	1770	96.78	3.22	n/a
Aserrín	271	92.5	7.5	214
Café	625	43.58	56.42	432

4.1.6. Dosificación de muestras

Algunos estudios han desarrollar con éxito compuestos plásticos con una baja proporción de polímero matriz.

Solanki & Bhattarai (2019), realizaron mediante una mezcla en caliente, muestras con arcilla y plástico en proporciones 80 y 20 m%, respectivamente. Li (2019), mediante el método de extrusión logró desarrollar madera plástica reciclada con 27 m% de HDPE, 70 m% de fibras de madera, y un 3 m% de aditivos. Cestari (2014), extruyó muestras con 40 m% de HDPE y el porcentaje restante de borra de café. No obstante, de acuerdo con la literatura explorada en el CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE, el 74% de los compuestos plásticos que fueron desarrollados mediante el **método de extrusión**, utilizaron cuando menos un **39 m%** de plástico como matriz.

Figura 47. Primera prueba de extrusión de PP y aserrín con relación en masa 1:1.



p. | 134

Tomando como punto de partida lo anteriormente expuesto, se procedió a realizar muestras de prueba con 50 m% de PP y 50 m% de aserrín. Asimismo, se hicieron pruebas con tierra y café, utilizando PP al 50 m%. Para estas pruebas, no se utilizó molde, se realizó una revisión visual y manual del producto directamente al salir por la punta de la extrusora. Las primeras pruebas con aserrín produjeron un material heterogéneo, en el que a simple vista se podía observar que el material no se había mezclado de manera uniforme. La Figura 47 muestra la apariencia de las primeras muestras con aserrín y PP con relación en masa 1:1.

Figura 48. Mezcla con aserrín y PP 50 m% ambos materiales.



Figura 49. Dosificación de materiales

Matriz →	Polipropileno (PP) m%					Código
Relleno ↓						
	PP: 50					RPP
Café (C) m%	C: 16.6			PP: 83.4		C16
Café (C) m%	C: 33.3			PP: 66.6		C33
Café (C) m%	C: 50			PP: 50		C50
Madera (W) m%	C: 16.6			PP: 83.4		W16
Madera (W) m%	C: 33.3			PP: 66.6		W33
Madera (W) m%	C: 50			PP: 50		W50
Suelo (S) m%	C: 16.6			PP: 83.4		S16
Suelo (S) m%	C: 33.3			PP: 66.6		S33
Suelo (S) m%	C: 50			PP: 50		S50
W + S + C m%	W: 16.6, S: 16.6, C: 16.6, PP: 50					WSC

Las pruebas con tierra y PP en igual proporción por material resultaron exitosas; sin embargo, se escuchaba que la máquina se forzaba por instantes, por lo que se determinó que 50 m% de tierra sería el máximo para esta combinación de materiales. La prueba con café y PP con relación 1:1 presentó una uniformidad aparente.

Por los alcances y limitantes de la máquina y el proceso mismo, se determinó para todas las combinaciones un porcentaje en masa máximo de 50%, tanto para la tierra, el aserrín y la borra de café. Para poder lograr una mezcla uniforme en la muestra de aserrín y PP al 50 m% ambos, únicamente en esta muestra, se pasó el

polipropileno por una red de pescar con oquedades promedio de 1/4". La combinación de esta muestra se puede apreciar en la Figura 48.

Se realizaron tres combinaciones diferentes: Suelo-PP, Aserrín-PP, Café-PP. En todas las combinaciones, se realizaron tres diferentes porcentajes relleno/matriz (16.6/83.4, 33.3/66.6,

50/50 % m/m). Se realizó una prueba de referencia con puro Polipropileno reciclado (RPP). Se hizo una última muestra combinando en porcentaje de masa el 50% con PP, y la otra mitad combinando los tres rellenos por igual porcentaje: 16.6% c/u (WSC). La Figura 49 muestra la dosificación de materiales desarrollados en esta investigación.

4.1.7. Diseño de especímenes

El diseño de los especímenes se elaboró con medidas conforme al instrumental a utilizar para el análisis térmico —KD2 PRO, y las sondas de aguja SH-1 y TR-1— y una de las normas que lo respalda —ASTM D5930, método para determinar la conductividad térmica de plásticos mediante una fuente de línea transitoria (sonda de aguja)—. De acuerdo con la ASTM D5930, los especímenes deben ser lo suficientemente largos en dimensión, y tener el diámetro suficiente de tal manera que la sonda de aguja quede cubierta por al menos 4 mm de material en todos los sentidos. Además, si el material es anisotrópico, se deben probar al menos tres especímenes por muestra. Por otro lado, la sonda SH-1 (3 cm) y TR-1 (10 cm) suman un largo de 13 cm. Por lo anterior se determinó una unidad de análisis (el espécimen), de 3 x 3 x 15 cm. Para la fabricación de especímenes, se utilizó un tubo cuadrado de aluminio 6061 de medida nominal 1.5" x 1.5" x 10' de largo y 0.125" de espesor como molde para la creación de las muestras. El tubo fue adaptado en uno de sus extremos para embonar con la salida de la extrusora. En la Figura 50, se puede apreciar la extrusora, el molde de aluminio y las piezas para la elaboración de especímenes.

Figura 50. Unión de molde para especímenes y punta de extrusora de plástico.



Como se puede apreciar en las últimas dos imágenes de la Figura 50, el producto resultante del proceso productivo de la extrusora-molde es una barra larga de sección transversal de 3 x 3 cm, con longitud variable. El largo es cortado manualmente conforme a la dimensión deseada²¹. Cabe destacar que la selección de este método y las dimensiones del molde permiten hacer futuras pruebas mecánicas conforme a normas para plásticos, como lo es la ASTM D790 (Métodos de prueba estándar para las propiedades de flexión de plásticos reforzados y no reforzados y materiales aislantes eléctricos) y la ASTM D695 (Método de prueba estándar para propiedades de compresión de plásticos rígidos).

4.1.8. Elaboración de especímenes

El proceso de elaboración de muestras se llevó a cabo mediante el proceso de extrusión de plásticos. En el proceso de fabricación de los especímenes intervienen un sinnúmero de variables que en sí mismas, representan todo un proceso metodológico. Primeramente, intervienen los materiales, el tamaño de las partículas del material, la temperatura de fusión de los materiales,

²¹ Esta condición, fue factor determinante para seleccionar la extrusión de plásticos como método de creación de muestras.

la dosificación, la temperatura a la que se encuentran los materiales, el estado de la mezcla, etc. Segundo, intervienen variables de carácter natural como la temperatura ambiente y la humedad relativa que se presentan a la hora de la elaboración de los especímenes. Tercero, intervienen todas aquellas variables que dependen de la extrusora como la fricción, la presión, el calor, el empuje, etc., al que son sometidos los materiales al ser procesados (Gardner et al., 2015).

Para determinar los valores de temperatura a los que debía ser configurada la extrusora, se tomó como punto de partida los valores de los compuestos plásticos que utilizaron en su dosificación PP como matriz en el CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE (ver Tabla 3, p. 112). Los compuestos plásticos con PP presentaron una calibración de temperatura de la extrusora en un rango entre 160 y 185 °C.

Es importante hacer resaltar que como hace mención en el apartado 2.4.4. Extrusión (*P.* 60), algunas extrusoras industriales, previo a expulsar el material, se mantienen mezclando los materiales por un lapso de tiempo determinado (**dos etapas**), lo que permite generar una mejor mezcla homogénea.

Puesto a que la extrusora desarrollada para fines de esta investigación realiza el proceso de mezcla y de expulsión del material en una **única etapa**, se tuvieron que realizar múltiples pruebas hasta lograr obtener materiales mayormente homogéneos.

En general, todas las pruebas se realizaron a una temperatura ambiente entre los 13 y los 21 °C, y a una humedad relativa entre el 54 y 86%. La extrusora fue programada entre 49 y 60 RMP, la temperatura del cañón y de la salida se presentaron en un rango entre 180-280 °C, y 180-239 °C, respectivamente. La Tabla 6 presenta las variables destacables del proceso de elaboración de especímenes. La temperatura del cañón (*T cañón*) y salida (*T salida*) presentadas, fueron aquellas registradas al momento inicial del proceso de extrusión. Debido a

la inercia de ascenso y descenso que presentan los controles de temperatura (PDI) la extrusora, el proceso productivo tuvo una variación de $\pm 20^{\circ}\text{C}$.

Tabla 6. *Parámetros de temperatura y RPM utilizados en el método de extrusión de compuestos plásticos de la presente investigación.*

Código	RPM (n)	T cañon (°C)	T salida (°C)	T ambiente (°C)	Humedad R. (%)
RPP	60	180	180	17	67
C16	49	194	198	14	86
C33	49	240	218	15	77
C50	49	262	239	19	62
W16	49	258	238	21	54
W33	49	273	238	13	85
W50	49	280	238	18	67
S16	49	206	199	17	75
S33	49	200	201	15	84
S50	49	221	199	15	83
WSC	49	275	238	17	73

La secuencia de pasos para la elaboración de especímenes se muestra a continuación:

1) Selección de materiales (dosificación).

Figura 51. A la izquierda. Borra de café. A la derecha. Polipropileno



2) Pesaje de materiales.

Figura 52. Pesaje de materiales conforme a dosificación.



p. | 140

3) Mezcla en frío manual (la mezcla debía presentar una masa de 1.2 ± 0.1 kg).

Figura 53. Mezcla en frío manual de la muestra WSC.



4) Configuración de extrusora (RPM y temperaturas de cañón y salida).

Plástico reciclado: propuesta de un material térmico-energético para la elaboración de materiales constructivos

5) Maridaje de extrusora y moldes de aluminio.

Figura 54. Unión de molde con salida de extrusora.



p. | 141

6) Adaptación en extremo final de molde de aluminio.

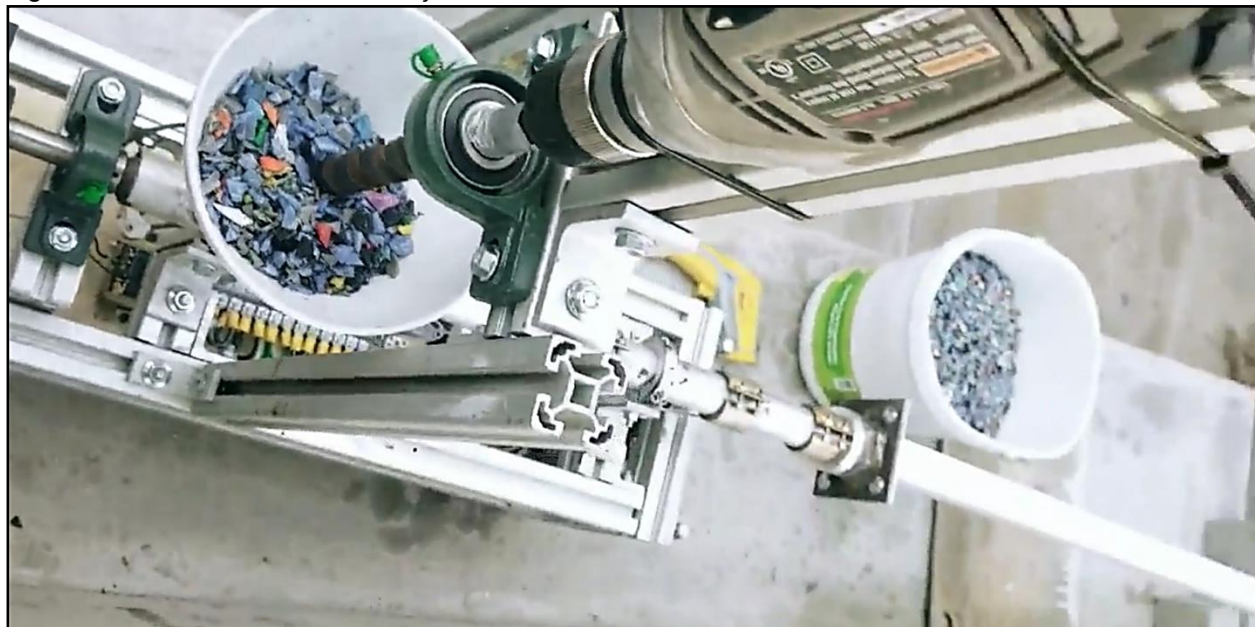
Figura 55. Inserción de barra de madera de pino en el otro extremo del molde y tensión mediante ligas para mantener presión al interior.



7) Encendido de máquina y abastecimiento de mezcla de material en tolva de extrusora.

8) Llenado de molde hasta acabar mezcla o completar ≥ 1 m en longitud de molde.

Figura 56. Abastecimiento de material y llenado de molde.

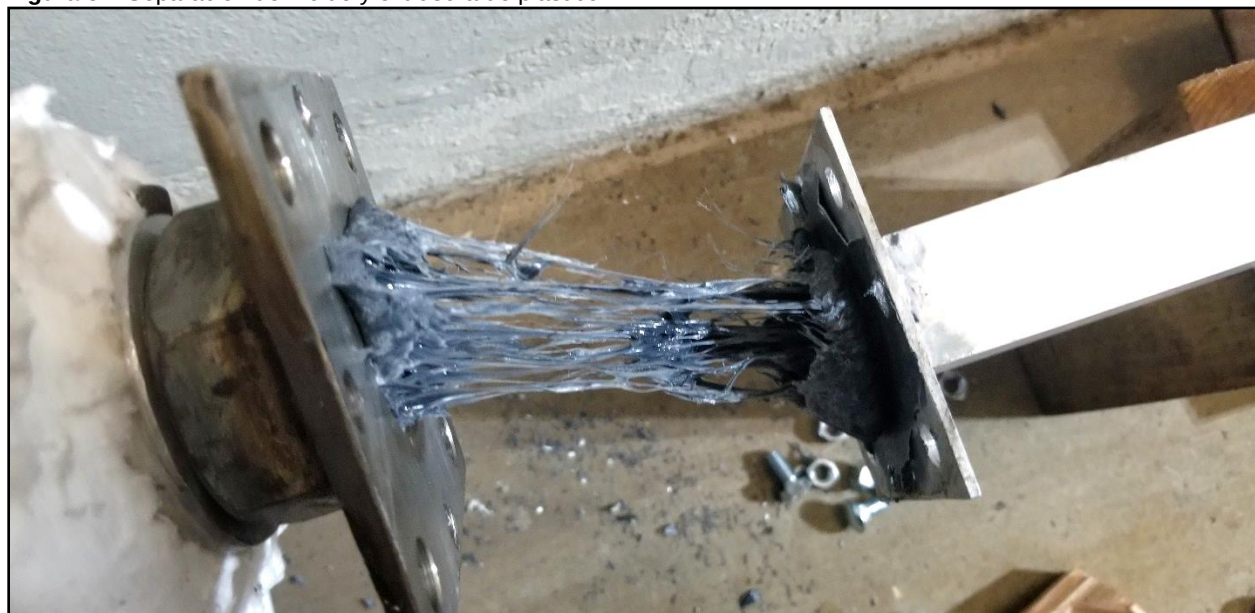


p. | 142

9) Apagado total de extrusora y enfriamiento de molde con chorro de agua.

10) Separación molde-extrusora.

Figura 57. Separación de molde y extrusora de plástico.



11) Extracción de muestra y primer análisis visual del producto.

- 12) De pasar una inspección inicial en el que el material se presentaba visualmente de manera uniforme y completo, se procede al paso siguiente, de lo contrario se comienza con el paso 1.

Figura 58. Inspección inicial de prueba fallida.



- 13) Corte con guillotina de madera de los primeros 0.15 ± 0.05 m de los extremos de la barra de ≥ 1 m en longitud (esta acción se tomó con el fin de descartar los primeros y últimos 15 cm de material y utilizar únicamente la parte central de la barra).
- 14) Corte de cuatro especímenes a una distancia ≥ 0.15 m.
- 15) Segunda inspección visual de los cuatro especímenes desarrollados y consideraciones conforme al paso 12.
- 16) Pesaje inicial de los cuatro especímenes desarrollados, si tres de los cuatro especímenes presentan una densidad $\leq$ a 15 gramos, continuar con el siguiente paso, de lo contrario se comienza con el paso 1.
- 17) Etiquetar muestras del uno al cuatro y conforme al código en el apartado 4.1.6.
- Dosificación de muestras** (los primeros tres especímenes se seleccionan conforme a la

inspección visual y pesaje de los mismos, estos tres especímenes serán los utilizados en el siguiente apartado).

Figura 59. Total de 10 muestras, 4 especímenes por muestra.



4.2. ANÁLISIS TERMOFÍSICO DE ESPECÍMENES

Hoy en día, los materiales se clasifican normalmente en cinco grupos principales: metales, cerámicos, polímeros, semiconductores y compuestos. Los materiales compuestos están formados por dos o más materiales: un material matriz que transmite las tensiones mecánicas y un relleno que actúa como refuerzo para soportar las tensiones del compuesto (Horta et al., 2017).

p. | 145

4.2.1. Resumen del Análisis termofísico de especímenes

Este apartado, presenta un ejercicio experimental de caracterización en relación con la estructura procedimental de la norma ASTM D5930 para determinar la conductividad térmica de materiales plásticos, con el propósito de hacer una comparación entre los valores de conductividad, calor específico y densidad. Para evaluar las propiedades térmicas de cada material, se utilizó un método dinámico en régimen transitorio, a temperatura ambiente en un rango de 16 a 20 °C y rango de humedad relativa entre 62 y 73%.

4.2.2. Método de análisis térmico

El instrumento empleado, utiliza el **método transitorio de fuente de calor lineal**, mismo que es utilizado para la medición de propiedades térmicas. El equipo utiliza una sonda de aguja que contiene un sensor de temperatura, éste monitorea lecturas en diferentes intervalos de tiempo y registra la disipación del calor.

El análisis de materiales, así como la comprensión y relación de sus propiedades térmicas, permite determinar si los materiales responden de manera óptima frente al aumento de temperatura del entorno natural (Guillén Guillén et al., 2018). El presente método reporta las propiedades de transmisión de calor en estado transitorio de compuestos plásticos utilizando

como matriz, **polipropileno** (PP), y como rellenos, un mineral y dos subproductos: **tierra, aserrín** y restos de **café**. Deberá de tomarse en cuenta que los especímenes sometidos a prueba fueron realizados en apego a la norma ASTM D5930 '*Thermal Conductivity of Plastics by Means of a Transient Line-Source Technique*'. Este método es aplicable para una amplia gama de materiales debido a su relativa simplicidad, ya que es capaz de realizar mediciones rápidas, lo que permite tomar datos antes de que los materiales sufran degradación térmica (ASTM International, 2009).

4.2.3. Método de análisis físico

La obtención de las dimensiones físicas de los compuestos plásticos tanto para reportar su volumetría, como para la obtención de la densidad, se basó en la norma ASTM D5947 '*Standard Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens*'. Este método proporciona cinco métodos de prueba diferentes para la medición de dimensiones físicas de especímenes de plástico sólido (ASTM, 1996).

4.2.4. Instrumental (caracterización de materiales)

Dimensionamiento. Las dimensiones geométricas de los especímenes se realizaron con un calibrador vernier digital marca *Neiko*, modelo 01407^a (Figura 60), con un rango de alcance de 0 a 150 mm, y una precisión de ± 0.01 mm.

Figura 60. Calibrador vernier digital.



Barrenación. Las perforaciones para la inserción de sonda se realizaron con el taladro de banco marca *WEN*, modelo 4214 (Figura 61), diseñado para realizar barrenos en acero, madera, plástico y otros materiales. Cuenta con un mecanismo de velocidad variable que permite realizar perforaciones en un rango de 580 a 3200 rpm.

Figura 61. Taladro de banco.



Caracterización térmica. Como se muestra en la **Figura 62.** Analizador térmico KD2 PRO

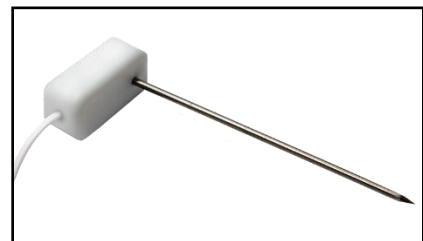
Figura 62, el instrumental utilizado es el analizador térmico, marca *Decagon Devices, Inc*, modelo *KD2 Pro*. Este analizador cumple con las normas ASTM-D5334 y la ASTM-D5930; consiste en una fuente de línea transitoria (sonda de aguja), que permite determinar propiedades térmicas, tales como: conductividad (λ), resistividad (Rho), calor específico volumétrico (VCp) y difusividad térmica (D). La sonda es insertada en el material a una temperatura ambiente constante, para posteriormente emitir calor y al mismo tiempo, registrar la temperatura transitoria mediante un sensor. La información es interpretada por un controlador portátil que mide, muestra y almacena los resultados obtenidos. El instrumento cuenta con cuatro sondas para distintos materiales y diferentes rangos de conductividad térmica. Tres de las sondas de aguja sencilla miden λ y D , mientras que la sonda de doble aguja mide λ , D , VCp , y Rho .



p. | 147

Sonda TR-1. Esta sonda está diseñada para suelos secos y húmedos, para materiales granulados y polvorientos, para concreto, roca, y otros sólidos. La aguja tiene un diámetro de 2.4 mm y 10 cm de largo. Mide la conductividad de materiales en un rango de 0.1 a 4.00 W/(m·K) con una precisión de 0.02 W/(m·K) en conductividades de 0.1 a 0.2 W/(m·K), y de $\pm 10\%$ en conductividades de 0.2 a 4.0 W/(m·K). La Figura 63 muestra la sonda TR-1.

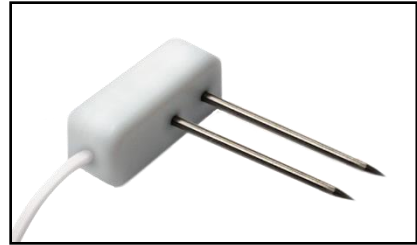
Figura 63. Sonda TR-1



Sonda SH-1. Esta es la única sonda que permite obtener calor específico volumétrico (VCp) y difusividad térmica (D), además de las propiedades que ofrecen las sondas de aguja

sencilla. Es compatible con los mismos materiales para la que fue diseñada la sonda TR-1. Las dos agujas tienen un diámetro de 1.3 mm, 3 cm de largo, y 6 mm de separación entre sí. Mide la conductividad de materiales en un rango de 0.02 a 2.00 W/(m·K) con una precisión de 0.01 W/(m·K) en conductividades de 0.02 a 0.2 W/(m·K), y de $\pm 10\%$ en conductividades de 0.2 a 2.0 W/(m·K). Asimismo, mide el calor específico volumétrico de materiales en un rango de 0.05 a 4.00 MJ/(m³·K) con una precisión de $\pm 10\%$ en conductividades por encima de 0.1 W/(m·K). La Figura 63 muestra la sonda SH-1.

Figura 64. Sonda SH-1



Masa y Humedad Relativa. El pesaje de especímenes y la captura de la humedad relativa del ambiente al momento de realizar el análisis térmico, se llevó a cabo con la báscula y el *Data Logger* del apartado 4.1.2. Instrumental (desarrollo de especímenes).

4.2.5. Densidad

Volumetría. El cálculo volumétrico se realizó tomando como bases la norma ASTM D5947 y el apartado 7.1.3 de la norma ASTM D5334 (ASTM, 2014). Se realizaron tres mediciones por lado del espécimen para la obtención del volumen. Unidad: milímetros (mm).

p. | 149

Figura 65. Dimensionamiento de espécimen.



Masa. Cada espécimen fue individualmente pesado en una báscula digital con precisión de ± 1 gramo. Unidad: gramos (g).

Figura 66. Obtención de masa de espécimen.



Densidad (ρ). Obtenidos el volumen y la masa, se calculó la densidad en kg/m^3 conforme a la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

(ec. 4)

4.2.6. Barrenación y acondicionamiento

La perforación para la inserción de sonda se realizó con un taladro de banco y con brocas de diferentes diámetros y longitudes dependiendo del tipo de sonda a utilizar.

Para la sonda SH-1 se utilizó una broca de 1/16" de diámetro y un mínimo de 6 cm de largo. Para la sonda TR-1 se utilizó una broca de 2.4 mm de diámetro y un mínimo de 10 cm. de largo. **Los materiales fueron perforados en cada**

uno de sus extremos —sección transversal— de tal forma que ambas sondas pudieran ser insertadas en el mismo espécimen al mismo tiempo. En materiales sólidos y duros, la perforación se debe realizar con cuidado, perforando el espécimen poco a poco, retirando los sobrantes de material perforado, para evitar la ruptura de la broca.

Una inspección aleatoria de la sección transversal de los especímenes dejó de manifiesto que **la parte central de la sección no es recomendable para la perforación e inserción de sondas.** En la Figura 68 se pueden apreciar imperfecciones y espacios de aire al centro de algunos especímenes. Asimismo, se puede apreciar una distribución de relleno con mayor concentración al centro, y una distribución de plástico en los perímetros de la sección. Por lo anterior, se procedió a realizar la perforación justo en la proyección que se forma al unir el centro de una de sus aristas, con el centro de una arista paralela a la misma (ver Figura 68). Al reubicar la perforación e inserción de sonda al centro de esta proyección, se espera tener una sonda cubierta en su totalidad de material para poder obtener resultados con valores reales.

Figura 67. Preparación y perforación para inserción de sonda SH-1.

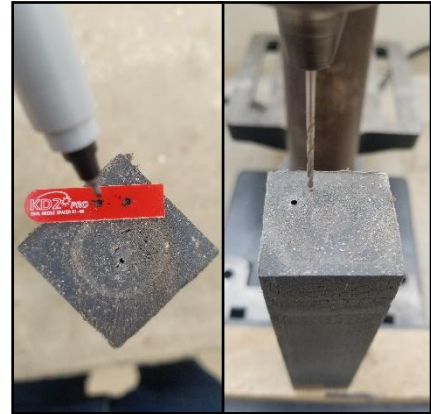


Figura 68. Inspección visual de sección transversal de muestras.



En los materiales donde se realizó la perforación, la oquedad fue rellena con pasta térmica (compuesto térmico polisintético a base de cerámica) marca *Arctic Silver*. Lo anterior debido a la resistencia térmica que se crea entre la aguja y el material perforado. Esta resistencia de contacto reduce el valor de conductividad térmica registrado por el sensor, y para disminuir este efecto se utiliza pasta térmica o vaselina. El proceso de aplicación de pasta térmica en oquedades para inserción de sonda SH-1, se puede apreciar en la Figura 69.

Figura 69. Aplicación de pasta térmica en oquedades de espécimen.



4.2.7. Calibración

El instrumental KD2 Pro incluye un material estandarizado por sonda, mismos que sirven para verificar que los sensores de las sondas estén operando conforme a las especificaciones del conductímetro. Cada material, incluye el valor de λ , la temperatura ambiente a la que fue hecha la prueba, y el tiempo de duración del análisis. El material para analizar la sonda de doble aguja (SH-1) contiene además del valor de λ , los valores de VCp y D.

Estándares de calibración de referencia. Se emplearon estándares de referencia de laboratorio. Para la sonda TR-1, el estándar de silicón epóxico, con un valor de λ de: 0.989 W/(m·K). Para la sonda SH-1, un cilindro de Delrin con doble perforación para el análisis de la sonda doble, con valor de λ : 0.390 W/(m·K), VCp: 1.969 MJ/(m³·K), y D: 0.198 mm²/s.

Calibración de la sonda. Para verificar el apropiado funcionamiento de la sonda de flujo transitorio, cada aguja debe insertarse por completo en su respectivo estándar de calibración. Una vez insertada la sonda en su respectivo material, se debe dejar reposar la aguja por 15

minutos para lograr un equilibrio térmico. El tiempo de lectura por tipo de sonda se realiza conforme a los valores predeterminados del instrumental. Para validar que los sensores TR-1, y SH-1 se encuentran correctamente calibrados, los valores obtenidos deben de encontrarse en un rango de $\pm 10\%$ con respecto al valor que se muestra en la certificación por material estandarizado (Decagon Devices, 2016).

Resultados de la calibración. Los resultados obtenidos en la calibración, y el rango con respecto al valor de cada material estandarizado se muestran en la Tabla 7, donde se especifican los rangos.

Tabla 7. Resultados obtenidos en el proceso de calibración.

Sonda	Rango
TR-1	λ : 0.940 W/(m·K), rango: -4.95%
SH1	λ : 0.395 W/(m·K), rango: +1.28%; VCp: 1.981 MJ/(m ³ ·K), rango: +0.61%; D: 0.200 mm ² /s, rango: +1.01%.

4.2.7. Caracterización térmica

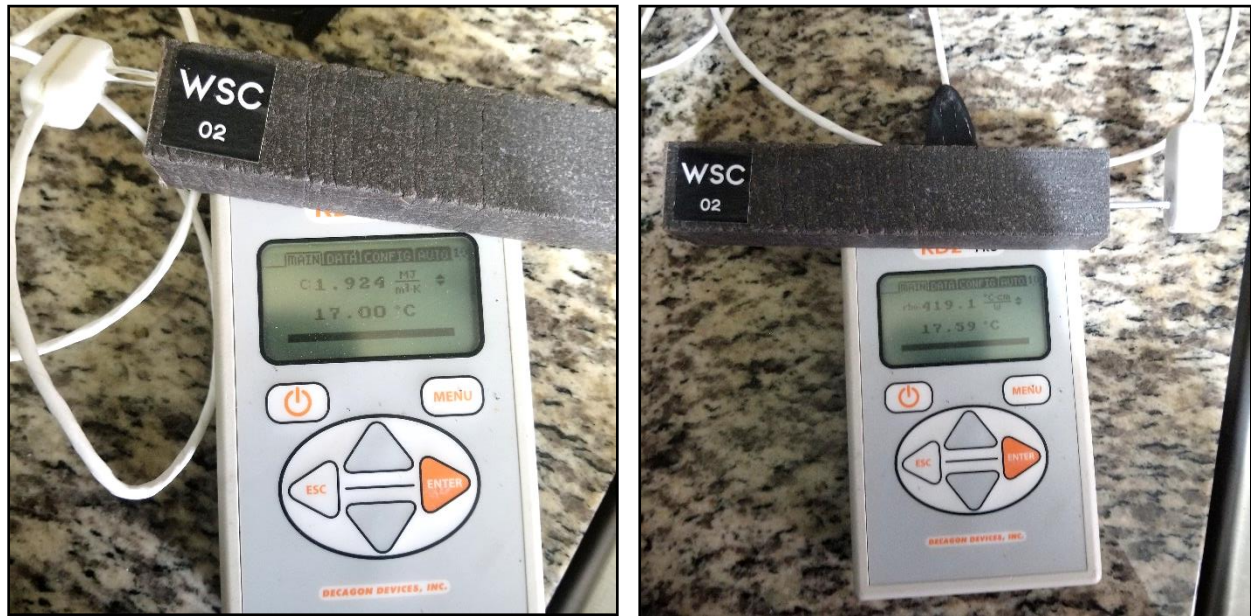
El análisis de las propiedades térmicas de los materiales se realizó mediante el método de fuente de línea transitoria o sonda de aguja. El instrumental que se utilizó es el KD2 Pro y dos de sus cuatro sondas: **TR-1** y **SH-1**. Las sondas RK-1 (diseñadas para concreto y roca) y KS-1 (diseñada para líquidos de baja y alta viscosidad, así como para materiales aislantes), no fueron requeridas en este experimento.

Selección de sonda. Todos los materiales fueron analizados con la sonda de doble aguja (**SH-1**), y con la sonda adecuada de acuerdo con la conductividad térmica esperada obtener — conforme a los rangos de conductividad térmica encontrados en la literatura— y a lo estipulado

en el manual de operación del equipo. Para fines de este experimento, la segunda sonda fue la **TR-1** —sonda óptima para la obtención de conductividad térmica—.

Inserción de sonda. Se insertó por completo la sonda en cada oquedad previamente perforada y rellena de pasta térmica. Insertada la sonda, se dejó en reposo por 15 minutos hasta lograr un equilibrio térmico entre la sonda y el compuesto. En los casos en que se requirió realizar nuevamente la prueba, se dio un tiempo de 15 minutos entre lecturas para estabilizar la temperatura entre la sonda y el material.

Figura 70. A la izquierda. Inserción de sonda SH-1 por uno de los extremos del espécimen WSC-02. A la derecha. Inserción de sonda TR-1 por el otro extremo del espécimen WSC-02.



Tiempo de lectura. El tiempo de lectura recomendado para las sondas de acuerdo con el manual de operaciones del KD2 PRO es de 10 minutos. El tiempo de lectura de las propiedades térmicas fue el tiempo recomendado por el fabricante del instrumental, 10 minutos para sonda TR-1, y 10 minutos para sonda SH-1.

4.2.8. Cálculo

El método para determinar la conductividad térmica mediante una fuente de línea transitoria consiste en una sonda de aguja de doble función que emite pulsos electromagnéticos (calor), que a su vez cuenta con un sensor de temperatura. Un dispositivo controlador al que se conecta la sonda monitorea la temperatura del sensor en un lapso de tiempo. El dispositivo controlador del *KD2 Pro* utiliza algoritmos especiales para analizar las lecturas registradas durante el intervalo de calentamiento (emisiones de pulsos electromagnéticos) y enfriamiento. El instrumento utiliza dos diferentes algoritmos; uno para la sonda de doble aguja, y otro para el sensor de aguja sencilla. La información presentada en este apartado fue obtenida directamente del manual de operaciones del analizador térmico *KD2 Pro*.

p. | 155

Algoritmo de la sonda de doble aguja. Calor es aplicado a la aguja calentada durante un tiempo de calentamiento establecido, t_h , y la temperatura se mide en la aguja de monitoreo. Las lecturas se procesan restando la temperatura ambiente en el tiempo 0, multiplicando por 4π y dividiendo por el calor por unidad de longitud, Q . Los datos resultantes se ajustan a las siguientes ecuaciones utilizando un procedimiento de mínimos cuadrados no lineal.

$$T^* = b_0 t + b_1 Ei \frac{b_2}{t} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$T^* = b_0 t + b_1 \left\{ Ei \frac{b_2}{t} - Ei \left[\frac{b_2}{t - t_h} \right] \right\} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

$$T^* = \frac{4\pi(T - T_0)}{Q} \quad (\text{Ec. 7})$$

Aquí, Ei es la integral exponencial, y b_0 , b_1 y b_2 son las constantes que se deben ajustar. T_0 es la temperatura al comienzo de la medición y Q es la entrada de calor. La primera ecuación se aplica durante los primeros segundos, mientras el calor está encendido. La segunda ecuación

se aplica cuando el calor está apagado. La conductividad y difusividad térmica se calculan con las siguientes dos ecuaciones.

$$\lambda = \frac{1}{b_1} \quad (\text{Ec. 8})$$

p. | 156

$$D = \frac{r^2}{4b_2} \quad (\text{Ec. 9})$$

Algoritmo de la sonda. Calor es aplicado a una sola aguja durante un tiempo establecido, t_h , y la temperatura se controla en esa aguja durante el calentamiento y durante un tiempo adicional igual a t_h después del calentamiento. La temperatura durante el calentamiento se calcula a partir de la siguiente ecuación.

$$T = m_0 + m_2 t + m_3 \ln t \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde m_0 es la temperatura ambiente durante el calentamiento, m_2 es la tasa de deriva de temperatura de fondo, y m_3 es la pendiente de una línea que relaciona el aumento de temperatura con el logaritmo de temperatura. La siguiente ecuación representa el modelo durante el enfriamiento.

$$T = m_1 + m_2 t + m_3 \ln \frac{t}{t - t_h} \quad (\text{Ec. 11})$$

La conductividad térmica se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{q}{4\pi m_3} \quad (\text{Ec. 12})$$

4.2.9. Presentación de resultados

Los resultados presentados en el próximo capítulo comprenden el cálculo de:

- 1) Densidad, kg/m^3
- 2) Conductividad térmica, $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$

- 3) Resistividad térmica, $(m \cdot K)/W$
- 4) Calor específico volumétrico, $MJ/(m^3 \cdot K)$
- 5) Difusividad térmica, mm^2/s
- 6) Desviación estándar, σ
- 7) Intervalo de confianza (C.I.)
- 8) Límite superior e inferior de propiedades (rango)

Todos los resultados se presentan en **Unidades del Sistema Internacional**. Se presenta una **tabla** y una **gráfica de barras** por propiedad termofísica. Todas las propiedades cuentan con un cálculo de intervalo de confianza (C.I.), para poder reconocer el rango de confianza en el que se presenta la media del material.

Densidad (ρ). La densidad se presentó en kg/m^3 .

Conductividad Térmica (λ). Esta propiedad fue capturada de los resultados presentados con la utilización de la sonda TR-1 del conductímetro KD2 PRO. La conductividad térmica se presentó en $W/(m \cdot K)$.

Resistividad Térmica (Rho). Al ser la resistencia térmica una magnitud inversa de la conductividad térmica, esta se calculó al dividir $1/\lambda$. Esta propiedad se presentó en $(m \cdot K)/W$.

Calor específico volumétrico (VCp). Esta propiedad fue capturada de los resultados presentados con la utilización de la sonda SH-1 del conductímetro KD2 PRO. El calor específico volumétrico se presentó en $MJ/(m^3 \cdot K)$.

Difusividad térmica (D). Al ser la difusividad térmica un valor que se obtiene al dividir la conductividad térmica (λ) entre el calor específico volumétrico (VCp) del mismo, esta propiedad se calculó conforme al apartado 2.2.4. Propiedades térmicas de los materiales (ver p. 51). Esta propiedad es también proporcionada por la utilización de la sonda SH-1 del conductímetro KD2

PRO; sin embargo, su cálculo se hace con el resultado de λ obtenido por la misma sonda (SH-1), y de acuerdo con el manual de operaciones del instrumental, es la sonda TR-1 la óptima para determinar el valor de λ . Por lo anterior, esta propiedad se calculó mediante la fórmula: λ/V_{cp} , donde λ se obtuvo de la sonda **TR-1** y V_{cp} de la sonda **SH-1**. La difusividad térmica se presentó en mm^2/s .

Desviación estándar de la muestra (σ). Al ser una medida del grado de dispersión (separación) de los datos con respecto al valor promedio, esta medida funcionó para calcular el intervalo de confianza de la media.

Intervalo de confianza de la media (C.I.). Esta medida representa los valores extremos (límites) de confianza de la media, por lo que la implicación estadística de este intervalo se refiere a que si se repite un experimento n cantidad de veces, los nuevos valores deberán encontrarse dentro del intervalo de confianza (C.I.) (Verma, 2016). Esta medida funcionó para estimar el rango (límite superior e inferior) de las propiedades termofísicas, con un nivel de confianza del 95%.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

Los resultados de esta investigación se presentarán en el orden y conforme a los dos procesos del CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.

p. | 159

1. **Especímenes** (superficie de muestras y sección transversal)
2. **Caracterización termofísica** (propiedades físicas y térmicas)

5.1. SUPERFICIE Y SECCIÓN TRANSVERSAL DE ESPECÍMENES

En este subcapítulo se muestran gráficos tanto de la **superficie**, como de la **sección transversal** de los especímenes desarrollados en el subcapítulo 4.1. DESARROLLO DE ESPECÍMENES. Este apartado permite reconocer el acabado superficial de los materiales (color, textura, y estado general de la superficie). Asimismo, permite hacer una inspección visual de la sección transversal de los materiales, para poder tener una referencia respecto a la calidad de la mezcla, la distribución de la misma, y espacios de aire creados al interior de algunos especímenes. La aparición de las muestras será conforme al apartado 4.1.7. Diseño de especímenes (ver p. 133).

Figura 71. RPP. Superficie y sección transversal de material.

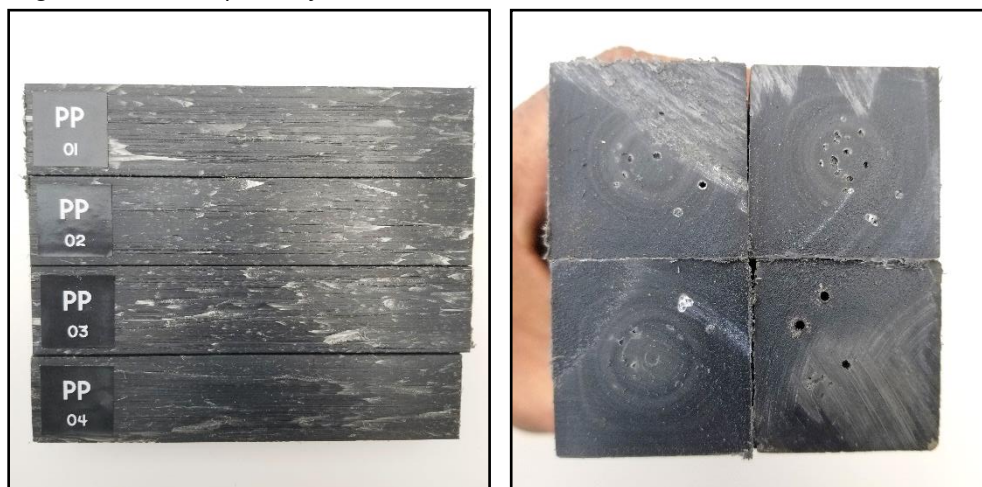


Figura 72. C16. Superficie y sección transversal de material.



Figura 73. C33. Superficie y sección transversal de material.



Figura 74. C50. Superficie y sección transversal de material.

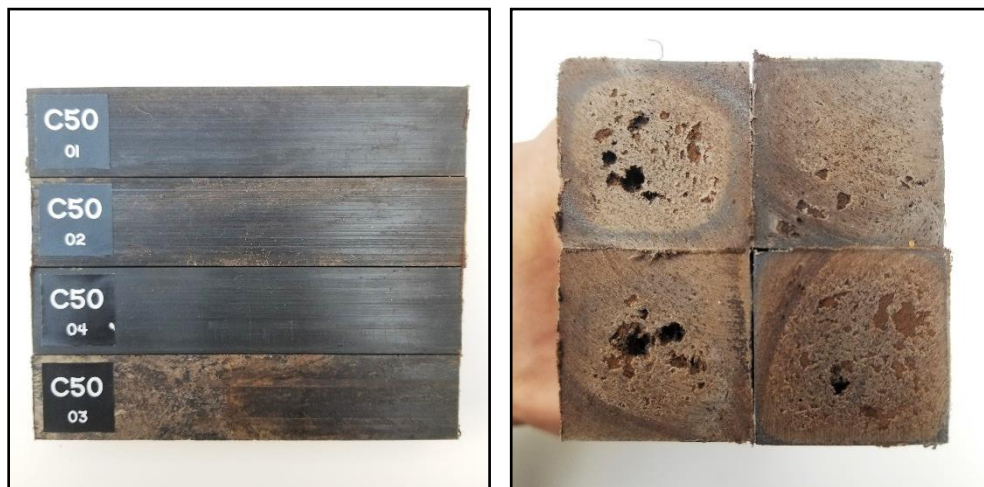


Figura 75. W16. Superficie y sección transversal de material.



Figura 76. W33. Superficie y sección transversal de material.

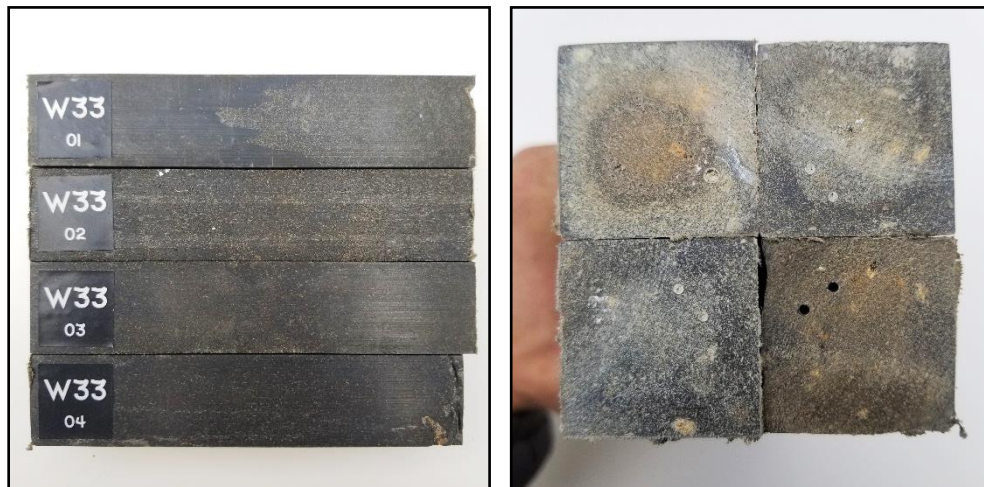


Figura 77. W50. Superficie y sección transversal de material.

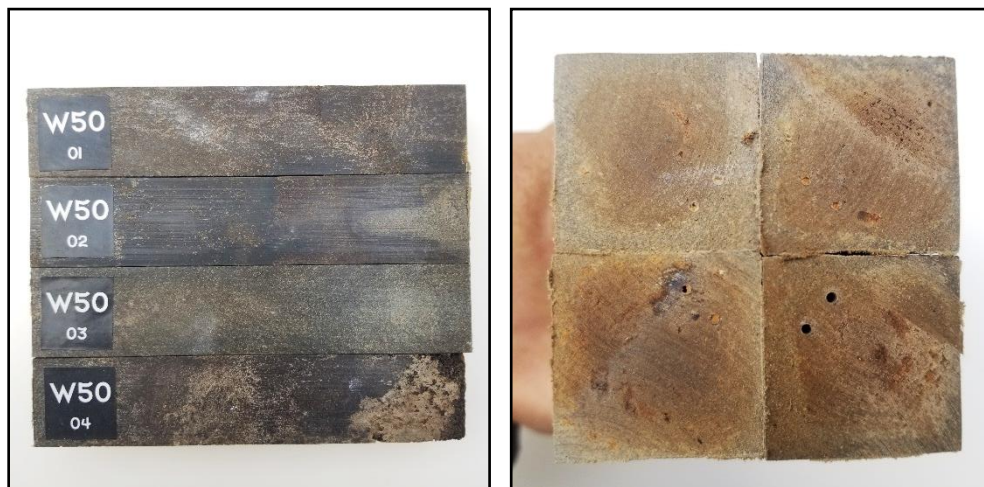


Figura 78. S16. Superficie y sección transversal de material.

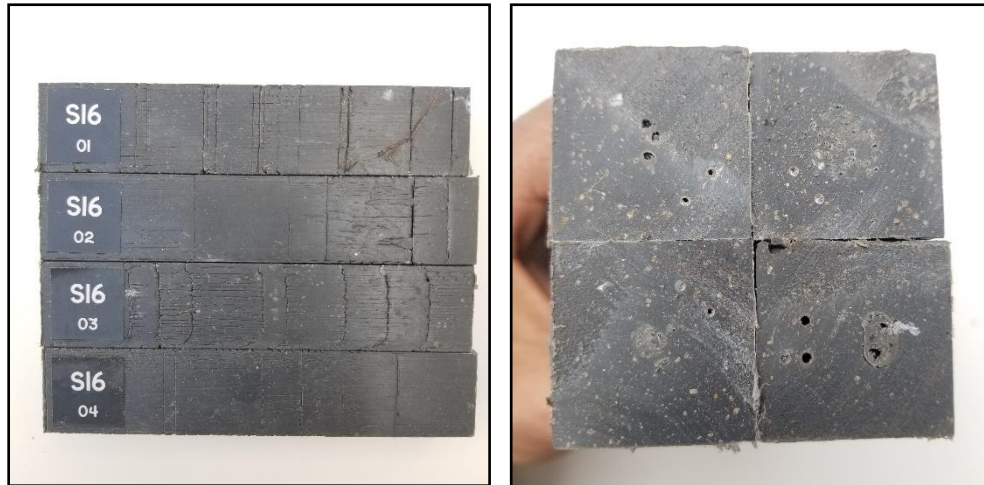


Figura 79. S33. Superficie y sección transversal de material.

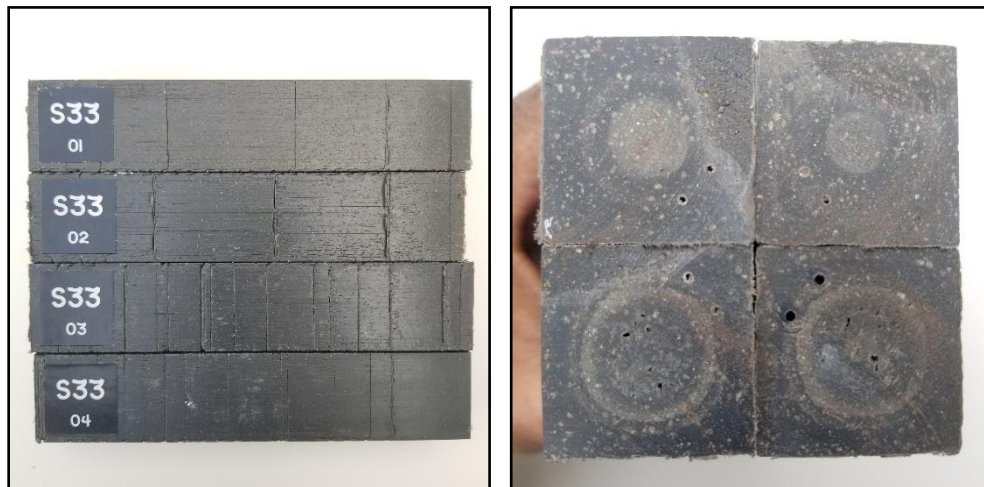


Figura 80. S50. Superficie y sección transversal de material.

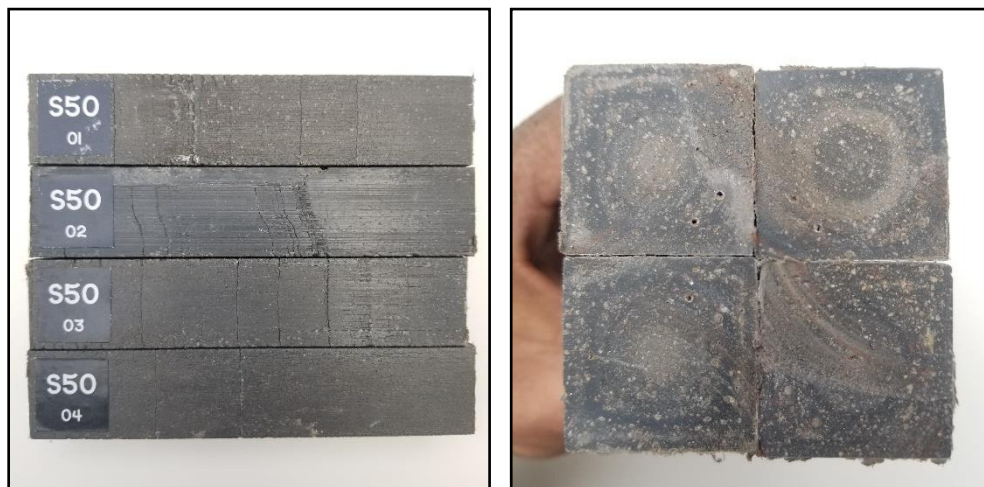


Figura 81. WSC. Superficie y sección transversal de material.



En general, el método de extrusión de plástico y la máquina desarrollada para fines de esta investigación desarrollaron especímenes con un nivel de calidad satisfactorio. No obstante, en el proceso de desarrollo de especímenes existieron múltiples variables que influyeron en la unidad de análisis, **el espécimen** (ver 4.1. DESARROLLO DE ESPECÍMENES, p. 120).

5.1.1. Superficie de especímenes

Todas las muestras presentaron ligeras irregularidades en la superficie. Las muestras con PP al 100 m% fueron las únicas que presentaron una superficie prácticamente en su totalidad lisa. Las muestras con café también presentaron una superficie mayormente lisa, con excepción de la muestra con 33.3 m% de café. Las muestras con madera presentaron una superficie mayormente lisa, pero fue muy notorio la presencia de partículas de madera, estuvo se pudo deber al hecho de que las muestras con madera fueron las que contuvieron mayor porcentaje en volumen del material de relleno. Todas las muestras con tierra presentaron aparentes fracturas.

5.1.2. Sección transversal de especímenes

La primera observación —que fue prácticamente un común denominador en la mayoría de las muestras—, en la sección transversal de los especímenes se puede apreciar un círculo al interior de la sección transversal-cuadrangular en el que se aprecia una mayor concentración de materiales al centro (dentro del círculo) y una mayor concentración de polipropileno (PP) en los extremos (fuera del círculo). Lo anterior pudo haber sido ser efecto de la presión que genera la extrusora al estar relleno el molde, y forzar al material en estado entre sólido y líquido —el polipropileno— a ocupar los espacios más complicados de rellenar —las esquinas de la sección cuadrada del molde—. Esta hipótesis parte del hecho de que los materiales de relleno —café, madera y tierra— no sufrieron un cambio de fase del sólido al líquido, mientras que el PP sí. Sin embargo, la muestra de RPP también mostró un patrón similar (ver Figura 71, p. 159).

p. | 164

La segunda observación, visualmente se aprecian **espacios de aire (poros)** al centro de las muestras. Esta situación se presentó de manera más notoria en los compuestos con café, siguiendo la lógica: entre mayor porcentaje de café, mayor porosidad al centro de la sección. Una primera hipótesis, es que la extrusora desarrollada para esta investigación carece de una válvula de liberación de presión (aire) en la punta de la máquina —previo al llenado del material en el molde—, y que cualquier cantidad de aire ya sea dentro de alguno de los materiales o debido al movimiento rotatorio de la extrusora, haya incorporado partículas de aire hacia el interior del molde.

Una segunda hipótesis es que los materiales pudieron haber sido ingresados a la extrusora conteniendo algún porcentaje de humedad. Primeramente, se observaron pequeñas explosiones de gases en lapsos variados durante el proceso de desarrollo de muestras. Asimismo, es importante mencionar que las muestras fueron realizadas en un ambiente con una humedad relativa en un rango entre 54 y 86%. En este sentido, y debido a que la extrusora no

es hermética, ni los materiales fueron colocados en recipientes herméticos entre el proceso de deshidratación y el proceso de creación de muestra, existe la posibilidad que los rellenos hayan absorbido humedad. Lo anterior pudo haber influido en el proceso, ya que como menciona Chuang et al. (2015), **los aumentos en el contenido de humedad del filamento pueden afectar las características de flujo del polímero extruido y los aumentos en la porosidad.**

De acuerdo con Sormunen (2019), otra posible solución **para lograr una mejor aglomeración de los materiales y evitar el agrupamiento de material de relleno y la presencia de poros**, puede ser con una **previa mezcla en caliente de los materiales con el objetivo de lograr una mejor dispersión de los mismos.**

5.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y TÉRMICAS DE COMPUESTOS PLÁSTICOS

Este subcapítulo presenta las propiedades termofísicas de los especímenes analizados en el subcapítulo 4.2. ANÁLISIS TERMOFÍSICO DE ESPECÍMENES. Se obtuvieron propiedades físicas y térmicas, mismas que se muestran a continuación:

- 1) Densidad, kg/m^3
- 2) Conductividad térmica, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
- 3) Resistividad térmica, $(\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}$
- 4) Calor específico volumétrico, $\text{MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$
- 5) Difusividad térmica, mm^2/s

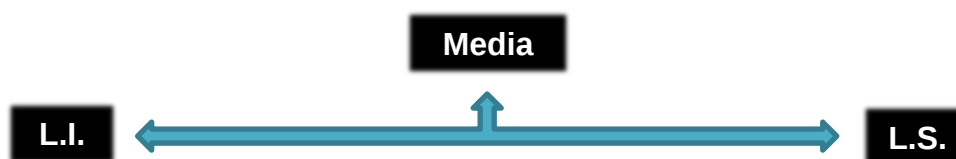
Se realizó un análisis estadístico con el objetivo de estimar la **media** (promedio) por propiedad, así como un **límite inferior (L.I.)** y un **límite superior (L.S.)**. Para ello, se utilizó un **intervalo de confianza (C.I.)** con un nivel de confianza del **95%**. Los resultados de las pruebas termofísicas se muestran en el **Apéndice A**.

5.2.1. Adecuación de propiedades termofísicas

Previo a entrar en materia de **análisis** e **interpretación** de las propiedades presentadas en este subcapítulo, es necesario definir sobre **qué propiedades** se va a reflexionar. El proceso metodológico para obtener las propiedades físicas y térmicas estuvo fundamentado en normas y estándares que implicaron el desarrollo y análisis de un número (n) de muestras $\geq$ tres unidades. Lo anterior requirió de un ejercicio estadístico para poder ponderar los valores obtenidos por muestra. Esto a su vez arrojó distintos valores por propiedad: **media** (promedio), un **límite inferior** (L.I.) y un **límite superior** (L.S.).

p. | 166

Figura 82. Esquema de media, L.I. y L.S.

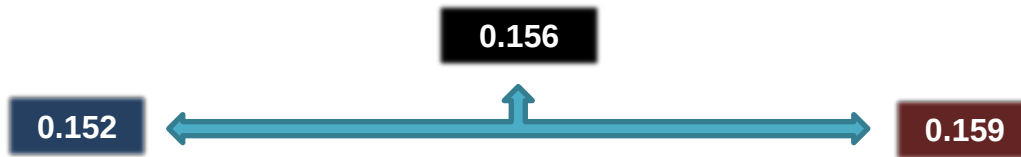


Luego entonces, surgió nuevamente la pregunta: **¿Sobre qué propiedades se va a reflexionar?**

Para poder responder esta pregunta, fue necesario plantearse una segunda pregunta: ¿Cuál es el **peor escenario** en donde **la propiedad** del material **aporta** a la **problemática** en cuestión, en términos de **eficiencia energética**?

La respuesta para cada material es diferente, por lo que, para poder ilustrar mejor el cuestionamiento, tomaremos como ejemplo la **conductividad térmica (λ)** de la muestra **C50**. El promedio de la muestra elaborada con residuos de café y polipropileno con relación en masa 1:1 fue de: 0.156 W/(m·K), L.I. y L.S. fueron de 0.152 y 0.159 W/(m·K), respectivamente (ver Figura 83.).

Figura 83. Conductividad media, L.I. y L.S. de la muestra C50.



Al ser la **conductividad** una magnitud de medición que nos permite conocer la **capacidad** que tiene un **material de conducir calor**, podemos decir que entre mayor sea λ , mayor será la magnitud del flujo de calor. Si se busca **incrementar** el **retraso térmico** (Δt) y **reducir** el factor de **decremento térmico** (ΔT) de los materiales, se buscaría asimismo tener un material con un flujo de calor bajo y lento, es decir, una conductividad baja (escenario favorable). Con lo argumentado hasta el momento, podemos decir entonces que el **límite superior (L.S.)** en la **conductividad térmica** del material es el **peor escenario**. Por lo anterior, el valor que se seleccionó para λ es el límite superior (L.S.) en todos los materiales.

Otra manera de poder entender que valor del rango elegir es: seleccionar el límite contrario (u opuesto) al valor que mejor responde a la problemática en cuestión. Con esto estaríamos estadísticamente asegurando que si trabajamos con cualquier otro valor dentro de los límites inferior y superior, el material solo se podría comportar en mejor medida con respecto a la problemática en cuestión.

Para la **resistividad térmica (Rho)**, al ser la capacidad que presenta un material a oponerse al flujo de energía, se seleccionó el límite inferior (L.I.). En el **calor específico volumétrico (VCp)**, al poder interpretarse como la capacidad de un cuerpo para almacenar calor, su valor fue el presentado en el límite inferior (L.I.). Para el caso de la **difusividad térmica (D)**, al ser un indicador que expresa la velocidad de cambio y flujo de temperaturas en un material, L.S. fue la propiedad seleccionada. El valor de **densidad (ρ)**, —al igual que en la conductividad— fue el límite superior (L.S.) conforme al análisis de 89 materiales del CAPÍTULO 3. ESTADO DEL

ARTE, en el que se observa una relación entre λ y ρ ; en donde se aprecia que: **a mayor densidad, mayor conductividad** (ver Figura 26 y Figura 27, p. 113-114). También fue seleccionado L.S. para ρ por la influencia que tiene esta en la estructura de las envolventes.

La Tabla 8 presenta la **adecuación** de propiedades termofísicas de los materiales desarrollados en esta investigación conforme a lo ya estipulado. Dicha tabla tiene como propósito poder **comparar** los **materiales** desarrollados entre sí, con una **perspectiva** de **eficiencia térmico-energética**. Asimismo, tiene por objetivo el poder determinar un **valor único por propiedad** para el desarrollo de la **simulación térmico-energética** en el software *OPAQUE 3.0*. Para efectuar la simulación, dicho programa solicita propiedades como: **densidad**, **conductividad** y **calor específico (Cp)** en $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Por lo anterior y debido a que se conoce la densidad (ρ) y el calor específico volumétrico (VCp), Cp fue calculado conforme a lo descrito en 2.2.4. Propiedades térmicas de los materiales (ver p. 51), donde, **$\text{VCp} = \rho \cdot \text{Cp}$** , por consiguiente, **$\text{Cp} = \text{VCp}/\rho$** .

Se anexan a la Tabla 8 valores **únicamente de referencia** para poder tener un punto de contraste, primeramente, para comparar la muestra de polipropileno reciclado (RPP) con la de la literatura, segundo, para poder comparar el compuesto plástico desarrollado con el material matriz (PP), y el relleno (material y/o residuo). Para el caso del polipropileno de referencia (**P_{ref}**), se recurrió a las propiedades de la ISO 10456. Para el café de referencia (**C_{ref}**) a lo postulado por Cardoso (2018). Para el caso de la madera (**W_{ref}**) y suelo de referencia (**S_{ref}**), se utilizaron los valores de los materiales analizados en otros estudios de caracterización termofísica en el transcurso de los estudios de maestría (ver 4.1.3. Materiales, p. 126).

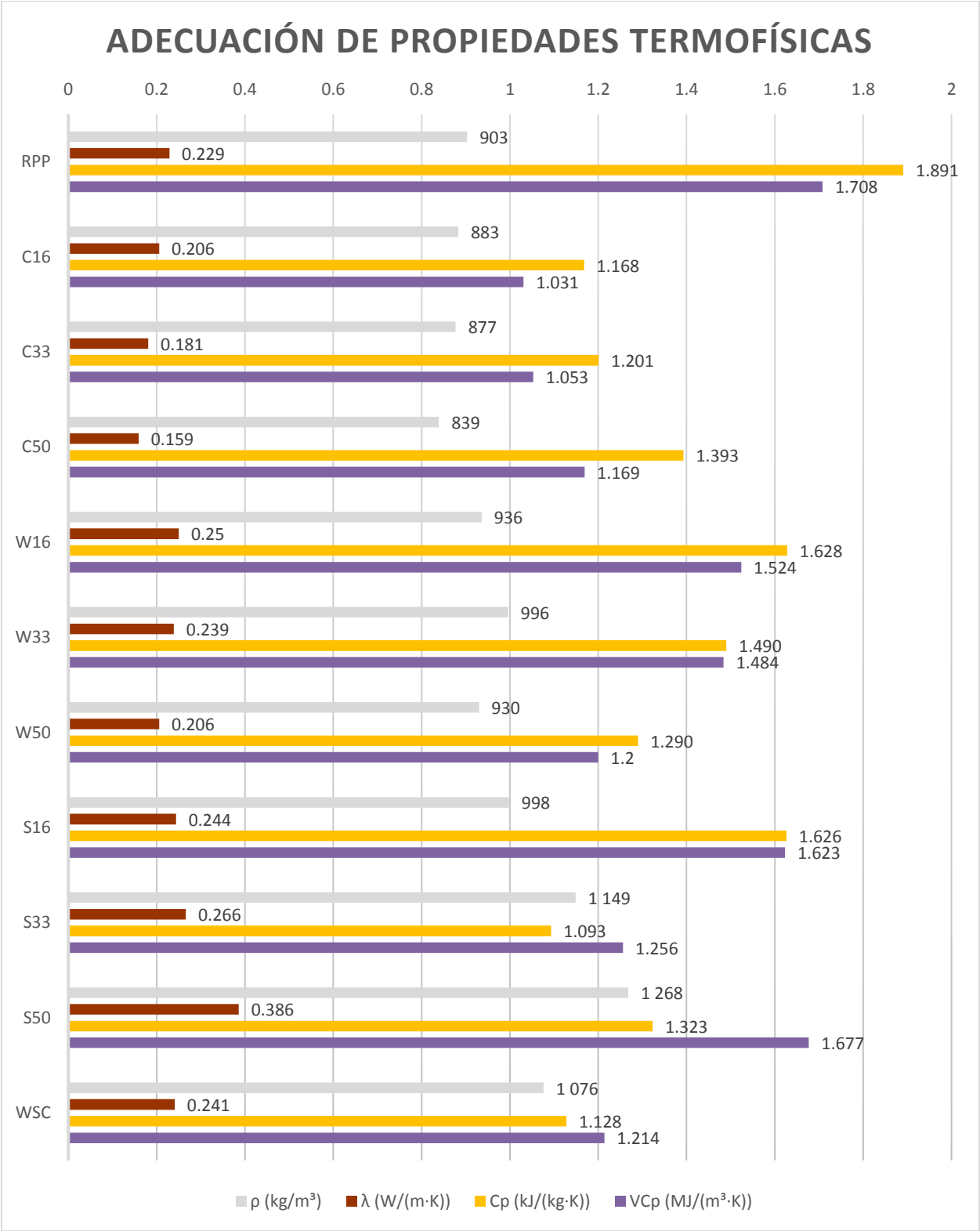
La Figura 84 presenta una gráfica de barras con las propiedades (densidad, conductividad y calor específico) ajustadas de los materiales desarrollados en esta investigación.

Tabla 8. Adecuación de propiedades termofísicas de compuestos y materiales de referencia.

Código	ρ (kg/m ³)	λ (W/(m·K))	Rho ((m·K)/W)	VCp (MJ/(m ³ ·K))	Cp (kJ/(kg·K))	D (mm ² /s)
P ref	910	0.22	-	1.638 *	1.800	-
C ref	368	0.112	-	0.333 *	0.905	-
W ref	477	0.104	-	0.483	1.013 *	-
S ref	1 769	0.63	-	1.72	0.972 *	-
RPP	903	0.229	4.359	1.708	1.891 *	0.128
C16	883	0.206	4.784	1.031	1.168 *	0.183
C33	877	0.181	5.527	1.053	1.201 *	0.141
C50	839	0.159	6.274	1.169	1.393 *	0.135
W16	936	0.25	3.994	1.524	1.628 *	0.163
W33	996	0.239	4.183	1.484	1.490 *	0.155
W50	930	0.206	4.848	1.2	1.290 *	0.165
S16	998	0.244	4.103	1.623	1.626 *	0.14
S33	1 149	0.266	3.754	1.256	1.093 *	0.207
S50	1 268	0.386	2.437	1.677	1.323 *	0.212
WSC	1 076	0.241	4.135	1.214	1.128 *	0.177

Nota. Los valores (P ref), (C ref), (W ref), (S ref), son únicamente de referencia. Los valores (-) no fueron capturados o reportados. Los valores (*) fueron calculados. El restante de los valores fueron obtenidos en esta investigación, y fueron adecuados para una comparación con enfoque térmico-energético.

Figura 84. Gráfica de adecuación de propiedades termofísicas de compuestos plásticos.



5.2.2. Interpretación de propiedades termofísicas

Como ya fue descrito en el previo subcapítulo (5.1. SUPERFICIE Y SECCIÓN TRANSVERSAL DE ESPECÍMENES), en la creación de las muestras intervinieron múltiples de variables. La suma de todas las variables influyó en el desarrollo de especímenes —unidad de análisis—, y al mismo tiempo repercutieron en las propiedades termofísicas obtenidas. Entre estas variables destacan la presencia de **espacios de aire** al interior de algunas muestras y **concentración de material de relleno**. De acuerdo con Sormunen (2019), la **porosidad** y el **agrupamiento de material** de relleno son de las **principales causas** en la **variación** de los **resultados** (propiedades).

p. | 171

5.2.3. Densidad (ρ)

En general, la tierra aumentó la densidad de RPP hasta en un 40.42%, los compuestos plásticos con madera presentaron densidades similares, y el café redujo ρ hasta en un 7.09%. Todas las muestras con tierra aumentaron la densidad, siendo la muestra con 50 m% (S50) la mayor con 1268 kg/m³. Por otro lado, todas las pruebas con café presentaron densidades menores a RPP, siendo C50 la menor con 839 kg/m³.

5.2.4. Conductividad térmica (λ)

La conductividad siguió una tendencia similar a la de la densidad, es decir, si λ disminuyó, ρ también y viceversa. Todas las muestras con tierra aumentaron λ , siendo S50 la mayor con 0.386 W/(m·K), un aumento del 68.56%. En contraste, todas las pruebas con café presentaron densidades inferiores que la muestra polimérica, siendo C50 la menor con 0.159 W/(m·K), una disminución del 30.57%. Las muestras con madera presentaron valores de λ similares que RPP, ± 0.02 W/(m·K).

5.2.5. Resistividad térmica (Rho)

Al ser una magnitud inversa a la conductividad, los valores de Rho fueron inversamente proporcionales a los de λ . Destaca la muestra C50 con un aumento del 43.93% ($6.274 \text{ (m}\cdot\text{K)/W}$) y S50 con una disminución del 44.09%.

5.2.6. Calor Específico Volumétrico (VCp)

La primera observación en esta propiedad es que, con respecto al VCp de RPP ($1.708 \text{ MJ/(m}^3\cdot\text{K)}$), todas las muestras presentaron calores específicos volumétricos inferiores. Las muestras con magnitudes menores fueron las tres de café con una disminución de 31.56-39.64% ($1.031\text{-}1.169 \text{ MJ/(m}^3\cdot\text{K)}$). Las muestras con VCp cercanos al del RPP fueron S13 y S50 con 1.623 y $1.677 \text{ MJ/(m}^3\cdot\text{K)}$, respectivamente. Esto último fue algo no esperado pues el material de tierra 100 m% meses antes había presentado un VCp de $1.72 \text{ MJ/(m}^3\cdot\text{K)}$.

5.2.7. Difusividad térmica (D)

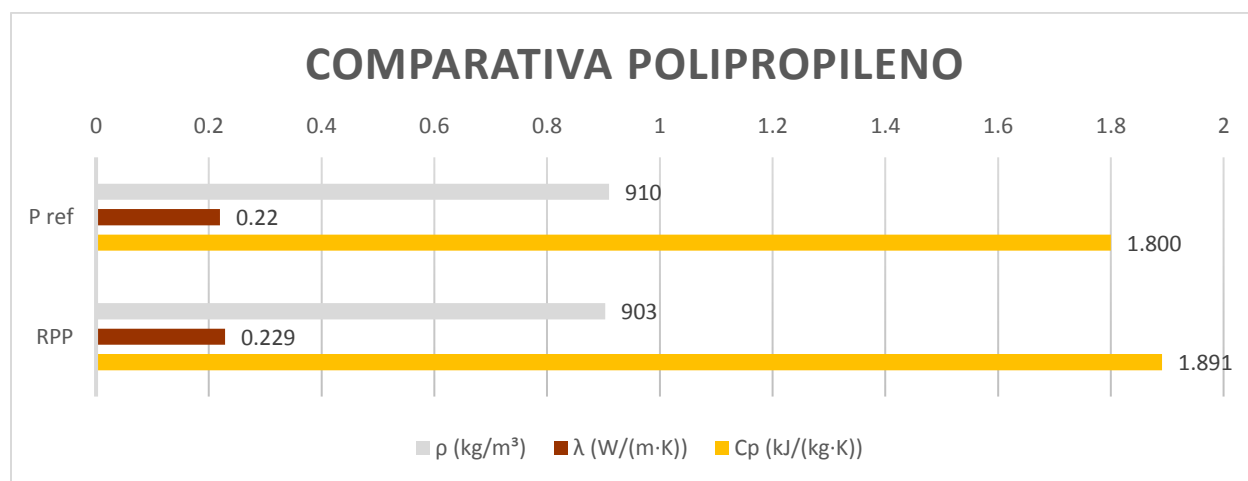
Esta propiedad siguió una tendencia similar al calor específico volumétrico, pero en sentido inverso. Es decir, los valores de todas las muestras se encontraron por encima de la muestra con 100 m% de polipropileno reciclado ($0.128 \text{ mm}^2/\text{s}$). La muestra cercana a RPP fue C50 con un aumento de 5.47% ($0.135 \text{ mm}^2/\text{s}$), seguido por S16 y C33 con 0.14 y $0.141 \text{ mm}^2/\text{s}$, respectivamente. La muestra S50 fue la que presentó la mayor magnitud con un aumento del 65.63% ($0.212 \text{ mm}^2/\text{s}$).

5.2.8. Comparativo de muestras

La Figura 85 presenta el comparativo entre la muestra de referencia que se hizo con polipropileno reciclado (RPP) y las propiedades de referencia del PP (P ref) de la ISO 10456. Figura 86, Figura 87, Figura 88 presentan una comparativa de propiedades termofísicas de la matriz (RPP), el material o residuo que se usó (como valores de referencia, C ref, W ref, S ref), y los materiales desarrollados con residuos de café (C16, C33, C50), residuos de madera (W16, W33, W50) y suelo (S16, S33, S50).

p. | 173

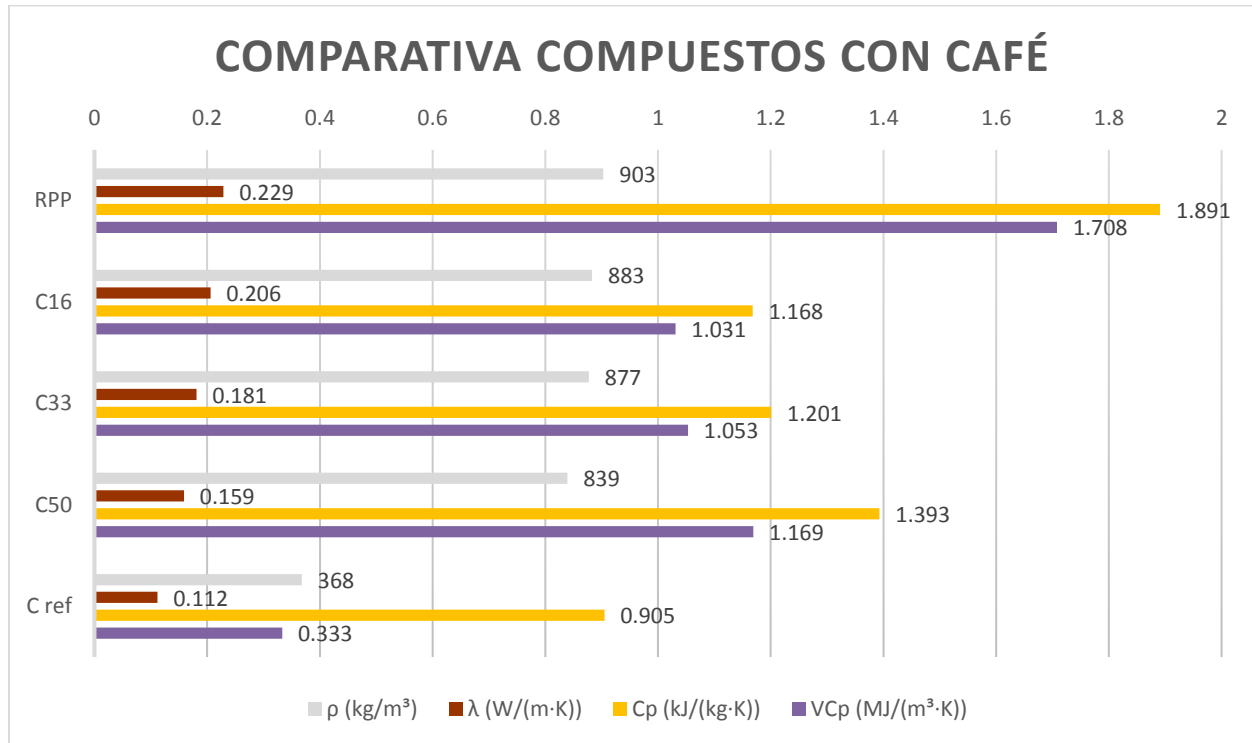
Figura 85. Gráfica comparativa PP de referencia (P ref) y PP reciclado (RPP).



Para poder tener un parámetro cualitativo que ayudara a valorar la calidad de las muestras, se elaboró una muestra de referencia con 100% de polipropileno reciclado (RPP). Al comparar los resultados de las propiedades termofísicas del RPP con las de la literatura, se pudo observar que las propiedades fueron prácticamente idénticas (ver Figura 85 p. 173). De acuerdo con la ISO 10456, el polipropileno (PP) presenta una conductividad térmica (λ) de **0.220 W/(m·K)**, calor específico (C_p) de **1.800 kJ/(kg·K)** y densidad (ρ) de **910 kg/m³**. En contraste, RPP arrojó valores de λ y C_p 4.09 y 5.08% por encima y ρ 0.77% por debajo (**0.229 W/(m·K)**, **1.891 kJ/(kg·K)**, **903 kg/m³**, respectivamente).

5.2.9. Compuestos plásticos con café

Figura 86. Gráfica comparativa compuestos plásticos con café.

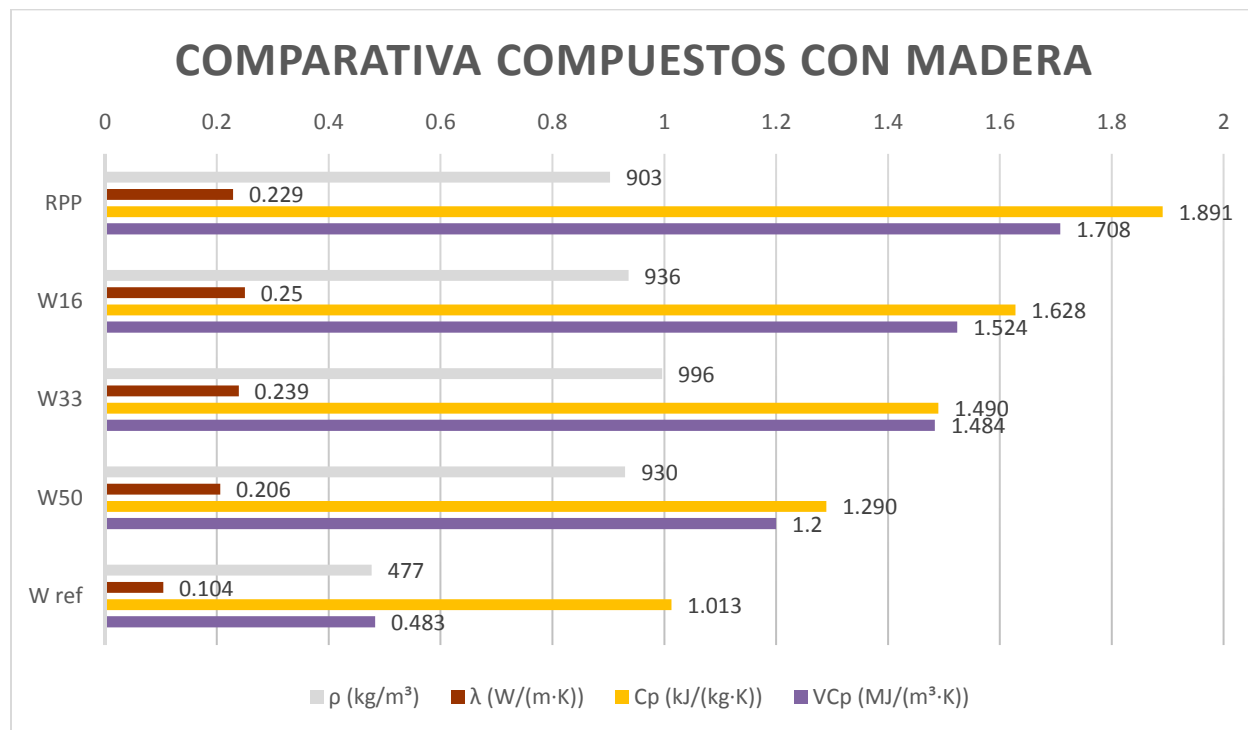


p. | 174

La incorporación de residuos de café ha comprobado reducir la conductividad térmica de algunos materiales constructivos (Eliche-Quesada et al., 2011; Velasco et al., 2016; Lachheb et al., 2019). No fue la excepción en las muestras con polipropileno y café (C16, C33, C50). Como se puede apreciar en la Figura 86, a mayor porcentaje de café en masa, menor conductividad en el compuesto —misma situación con la densidad—. No obstante, la adición de café también redujo el calor específico volumétrico considerablemente —hasta un 39.64%—.

5.2.10. Compuestos plásticos con madera

Figura 87. Gráfica comparativa compuestos plásticos con madera.



p. | 175

Una primera hipótesis con esta combinación de materiales era que la baja conductividad de la madera reduciría la conductividad del compuesto considerablemente. No fue así. Esto se puede deber a que los valores de la muestra de referencia de la madera (ver 4.1.3. Materiales, p. 126) fueron obtenidos en su estado natural, es decir, en el estado en el que se encuentra la madera en la naturaleza.

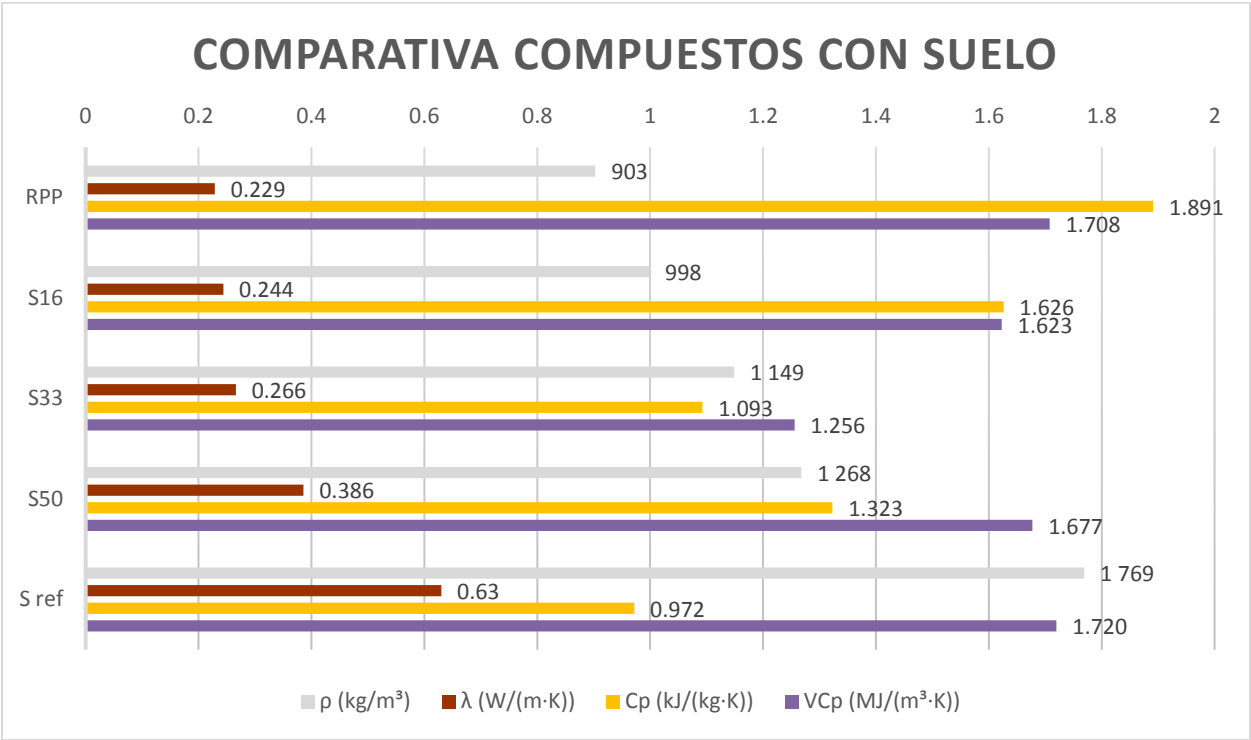
Para ilustrar esta situación, podemos hacer una analogía con el poliestireno (PS) y el poliestireno expandido (EPS). La conductividad del EPS de acuerdo con el software de simulación HTflux es de 0.036 W/(m·K) — ρ : 25 kg/m³—, pero esto se debe a que el material en esa configuración: **expandido**, es 95-98% aire; ya que la conductividad del PS en su estado natural (sólido) oscila entre 0.1 y 0.13 W/(m·K) — ρ : 1050 kg/m³— (Goodfellow, n.d.). Una

situación similar podría suceder con la madera que, al estar compuesto por fibras naturales, presenta espacio de aire al interior.

A diferencia de los compuestos con café y tierra, los de madera presentaron propiedades termofísicas variadas y que prestan a la especulación. La adición de madera, primero aumentó la conductividad y la densidad —caso W13 y W33—, pero después λ descendió exponencialmente en W50 quedando incluso por debajo de la muestra de referencia (RPP) (ver Figura 87, p. 175). Una hipótesis a esta situación es que pudo ser producto de un error sistemático a la hora del desarrollo de especímenes, de las múltiples variables que influyeron en el proceso de extrusión detallados en el subcapítulo anterior, o ambas. El calor específico volumétrico si disminuyó conforme el porcentaje de madera en masa aumentó.

5.2.11. Compuestos plásticos con suelo

Figura 88. Gráfica comparativa compuestos plásticos con suelo.



Caso contrario al material de relleno empleado en los compuestos plásticos con café, la adición de tierra en estas muestras aumento tanto la conductividad como la densidad. Destaca la reducción del calor específico volumétrico en todas las muestras, pese a tener tanto el polipropileno y la tierra VCp prácticamente iguales. Lo anterior se puede deber a la misma hipótesis planteada en los compuestos plásticos con madera refiriendo a la influencia en las propiedades debido a posibles espacios de aire al interior de los materiales; pero también se podría deber al hecho de que el material de referencia (S_{ref}) como ya fue mencionado, fue analizado térmicamente inmediatamente después de ser extraído a una profundidad de entre uno y dos metros —no se registró el porcentaje de agua que tuvo la muestra en ese momento, pero teniendo en cuenta que el VCp del agua a 10 °C es de 4.19 MJ/(m³·K), existe la posibilidad de que esta haya influido en las propiedades térmicas de la prueba de referencia al momento del análisis—.

Por otra parte, analizando el material de relleno —y no de la matriz termoplástica—, y pese a lo ya expuesto en el párrafo anterior; la Figura 88 muestra cómo la presencia del polipropileno al 50 m%, disminuye la conductividad de la tierra un 38.73%, pasando de 0.63 a 0.386 W/(m·K). Como se puede ver en 3.6.3. [S04] Compuestos de botellas de PET y tierra (p. 102), un material elaborado con tierra y PET en relación de masa 1:1 presentó un esfuerzo a la compresión (CS) de 117 kg/cm² (Solanki & Bhattarai, 2019), misma que es superior al mínimo necesario para tabiques de mamposterías estructurales conforme a la norma mexicana NMX-C-404-ONNCCE. Lo anterior, da apertura a una posible aplicación de este compuesto dentro de la envolvente arquitectónica como elemento de carga, a su vez, da apertura a futuras investigaciones en materia de análisis mecánico hacia un material con propiedades térmicas prometedoras.

5.2.12. Compuesto plástico con café, madera, y SUELO (WSC)

Esta muestra estuvo compuesta por PP al 50 m% y el porcentaje restante por los tres rellenos en proporciones iguales. Esta prueba sirvió como referencia para ver si el promedio del comportamiento de los tres compuestos plásticos desarrollados en esta investigación, se reflejó en un material que contuvo todos los materiales de relleno. Como se menciona en 5.2.3. Densidad (ρ), ésta **aumento considerablemente** con la adición de tierra, **se mantuvo** con la incorporación de madera, y se **redujo** ligeramente con café. Por lo tanto, se esperaba que la densidad de WSC **umentara ligeramente** con respecto a RPP. ¡Así fue!, WSC aumentó un 19.16%. Misma situación con la conductividad, la cual aumentó un 5.24%.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS TÉRMICO-ENERGÉTICO

El presente capítulo constituye un **análisis** de las **propiedades termofísicas** presentadas en el capítulo anterior (CAPÍTULO 5. RESULTADOS). El objetivo de este ejercicio consistió en poder entender como todas las propiedades de los materiales **interactúan entre sí**, para poder estimar como estos se comportarían al fungir como sistema constructivo.

p. | 179

La simulación térmico-energética se realizó mediante la utilización del software **OPAQUE 3.0**. Primeramente, se calculó el **valor-R** y **valor-U** de los **materiales desarrollados**. Para ello, se utilizó un archivo climático EPW generado en el software *Meteonorm*²² de la ciudad de Mexicali, Baja California. Por último, se realizó una simulación para estimar las **ganancias** y **pérdidas de calor** de los **materiales desarrollados** *versus* un material constructivo popular, **el block de concreto**. La capital bajacaliforniana fue seleccionada como sitio de estudio por tener un clima extremo con variaciones de temperaturas altas con respecto a otras ciudades del estado.

La temperatura media (T_{med}) anual de la ciudad de Mexicali, B.C. es de 25.0 °C, siendo **julio el mes más cálido** con una T_{med} de 35.2 °C, y **diciembre el más frío** con una T_{med} de 15.0 °C. Por lo tanto, según la ecuación lineal para definir la Temperatura Neutra (T_n) y el modelo para definir la Zona de Confort (ZC), ambos desarrollados por Auliciems y Szokolay (2007), la T_n anual es de 25.4 °C con un rango de aceptabilidad (ZC) entre los 22.9 °C y los 27.9 °C ($T_n \pm 2.5$ °C). Un análisis climático-bioclimático más completo de la ciudad de Mexicali, B. C. se muestra en el **Apéndice B**.

²² programa que permite generar archivos EPW mediante la interpolación de archivos climáticos cercanos al sitio del que se requiere información climática

6.1. INERCIA TÉRMICA DE MATERIALES

Definido el sitio de estudio, se estimó el **retraso** (Δt) y **decremento** (ΔT) térmico de los materiales desarrollados en esta investigación. Para ello, los datos presentados a continuación fueron registrados en el programa *OPAQUE 3.0* para cada uno de los materiales.

p. | 180

- Localización: **Mexicali, Baja California** (archivo climático EPW)
- Temperatura de confort al interior: **25 °C**
- Temperatura de invierno baja: **3.8 °C**
- Temperatura de verano alta: **44.2 °C**
- Orientación: **sur**
- Superficie: **muro**
- Espesor en muro: **0.15 m** (en todos los materiales)
- Inclinação de la superficie: **90°** (completamente vertical)
- Absortividad de la cara exterior de la superficie: **0.26**
- Reflectividad del terreno/elementos circundantes: **0.2**

Con el fin de tener un **material constructivo contemporáneo** que pudiera ayudar a contrastar los valores de los de los materiales desarrollados, se integró al presente análisis el **block de concreto relleno de 15 cm** (las propiedades termofísicas de este material fueron extraídas de *DOE-2.2*). Asimismo, se anexaron los materiales de referencia —café (**C_{ref}**), madera (**W_{ref}**), tierra (**S_{ref}**)— para robustecer la comparativa. El block de concreto quedó definido con el código: **BC_{ref}**. Para fines de este análisis —de carácter exclusivamente térmico—, **todos los materiales** fueron considerados como **muros de 0.15 m de espesor**.

La Tabla 9 presenta el **Valor-R**, **Valor-U**, decremento térmico (ΔT), y retraso térmico (Δt) de los compuestos plásticos desarrollados y los materiales de referencia. Los valores

presentados fueron calculados por *OPAQUE 3.0* mediante los valores obtenidos en 5.2.1. Adecuación de propiedades termofísicas (ver p. 166).

Tabla 9. Valor-R, Valor-U, ΔT , y Δt de compuestos y materiales de referencia.

Código	Espesor (m)	Valor-R total ((m ² ·K)/W)	Valor-U total (W/(m ² ·K))	ΔT (factor)	Δt (h)
BC _{ref}	0.15	0.27	3.646	0.73	-3.92
C _{ref}	0.15	1.5	0.667	0.84	-3.55
W _{ref}	0.15	1.6	0.624	0.7	-5.13
S _{ref}	0.15	0.4	2.512	0.66	-4.97
RPP	0.15	0.82	1.227	0.42	-8.09
C16	0.15	0.89	1.126	0.6	-6.02
C33	0.15	0.99	1.011	0.55	-6.58
C50	0.15	1.1	0.906	0.47	-7.61
W16	0.15	0.76	1.316	0.49	-7.16
W33	0.15	0.79	1.27	0.49	-7.2
W50	0.15	0.89	1.126	0.54	-6.72
S16	0.15	0.77	1.291	0.46	-7.56
S33	0.15	0.72	1.382	0.59	-6.04
S50	0.15	0.55	1.823	0.56	-6.15
WSC	0.15	0.78	1.278	0.58	-6.22

La Figura 89 muestra en una gráfica de barras el Valor-R y Valor-U de los materiales desarrollados y de referencia, que se complementa con la Figura 90 que muestra el retraso (Δt) y decremento (ΔT) térmico de los mismos. La Figura 91, presenta gráficamente una comparativa entre Δt y ΔT de la matriz polimérica (RPP) y el block de concreto (BC_{ref}). Las Figura 92, Figura

93 y Figura 94, presentan la comparación Δt y ΔT de los compuestos de café, madera y tierra, respectivamente.

Figura 89. Valor-R y Valor-U de materiales.

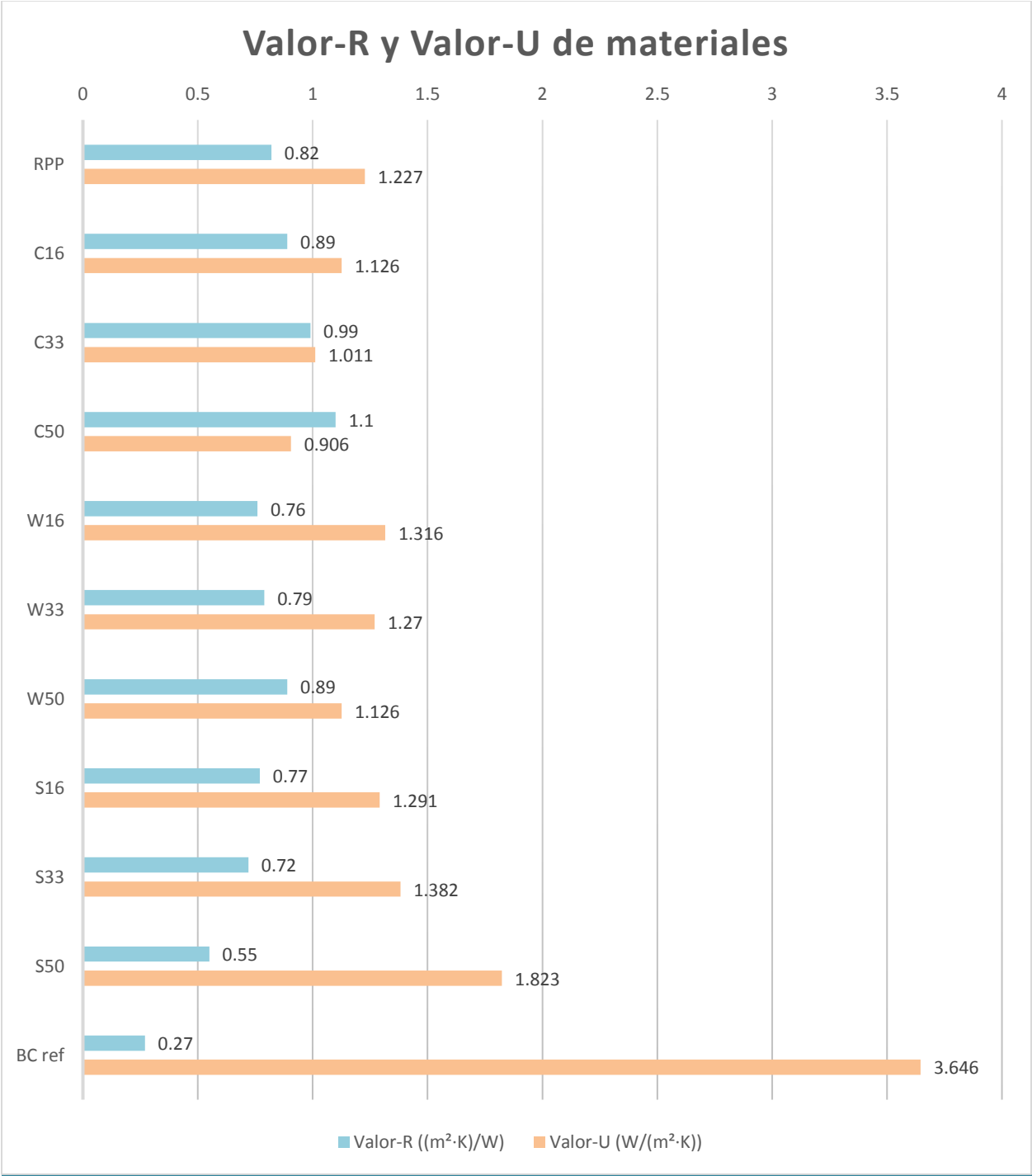
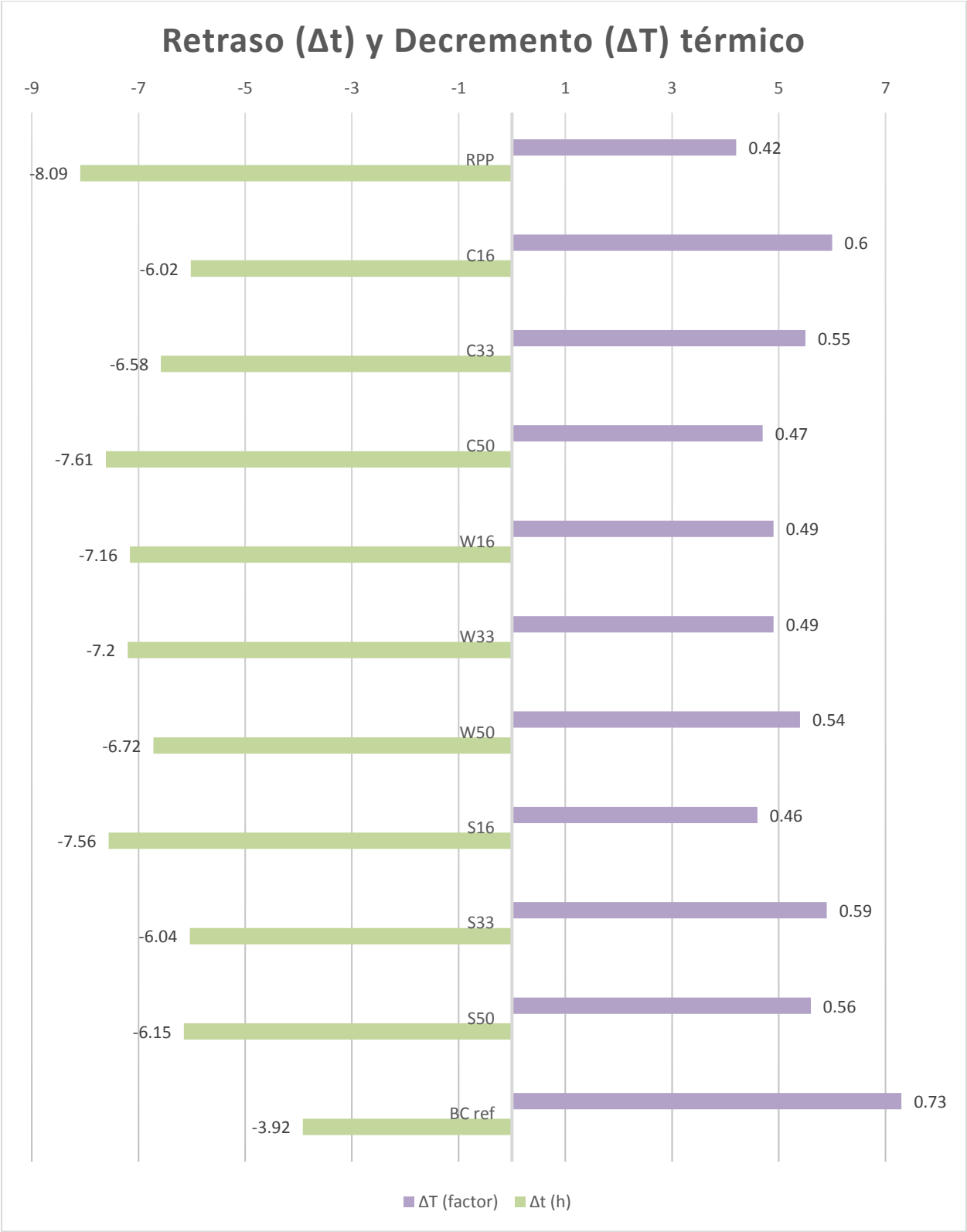


Figura 90. Retraso (Δt) y decremento (ΔT) térmico de materiales.



6.1.1. Valor-R, Valor-U de materiales

El material seleccionado para la comparativa fue el block de concreto con celdas rellenas de 15 cm de espesor (**BC ref**), este material presentó un Valor-R y U total de $0.27 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ y $3.646 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, respectivamente. La muestra de referencia con plástico reciclado (**RPP**) presentó un Valor-R total de $0.82 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ y un Valor-U total de $1.227 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. La primera observación es que **todos los compuestos** desarrollados presentaron **Valores-R superiores** y **Valores-U inferiores** con respecto a **BC ref** (ver Figura 89, p. 182).

p. | 184

En términos de Valor-R y Valor-U, el compuesto que presentó las propiedades más favorables fue **C50** con un aumento del Valor-R en un 307.41% ($1.1 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$) y una reducción del Valor-U en 75.15% ($0.906 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$). En contraste, el compuesto menos favorable fue **S50** con un aumento del Valor-R en 103.7% y disminución del Valor-U en 50%, $0.55 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ y $1.823 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, respectivamente.

6.1.2. Decremento térmico (ΔT) y retraso térmico (Δt) de materiales

La primera observación, en términos de ΔT y Δt , la muestra de polipropileno reciclado al 100 m% (RPP) presenta las propiedades termofísicas más favorables. Pese al desarrollo de muestras que lograron reducir la conductividad de RPP —como fue el caso de C16, C33, C50 y W50—, el alto valor de calor específico volumétrico (VCp) que presenta el polipropileno con respecto a los compuestos desarrollados, es propiedad térmica responsable de las grandes bondades de este material en términos de retraso y decremento térmico.

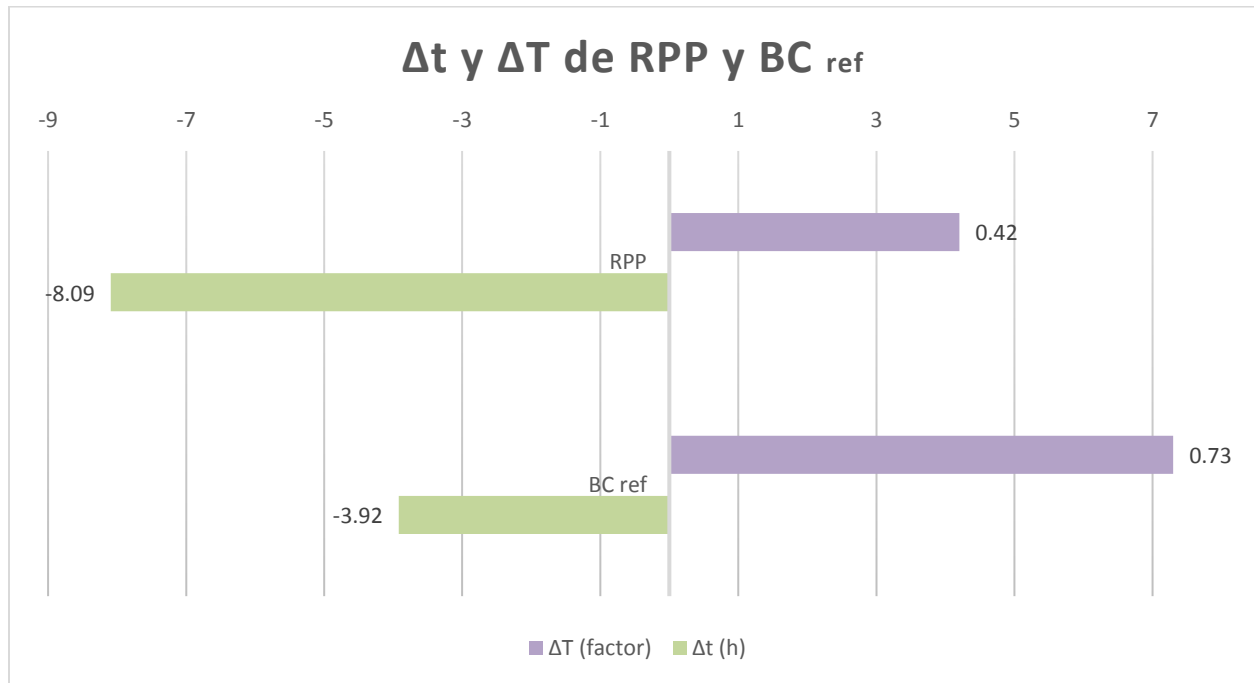
Asimismo, el argumento anterior ratifica la utilización del polipropileno (PP) como matriz polimérica en los compuestos plásticos en vez de un polímero con λ inferior: poliestireno (PS) —sin tomar en cuenta que el PP presenta propiedades mecánicas superiores a las del PS— (Goodfellow, n.d.).

6.1.3. Block de concreto vs. Polipropileno (ΔT y Δt)

El material a comparar en este capítulo es el block de concreto (**BC ref**), en la Figura 91 se presenta una comparativa de este material, con el polímero utilizado como matriz en los compuestos desarrollados — el polipropileno (**RPP**) —.

p. | 185

Figura 91. Retraso (Δt) y decremento (ΔT) térmico de RPP y Block de concreto (BC ref).



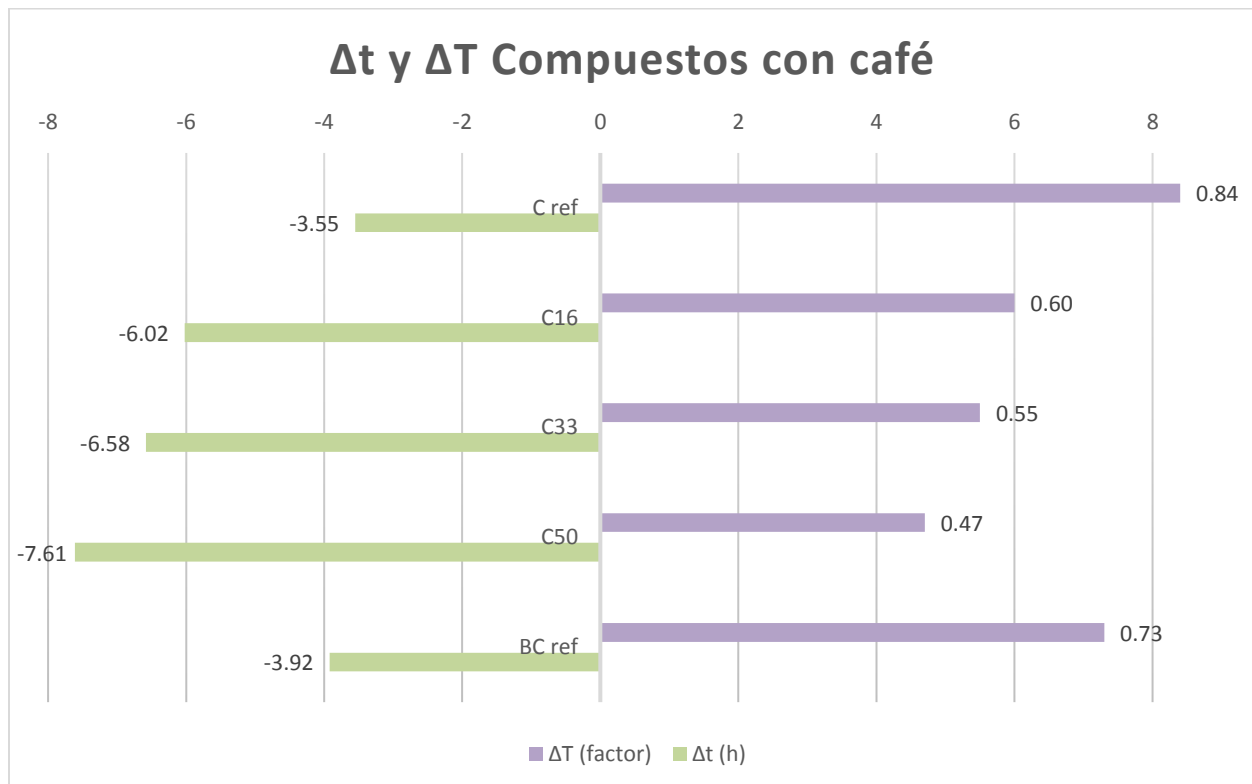
BC ref presentó un decremento térmico (ΔT) de 0.73 y un retraso térmico (Δt) de -3.92 horas. El **RPP** —material más favorable en términos de inercia térmica— presentó un factor de ΔT 42.47% menor y Δt 106.38% mayor, 0.42 y -8.09 h, respectivamente.

6.1.4. Block de concreto vs. Compuestos con café (ΔT y Δt)

La Figura 92 presenta una comparativa de ΔT y Δt entre el block de concreto (**BC ref**), los compuestos plásticos con café (**C16**, **C33**, **C50**) y el material residual de café (**C ref**) —únicamente de referencia—.

p. | 186

Figura 92. Retraso (Δt) y decremento (ΔT) térmico de compuestos plásticos con café.



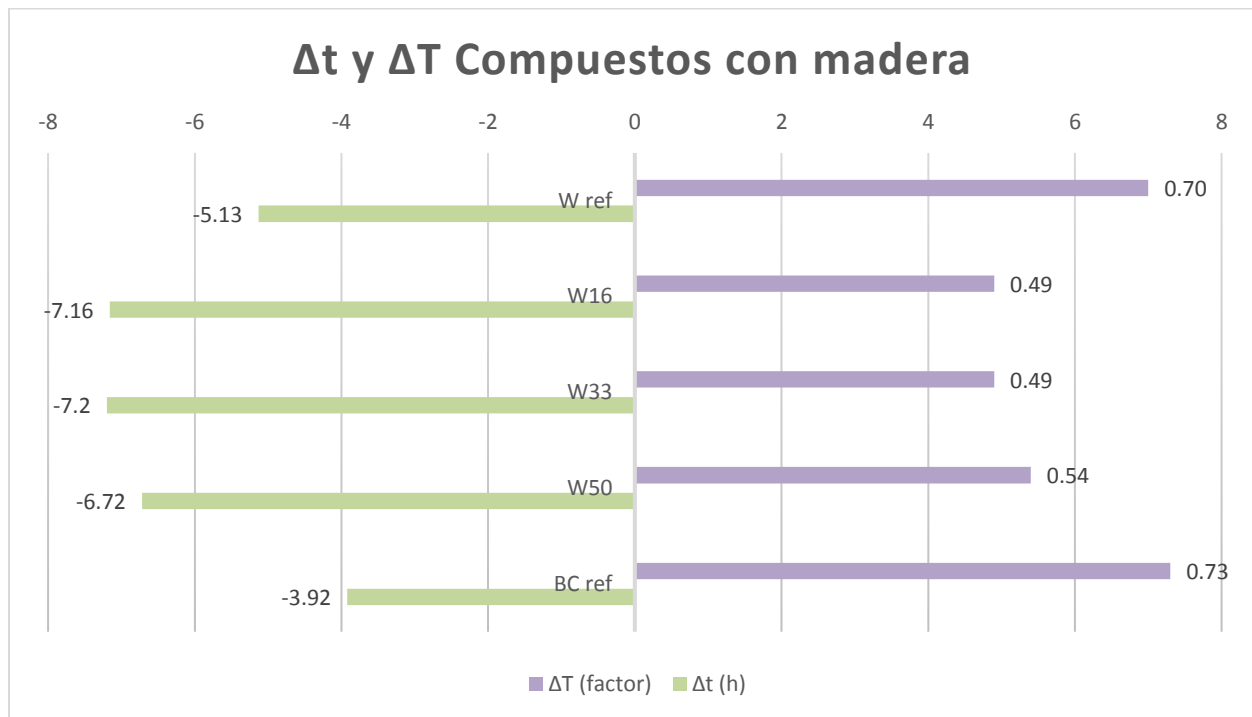
Con respecto a **BC ref**, todos los compuestos con **café** presentaron menor factor de ΔT y mayor Δt . El compuesto más favorable material con relación en peso PP-café 1:1, presentó un factor de ΔT 35.62% menor y Δt 94.13% mayor, 0.47 y -7.61 h, respectivamente.

6.1.5. Block de concreto vs. Compuestos con madera (ΔT y Δt)

La Figura 93 presenta una comparativa de ΔT y Δt entre el block de concreto (**BC ref**), los compuestos plásticos con madera (**W16**, **W33**, **W50**) y madera de pino (**W ref**) —únicamente de referencia—.

p. | 187

Figura 93. Retraso (Δt) y decremento (ΔT) térmico de compuestos plásticos con madera.



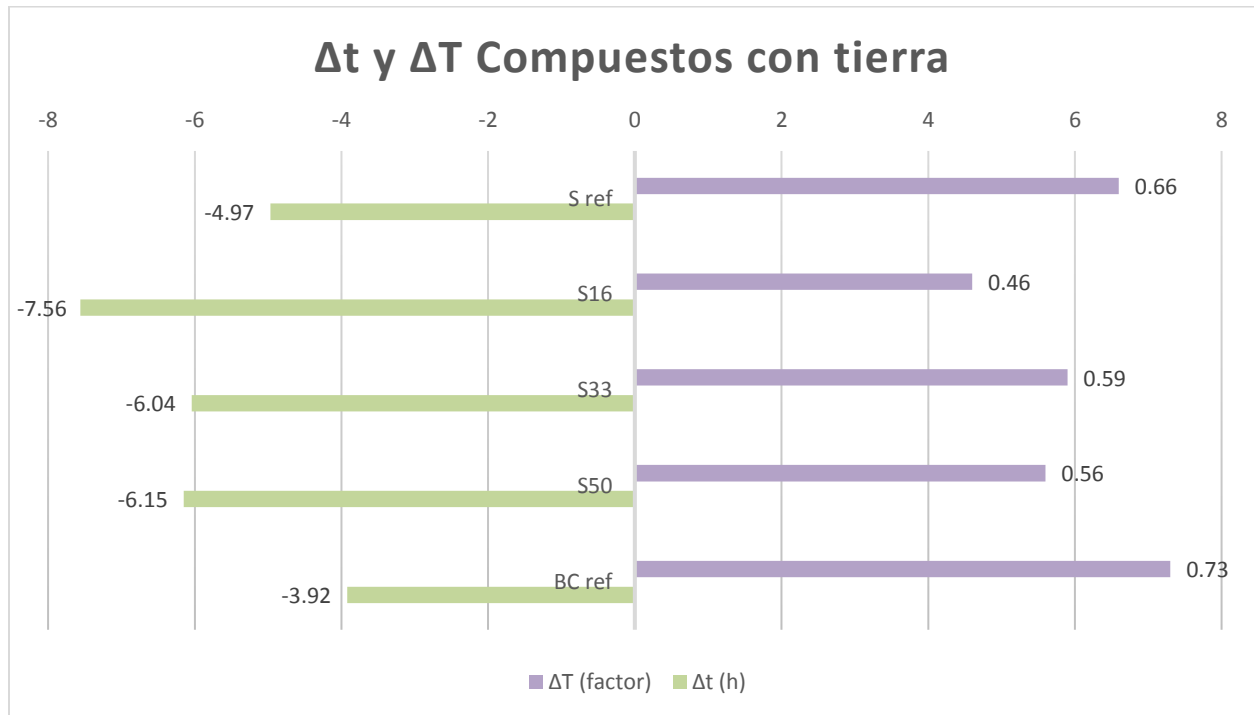
Con respecto a **BC ref**, todos los compuestos con **madera** presentaron menor factor de ΔT y mayor Δt . El compuesto más favorable fue el compuesto con 33.3 m% de madera, presentó un factor de ΔT 32.88% menor y Δt 83.67% mayor, 0.49 y -7.16 h, respectivamente.

6.1.6. Block de concreto vs. Compuestos con tierra (ΔT y Δt)

La Figura 94 presenta una comparativa de ΔT y Δt entre el block de concreto (**BC ref**), los compuestos plásticos con tierra (**S16**, **S33**, **S50**) y la tierra utilizada para el desarrollo de estos compuestos (**S ref**) —únicamente de referencia—.

p. | 188

Figura 94. Retraso (Δt) y decremento (ΔT) térmico de compuestos plásticos con tierra.



Con respecto a **BC ref**, todos los compuestos con **tierra** presentaron menor factor de ΔT y mayor Δt . El compuesto más favorable fue el compuesto con 16.6 m% de tierra, presentó un factor de ΔT 36.99% menor y Δt 92.86% mayor, 0.46 y -7.56 h, respectivamente.

6.2. DESEMPEÑO TÉRMICO-ENERGÉTICO

Una segunda simulación consistió en comparar las ganancias y pérdidas de calor (energía) del **block de concreto** relleno de 15 cm (**BC_{ref}**), el material con 100 m% polipropileno (**RPP**), y tres compuestos plásticos con diferente relleno, es decir, uno con **café**, otro con **madera**, y uno último con **tierra**. Todos los materiales fueron considerados como **muros de 0.15 m de espesor**.

p. | 189

Para poder hacer una comparativa en igual de circunstancias, todos los compuestos plásticos seleccionados fueron aquellos con relación de polipropileno-relleno 1:1, es decir, 50 m% de PP y 50 m% de relleno (café, madera o tierra). Lo anterior, se decidió debido a que, pese a ser un ejercicio de análisis térmico, los materiales fueron analizados como parte de un sistema constructivo de muros, y como estipulan Ahmadijokani et al. (2020) y Yuan et al. (2013), **el relleno se enfoca en mejorar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos** como la resistencia a la tracción y la rigidez. Por lo anterior, se tomó la máxima incorporación de relleno por compuesto plástico, es decir, el 50% en masa. Los compuestos plásticos utilizados en la comparativa fueron **C50**, **W50** y **S50**.

La simulación se realizó en OPAQUE 3.0 con los mismos datos presentados en el subcapítulo pasado 6.1. INERCIA TÉRMICA DE MATERIALES (ver p. 180). Primeramente, se obtuvieron las ganancias y pérdidas de calor por material. Los datos obtenidos fueron trasladados al software *Dview* para poder obtener las ganancias y pérdidas mensuales, así como para poder visualizar gráficamente las pérdidas y ganancias de los cuatro materiales (**BC_{ref}**, **C50**, **W50**, **S50**) en un día típico del mes más cálido y el mes más frío. Para poder determinar el día típico por mes, los datos obtenidos del archivo climático *EPW* fueron trasladados a *Dview*, y posteriormente

a una *hoja de cálculo*²³ desarrollada por el Dr. A. Luna León —revisor de tesis— y el Dr. M.E. González Trevizo —codirector de tesis—.

La Figura 95 presenta los días típicos en los que se presenta la temperatura mínima, media y máxima por mes de la ciudad de Mexicali, B.C. El **12 de diciembre** fue seleccionado como día típico del **mes más frío**, y en contraparte, el día **11 de julio** fue el referente como día típico del **mes más cálido**. Se analizaron las pérdidas y ganancias de calor de los cuatro materiales en las 24 horas de los dos días mencionados anteriormente.

Figura 95. Días típicos de temperatura por mes.

DÍAS TÍPICOS TEMPERATURA			
DÍA	MAX	MED	MIN
4-ene	20.7	12.9	6.0
7-feb	22.1	14.2	7.8
20-mar	26.0	18.5	11.2
15-abr	27.8	20.4	12.9
5-may	37.0	28.4	20.5
12-jun	39.7	31.0	22.5
11-jul	42.3	35.1	27.9
26-ago	41.6	34.5	27.2
21-sep	38.4	31.0	24.2
16-oct	31.8	23.8	16.9
18-nov	24.5	16.6	9.4
12-dic	20.4	12.5	6.7

p. | 190

6.2.1. Balance energético

Las Figura 96 y Figura 97 presentan la comparativa de ganancias y pérdidas mensuales de calor de los cinco materiales seleccionados para el presente ejercicio, **BC_{ref}**, **C50**, **W50**, **S50** y **RPP**. Ganancias y pérdidas son presentadas en Wh/m². Para poder realizar una comparativa más robusta, la Figura 96 presenta las temperaturas mensuales de la ciudad de Mexicali, B.C. Las temperaturas (T) que se muestran son, T mínima (**T_{min}**), T media (**T_{med}**), T máxima (**T_{max}**). Asimismo, se indican la T neutra (**T_n**), y los límites inferior (**ZC_i**) y superior (**ZC_s**) de la zona de confort.

Para definir la Temperatura Neutra (**T_n**) o de Termopreferendum, se ha empleado la ecuación lineal desarrollada por Auliciems y Szokolay (2007), misma que es utilizada mundialmente para definir rangos de confortabilidad térmica.

²³ La hoja de cálculo permite reconocer el día en el que se presenta la temperatura mínima, media y máxima promedio del mes.

La ecuación que considera como variable independiente la temperatura media anual del caso de estudio es la siguiente:

$$T_n = 17.6 + 0.31 T_{med}$$

(Ec. 13) p. | 191

Donde:

T_n = Temperatura neutra.

T_{med} = Temperatura media (mensual).

Para definir la Zona de Confort (ZC) —rango de temperatura donde las personas pueden experimentar un grado de confortabilidad térmica sin sentir malestar—, se empleó el modelo de Auliciems y Szokolay (2007), mismo que consiste en ampliar el grado térmico de 2.0 °C a 2.5 °C sobre T_n , de tal forma que los límites superior e Inferior de la ZC se definen de la siguiente manera:

$$ZC_i = T_n - 2.5 \text{ } ^\circ C$$

(Ec. 14)

$$ZC_s = T_n + 2.5 \text{ } ^\circ C$$

(Ec. 15)

Donde:

ZC_i = Límite inferior de la ZC.

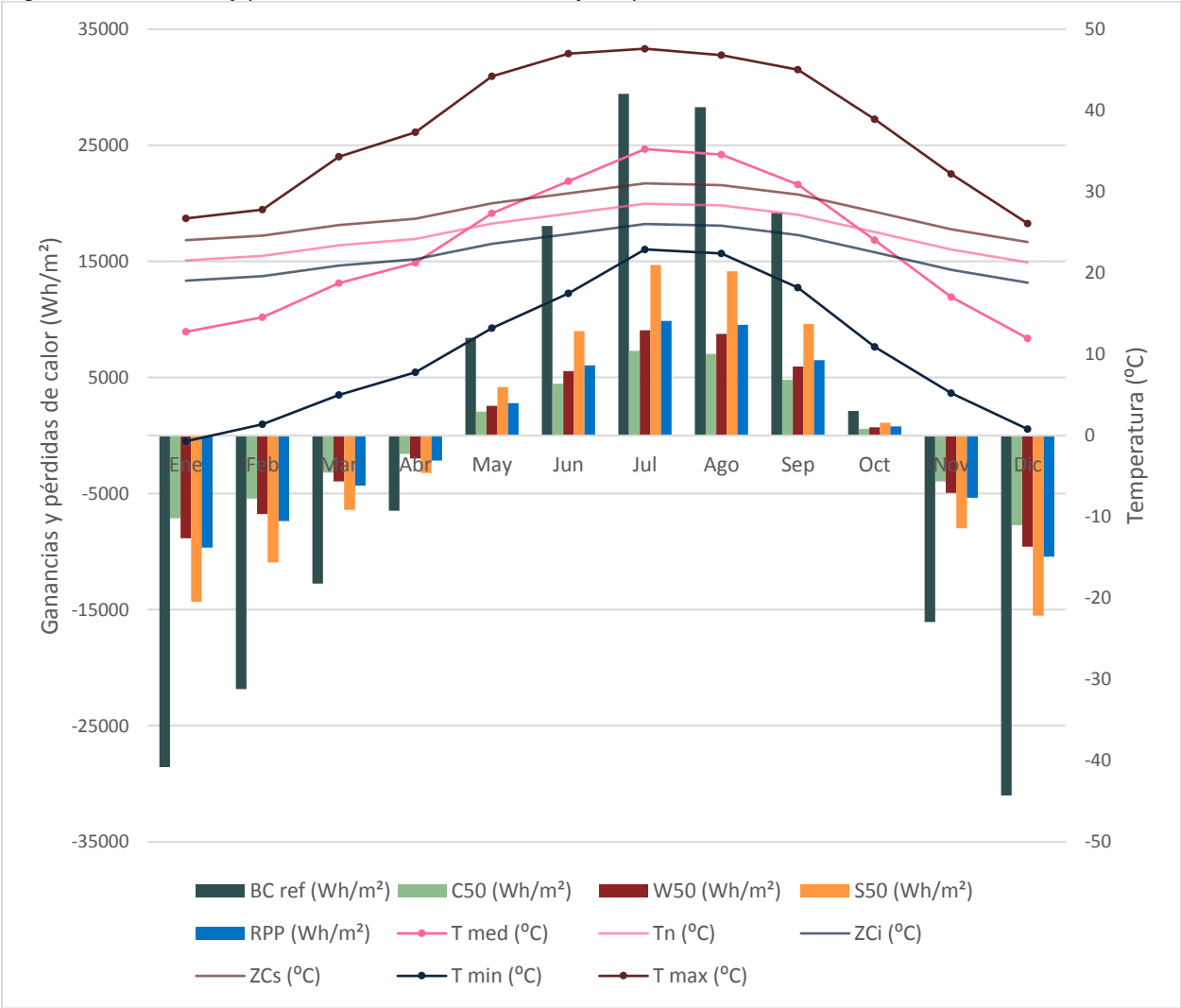
ZC_s = Límite superior de la ZC.

6.2.2. Análisis general de balance energético

Previo a comparar las ganancias y pérdidas de calor entre materiales, resulta importante realizar las primeras precisiones con respecto al comportamiento general de la temperatura y su

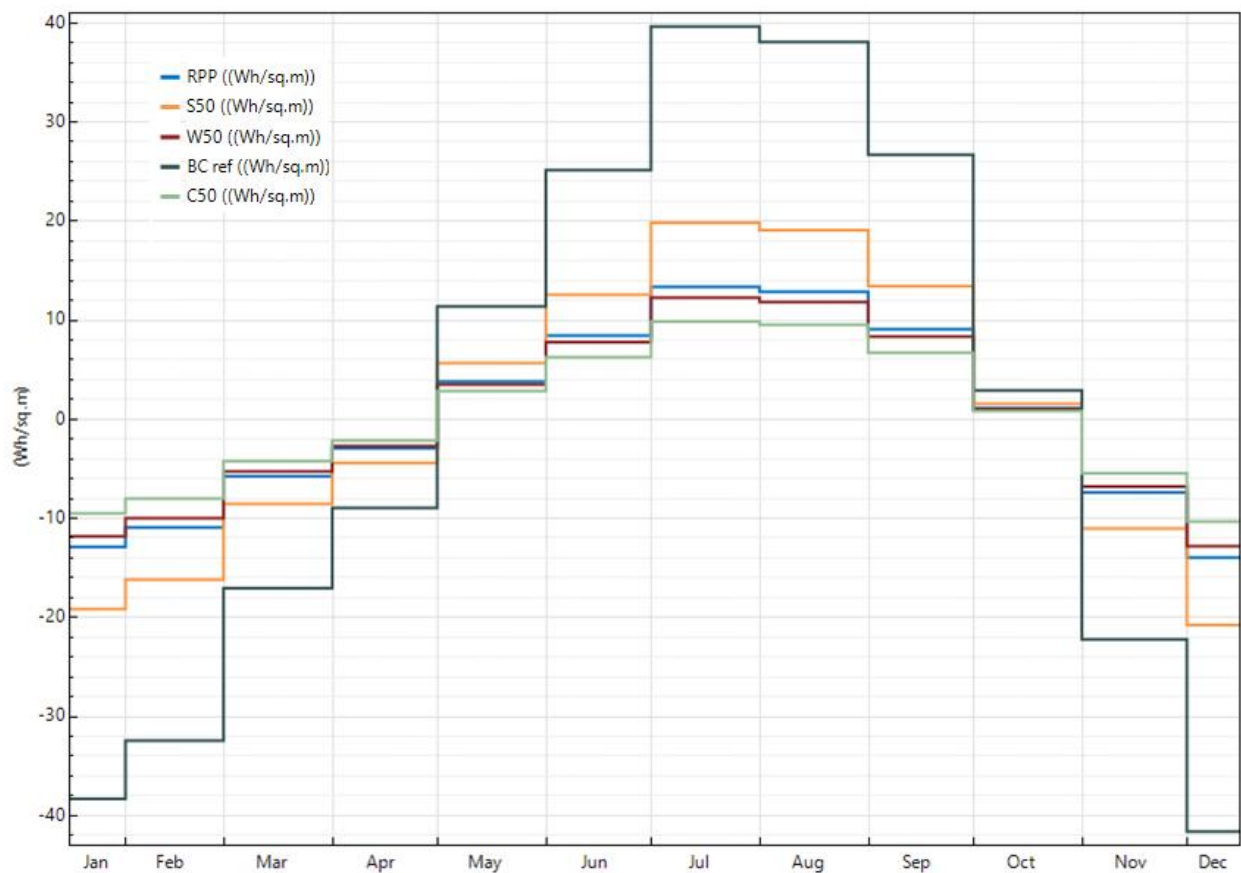
relación con el calor en los materiales. En la Figura 96 se puede observar que los materiales presentaron un balance energético cercano a los 0 Wh/m² cuando la **T_{med}** del mes se presentó dentro de **ZC**, especialmente en el intervalo entre **ZCi** y **T_n**. Esta situación se presentó en el mes el mes de octubre, y entre los meses de abril y mayo —meses que corresponden a los periodos de transición del frío al cálido y del cálido al frío, respectivamente—. Caso contrario, cuando **T_{med}** se presentó por encima de **T_n**, los materiales tuvieron ganancias de calor. Asimismo, cuando **T_{med}** se presentó por debajo de **ZCi**, los materiales tuvieron pérdidas energéticas.

Figura 96. Ganancias y pérdidas de calor de materiales, y temperaturas mensuales de la ciudad de Mexicali, B.C.



BC ref —block de concreto—, fue el material que presentó la mayor ganancia y pérdida de calor en todos los meses con respecto a los materiales restantes, teniendo un balance energético anual de $-11\,192\text{ Wh/m}^2$. En contraparte **C50** fue el material con el menor balance energético mensual, $-2\,782\text{ Wh/m}^2$ anual —una cuarta parte del balance energético anual de **BC ref**, es decir, 75.1% menos pérdidas—. En la Figura 97 se puede apreciar que **W50** y **RPP** tuvieron un comportamiento energético similar. Sin embargo, con respecto a **W50**, **RPP** tuvo ligeramente mayores pérdidas y ganancias en los periodos frío y cálido, respectivamente. **W50** y **RPP** presentaron 69.1 y 66.3% menos pérdidas con respecto a **BC ref**. **S50** presentó la mitad de pérdidas anuales de **BC ref** (50%), y dos veces más con respecto a **C50**.

Figura 97. Ganancias y pérdidas mensuales de materiales.



6.2.3. Comparativo block (BC_{ref}) y compuesto plástico con café (C50)

En general, el balance energético anual se presentó de manera constante en cada uno de los meses, es decir, **C50** representó la cuarta parte del balance mensual de BC_{ref} . En julio —mes más cálido— BC_{ref} tuvo ganancias por 29 440 Wh/m², y **C50** por 7 302 Wh/m², es decir 75.1% menos ganancias con respecto al block de concreto. Situación similar se presentó en diciembre —mes más frío—, donde BC_{ref} presentó cuatro veces más pérdidas que **C50**, -31 007 y -7 714 Wh/m², respectivamente.

p. | 194

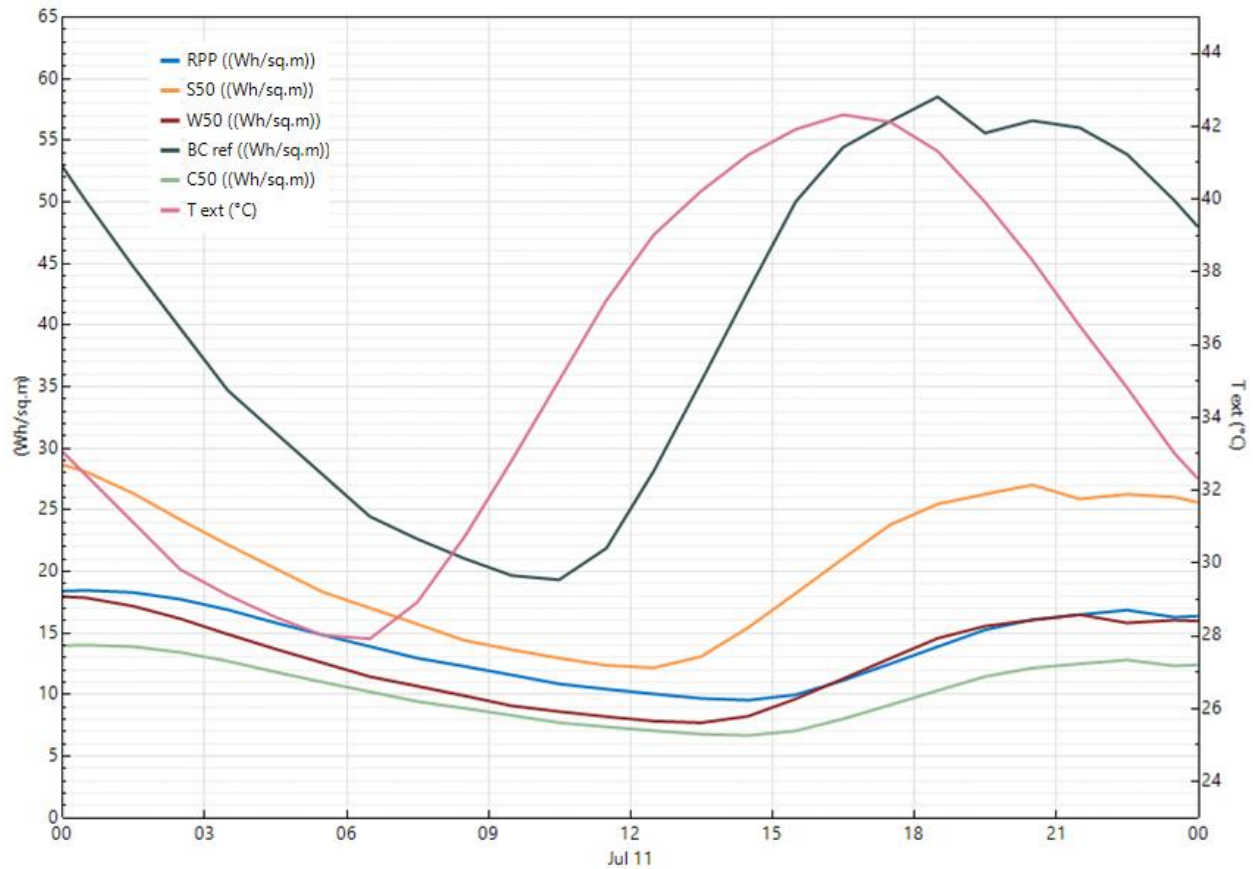
Como se puede apreciar en la Figura 96, el mes de abril presenta una T_{med} ligeramente por debajo de la ZC. Abril es un mes térmicamente confortable para Mexicali, pues forma parte del periodo de transición del frío al cálido. En este sentido, se puede observar que el balance energético del BC_{ref} en el mes de abril fue similar a las pérdidas de calor que presentó **C50** en los meses más fríos —diciembre y enero—. En otras palabras, en términos de pérdidas de calor como sistema constructivo en muros, **C50** tendría un desempeño térmico en diciembre similar a BC_{ref} en abril.

De igual forma, el mes de mayo presenta una T_{med} dentro de la ZC, y es asimismo el último mes del periodo de transición del frío al cálido. Dicho lo anterior, BC_{ref} presentó en este mes una ganancia de calor parecida a la que presentó **C50** en el mes más cálido —Julio—. Con lo anterior, podemos postular que el desempeño térmico del material con polipropileno y residuos de café 50/50 %m/m en julio, es similar al del block de concreto en mayo.

6.2.4. Comparativo de materiales en día típico de mes cálido

La Figura 98 presenta las ganancias y pérdidas de energía de materiales en un ciclo completo de 24 h del día 11 de julio —día típico del mes más cálido—.

Figura 98. Ganancias y pérdidas de calor de materiales en día típico de mes cálido.



En la Figura 98 se puede apreciar que, en términos del transcurso de horas, existe un comportamiento similar del oscilamiento de la temperatura exterior (T_{ext}) con respecto a las pérdidas y ganancias de energía de **BC ref**, es decir, el balance energético de **BC ref** siguió una tendencia similar al aumento y descenso de temperatura. La cresta y valle de **BC ref** tuvo un desfase de entre 2 y 4 horas con respecto a los picos de la curva de T_{ext} . Resulta importante mencionar que como se puede apreciar en la Tabla 9 (ver p. 181) y la Figura 89 (ver p. 182), **BC ref** presentó un retraso térmico (Δt) de -3.92 horas.

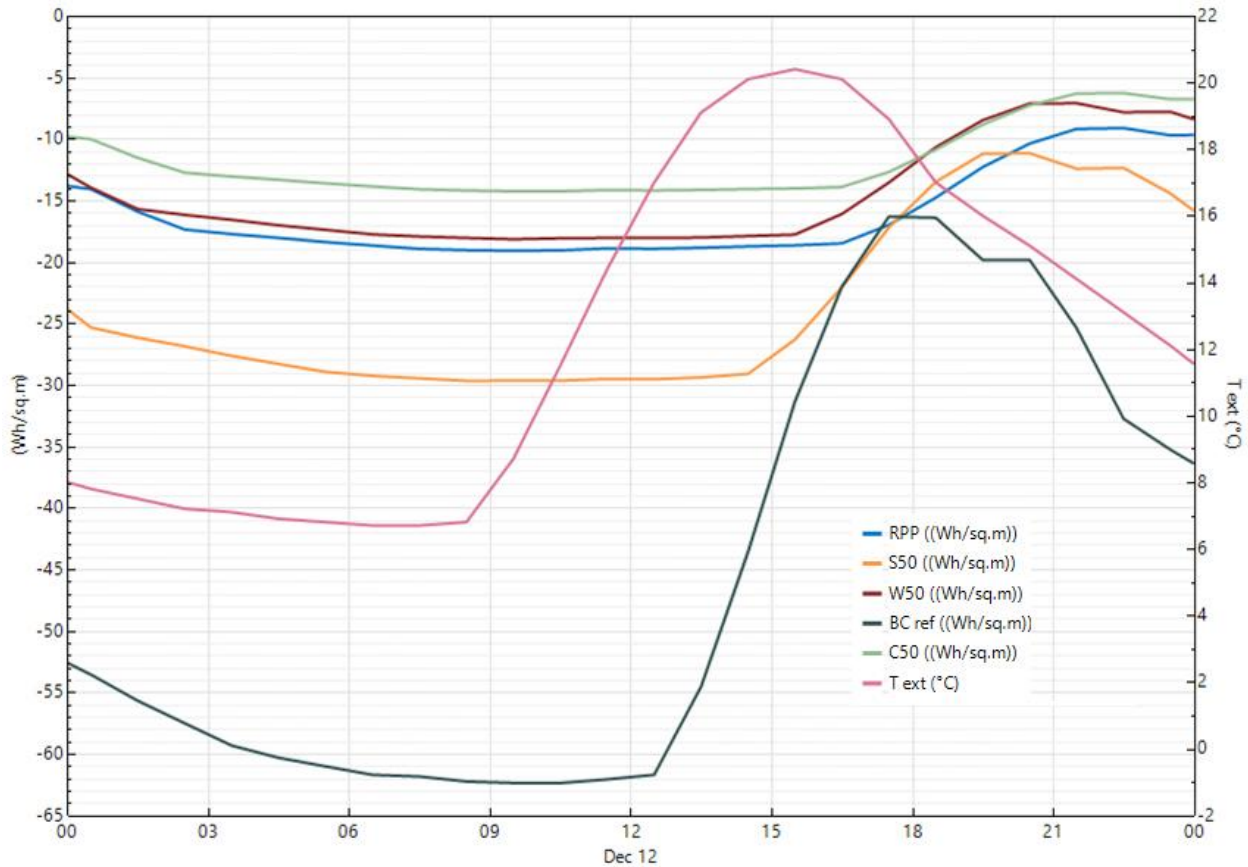
En contraparte, **C50** fue el material que presentó las menores ganancias de calor, con una cresta entre las 22 y 23 h, y un valle entre las 14 y las 15 h. **RPP** mostró una curva similar a la de **C50**, con un aumento de $4\,000 \pm 1\,000 \text{ Wh/m}^2$ a lo largo del día. **W50** tuvo una característica peculiar, presentó una cresta y una tendencia similar a la de **RPP** justo después de las 16 h, y

un valle y una tendencia semejante a **C50** entre las 09 y las 13 h. C50, W50 y RPP, presentaron un retraso térmico (Δt) de -7.61, -6.72, y -8.09 h, respectivamente. La muestra con polipropileno y tierra 50/50 %m/m (**S50**) presento una tendencia de la curva similar a **W50** con $7\,000 \pm 2\,000$ Wh/m² a lo largo del día. El retraso térmico (Δt) de **S50** fue de -6.15 h.

6.2.5. Comparativo de materiales en día típico de mes frío

La Figura 99 presenta la ganancias y pérdidas de energía de materiales en un ciclo completo de 24 h del día 12 de diciembre —día típico del mes más frío—.

Figura 99. Ganancias y pérdidas de calor de materiales en día típico de mes frío.



Al igual que en la Figura 98, en la Figura 99, existe un comportamiento semejante del ascenso y descenso de la temperatura exterior (T_{ext}) con respecto a las pérdidas y ganancias de

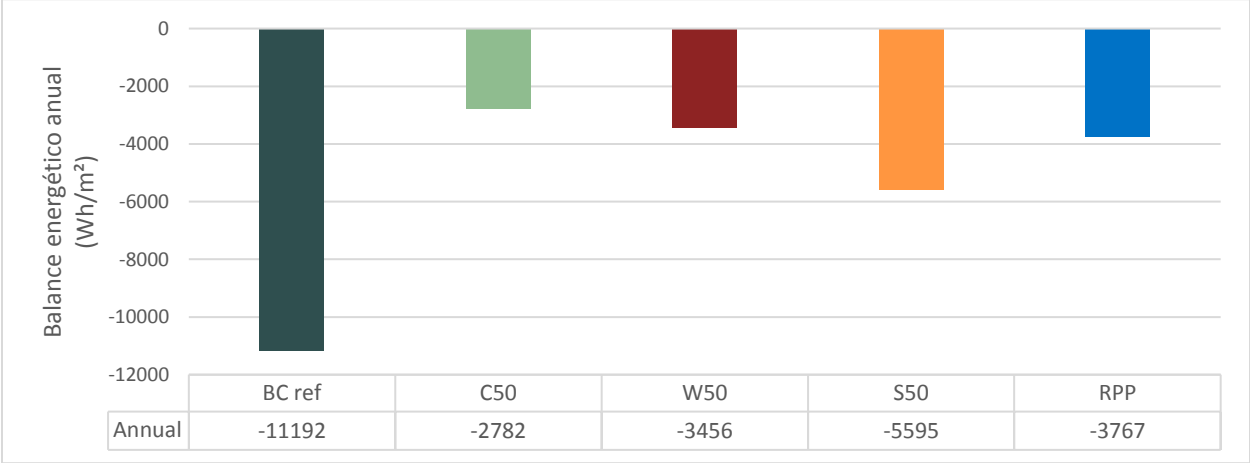
calor de **BC ref.** El valle y cresta de **BC ref** tuvo un desfase de entre 3 y 5 horas con respecto a los picos de la curva de **T_{ext}**.

Nuevamente, **C50** fue el material que presentó las menores pérdidas de calor, con una cresta entre las 21 y 22 h, y un valle plano y continuo entre las 08 y las 16 h. De igual modo, **RPP** mostró una curva similar a la de **C50**, con una pérdida mayor de hasta 5000 Wh/m² en el momento en que se presentó el valle de la curva. **W50** tuvo un valle similar al de **RPP** y una tendencia similar a **C50** entre las 19 y las 21 h. **S50** presentó una tendencia de la curva similar a **RPP** entre las 18 y 20 h, sin embargo, mostró un valle con pérdidas de calor cercanas a los 10 000 Wh/m² con respecto al valle de **RPP** y **W50**.

6.2.6. Conclusión balance energético de materiales

En términos de ganancias y pérdidas de calor, la muestra **C50** fue la más favorable con un desempeño térmico-energético anual cuatro veces más óptimo con respecto a **BC ref.** Esta condición se presentó de igual manera en el mes más cálido —julio— y el mes más frío —diciembre—. La Figura 100 presenta el balance energético anual de las ganancias y pérdidas de calor de todos los meses del año, para los cinco materiales evaluados, **BC ref**, **C50**, **W50**, **S50** y **RPP**.

Figura 100. Balance energético anual de materiales



CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

El plástico polipropileno (PP) es un polímero óptimo para la elaboración de materiales constructivos sustentables. Utilizar residuos de PP como matriz aglutinante en materiales compuestos, es una alternativa prometedora en la búsqueda de reducir el consumo energético de los edificios por climatización.

El método de extrusión de plástico y la máquina desarrollada para fines de esta investigación desarrollaron **especímenes** con un **nivel de calidad satisfactorio**.

Para poder tener un parámetro cualitativo que ayudara a valorar la calidad de las muestras desarrolladas, se elaboró una muestra de **referencia con 100 m% de polipropileno reciclado (RPP)**. Al comparar los resultados de las propiedades termofísicas del RPP con las de la literatura, se pudo observar que las propiedades fueron prácticamente idénticas —**RPP**, λ : **0.229 W/(m·K)**, C_p : **1.891 kJ/(kg·K)**, ρ : **903 kg/m³**—.

Con respecto a la muestra de referencia RPP, la tierra aumentó la densidad (ρ) hasta en un 40.42%, los compuestos plásticos con madera presentaron densidades similares, y el café redujo ρ hasta en un 7.09%.

Todas las muestras con tierra aumentaron la densidad, siendo la muestra con 50 m% (S50) la mayor con 1 268 kg/m³. Por otro lado, todas las pruebas con café presentaron densidades menores a RPP, siendo C50 la menor con 839 kg/m³.

Todas las muestras con tierra aumentaron la conductividad térmica (λ), siendo S50 la mayor con 0.386 W/(m·K) —un aumento del 68.56%—. En contraste, todas las pruebas con café

presentaron conductividades inferiores que la muestra polimérica, siendo C50 la menor con $0.159 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ —una disminución del 30.57%—.

Con respecto al calor específico volumétrico de la muestra con polipropileno reciclado al 100 m% — $1.708 \text{ MJ/(m}^3\cdot\text{K)}$ —, todas las muestras presentaron calores específicos volumétricos inferiores.

La adición de madera, primero aumentó la conductividad y la densidad —caso W13 y W33—, pero después λ descendió exponencialmente en W50 quedando incluso por debajo de la muestra de referencia (RPP).

De acuerdo con un estudio de caracterización mecánica en que se elaboraron muestras con tierra y PET en relación de masa 1:1 —mismo que logró un esfuerzo a la compresión (CS) de 117 kg/cm^2 (Solanki & Bhattarai, 2019)— el material desarrollado en esta investigación con tierra y PP en relación de masa 1:1 (S50), da apertura a una posible aplicación de este compuesto dentro de la envolvente arquitectónica como elemento de carga, a su vez, da apertura a futuras investigaciones en materia de análisis mecánico hacia un material con propiedades térmicas prometedoras.

Se realizó una simulación térmica para calcular **Valor-R**, **Valor-U**, **decremento térmico** (ΔT) y **retraso térmico** (Δt) de los **materiales desarrollados** *versus* un muro de block de concreto (**BC ref**). Todos los materiales fueron analizados en igual de condiciones para la ciudad de Mexicali y fungiendo como muros de 15 cm de espesor en orientación sur —**BC ref**, Valor-R: $0.27 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$, Valor-U: $3.646 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, ΔT : 0.73, Δt : -3.92. Por último, se realizó una segunda simulación para estimar las **ganancias** y **pérdidas** mensuales de **calor** de los **materiales desarrollados** y **BC ref**. Asimismo, se analizaron los materiales en un día típico del mes más cálido —julio— y el mes más frío —diciembre— de la capital bajacaliforniana.

En términos de transferencia de calor, con respecto a **BC_{ref}**, el compuesto que presentó las mejores propiedades térmicas fue **C50** con un aumento del Valor-R en un 307.41% —1.1 (m²·K)/W— y una reducción del Valor-U en 75.15% —0.906 W/(m²·K)—, con respecto al block de concreto (**BC_{ref}**).

En términos de decremento térmico (ΔT) y retraso térmico (Δt), la muestra de polipropileno reciclado al 100 m% (**RPP**) mostró las mejores propiedades térmicas. Con respecto a **BC_{ref}**, presentó un factor de ΔT 42.47% menor y Δt 106.38% mayor, 0.42 y -8.09 h, respectivamente.

De acuerdo con las Tablas de Mahoney publicadas en una monografía por las Naciones Unidas en 1971, y conforme con las estrategias bioclimáticas de esta herramienta para el caso de la ciudad de Mexicali, B.C.; se recomienda tener un retraso térmico (Δt) en muros de cuando menos 8 horas. En este sentido, las muestras que se desempeñaron de mejor manera fueron **RPP** (-8.09 h), **C50** (-7.61 h), **S16** (-7.56 h) y **W33** (-7.20 h).

En términos de ganancias y pérdidas de calor, la muestra **C50** fue la más favorable con un desempeño térmico-energético anual cuatro veces más óptimo con respecto a **BC_{ref}**. Esta condición se presentó de igual manera en julio (mes más cálido) y diciembre (mes más frío).

Menor conductividad térmica, no necesariamente significa mejor desempeño en términos de decremento térmico (ΔT) y retraso térmico (Δt). El calor específico es una propiedad térmica en igual de condiciones importante como lo es la conductividad térmica si se busca reducir el factor de ΔT , y aumentar el factor de Δt .

La ciencia ha prestado mayor atención a la conductividad térmica de los materiales. En el análisis termofísico de compuestos plásticos del capítulo de Estado-del-arte de la presente tesis, de los 89 materiales explorados, 38 presentaron valores de conductividad. De esos 38, solo el 34.2% presentó valores de calor específico (C_p o VC_p).

7.2. RECOMENDACIONES

Son necesarias futuras investigaciones que tengan por objetivo la optimización de las propiedades térmicas en materia de desarrollo de materiales y materiales constructivos, especialmente aquellos empleados en la envolvente arquitectónica.

p. | 201

Es importante realizar un estudio de análisis de ciclo de vida de compuestos plásticos para poder conocer la **huella ecológica** y toda aquella **energía integrada** empleada en el proceso de reciclaje de materiales de este tipo.

Es necesario realizar estudios que puedan robustecer la caracterización de compuestos plásticos. E.g., pruebas de envejecimiento acelerado, resistencia al fuego, propiedades superficiales. Asimismo, una caracterización mecánica daría una perspectiva estructural de la aplicación de estos materiales en la envolvente del edificio.

Dentro de las áreas de oportunidad para la mejora de especímenes de compuestos plásticos a través de un proceso de extrusión de plásticos, destacan la presencia de espacios de aire al interior de algunas muestras y concentración de material de relleno. Obtener una mejor aglomeración de los materiales, evitar el agrupamiento de material de relleno y la presencia de poros, puede lograrse con una previa mezcla en caliente de los materiales (Sormunen, 2019).

Se recomienda enfáticamente eliminar la totalidad de humedad de todos los materiales previos a ser sometidos a un proceso de reciclaje, lo anterior con el objetivo de evitar espacios de aire al interior de muestras (poros) y variaciones en las propiedades del material. Asimismo, se sugiere mantener los materiales deshidratados en recipientes herméticos en todo momento hasta antes de realizar el desarrollo de especímenes.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmadijokani, F., Shojaei, A., Dordanihaghighi, S., Jafarpour, E., Mohammadi, S., & Arjmand, M. (2020). Effects of hybrid carbon-aramid fiber on performance of non-asbestos organic brake friction composites. *Wear*, 452–453(March), 203280. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203280>
- Ajorloo, M., Fasihi, M., Ohshima, M., & Taki, K. (2019). How are the thermal properties of polypropylene/graphene nanoplatelet composites affected by polymer chain configuration and size of nanofiller? *Materials and Design*, 181, 108068. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108068>
- Akim, E. L. (2016). Biorefining of wood. *Fibre Chemistry*, 48, 181–190. <https://doi.org/10.1007/s10692-016-9765-7>
- Al-Maaded, M., Madi, N. K., Kahraman, R., Hodzic, A., & Ozerkan, N. G. (2012). An Overview of Solid Waste Management and Plastic Recycling in Qatar. *Journal of Polymers and the Environment*, 20(1), 186–194. <https://doi.org/10.1007/s10924-011-0332-2>
- Alaloul, W. S., John, V. O., & Musarat, M. A. (2020). Mechanical and Thermal Properties of Interlocking Bricks Utilizing Wasted Polyethylene Terephthalate. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00399-9>
- AMETEK Brookfield. (2018). *POWDER ANALYSIS APPLICATION NOTE: Ground Coffee*. www.brookfieldengineering.com
- Arabpour, A., Shockravi, A., Rezaia, H., & Farahati, R. (2020). Investigation of anticorrosive properties of novel silane-functionalized polyamide/GO nanocomposite as steel coatings. *Surfaces and Interfaces*, 18(July 2019), 100453. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100453>
- Arena, U., Mastellone, M. L., & Perugini, F. (2003). Life cycle assessment of a plastic packaging recycling system. *The International Journal of Life Cycle Assessment*.
- Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., & Wu, W. (2015). Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Energy and Buildings*, 104, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.016>
- ASTM. (1996). Standard Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens. *Test*. www.astm.org
- ASTM. (1998). Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and

Rock by Mass. *ASTM International*, 1–5.

ASTM. (2014). *Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure*. <https://doi.org/10.1520/D5334-0814>

ASTM International. (2009). ASTM D5930-09. Standard Test Method for Thermal Conductivity of Plastics by Means of a Transient. *ASTM International*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/D5930-09.2> p. | 203

ASTM International. (2019). *ASTM C177-19. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*. www.astm.org/Standards/C177.htm

Auliciems, A., & Szokolay, S. (2007). Thermal comfort. In *PLEA: Passive and Low Energy Architecture International: Vol. note 3* (second).

Badache, A., Soufiane, A., Senhadji, Y., & Mouli, M. (2018). Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE). *Construction and Building Materials*, 163, 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.069>

Balaras, C. A. (1996). The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods. *Energy and Buildings*, 24(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00956-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00956-6)

Beigl, P., & Salhofer, S. (2004). Comparison of ecological effects and costs of communal waste management systems. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2003.08.007>

Benhiba, F., Hsissou, R., Benzekri, Z., Belghiti, M. E., Lamhamdi, A., Bellaouchou, A., Guenbour, A., Boukhris, S., Oudda, H., Warad, I., & Zarrouk, A. (2020). Nitro substituent effect on the electronic behavior and inhibitory performance of two quinoxaline derivatives in relation to the corrosion of mild steel in 1M HCl. *Journal of Molecular Liquids*, 312, 113367. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113367>

Benhiba, F., Serrar, H., Hsissou, R., Guenbour, A., Bellaouchou, A., Tabyaoui, M., Boukhris, S., Oudda, H., Warad, I., & Zarrouk, A. (2020). Tetrahydropyrimido-Triazepine derivatives as anti-corrosion additives for acid corrosion: Chemical, electrochemical, surface and theoretical studies. *Chemical*

Physics Letters, 743(February), 137181. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2020.137181>

Benjelloun, Y., de Sigoyer, J., Carlut, J., Hubert-Ferrari, A., Dessales, H., Pamir, H., & Karabacak, V. (2015). Characterization of building materials from the aqueduct of Antioch-on-the-Orontes (Turkey).

Comptes Rendus - Geoscience, 347(4), 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2014.12.002>

p. | 204

Bernache-Pérez, G., Sánchez-Colón, S. Garmendia, A. M., Dávila-Villarreal, A., & Sánchez-Salazar, M. E. (2001). Solid waste characterisation study in the Guadalajara Metropolitan Zone, Mexico. *Waste Management & Research*, 19(5), 413–424.

Bernardo, C. A., Simões, C. L., & Pinto, L. M. C. (2016). Environmental and economic life cycle analysis of plastic waste management options. A review. *AIP Conference Proceedings*, 1779(October 2016). <https://doi.org/10.1063/1.4965581>

Bestraten, S., & Hormias, E. (2011). Construcción con tierra en el siglo XXI “Earthen construction in the 21st century”. *Informes de La Construcción*, 63(523), 5–20. <https://doi.org/10.3989/ic.10.046>.

Binici, H., Gemci, R., Kucukonder, A., & Solak, H. H. (2012). Investigating sound insulation, thermal conductivity and radioactivity of chipboards produced with cotton waste, fly ash and barite. *Construction and Building Materials*, 30, 826–832. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.064>

Birm-june, K., Young-rok, S., & Sun-Young, L. (2019). Effects of Nanoclay and Glass Fiber on the Microstructural , Mechanical , Thermal , and Water Absorption Properties of Recycled WPCs 1. *Journal of The Korean Wood Science and Technology*, 47(4), 0–1.

Bostanci, L. (2020). Synergistic effect of a small amount of silica aerogel powder and scrap rubber addition on properties of alkali-activated slag mortars. *Construction and Building Materials*, 250, 118885. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118885>

Buche, F. J., & Jerde, D. A. (1996). *Fundamentos de física*.

Buenrostro Delgado, O. (2001). *Municipal solid waste. Perspectives from the multidisciplinary research. Morelia: Universitaria*.

Cardinale, T., Sposato, C., Alba, M. B., Feo, A., & Fazio, P. De. (2019). Energy Performance of Construction Materials Using Waste Recycled Polymer as Fine Aggregate Replacement. *International Journal of Heat and Technology*, 37(3), 696–704.

Cardoso, D. B., de Andrade, E. T., Calderón, R. A. A., Rabelo, M. H. S., de Almeida Dias, C., & Lemos, I.

- Á. (2018). Determination of thermal properties of coffee beans at different degrees of roasting. *Coffee Science*, 13(4), 498–509. <https://doi.org/10.25186/cs.v13i4.1491>
- Carroll, D. R., Stone, R. B., Sirignano, A. M., Saindon, R. M., Gose, S. C., & Friedman, M. A. (2001). Structural properties of recycled plastic/sawdust lumber decking planks. *Resources, Conservation and Recycling*, 31(3), 241–251. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(00\)00081-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(00)00081-1)
- Carus, M., Eder, A., Dammer, L., Korte, H., Scholz, L., Essel, R., Breitmayer, E., & Barth, M. (2015). Wood-Plastic Composites (WPC) and Natural Fibre Composites (NFC): European and Global Markets 2012 and Future Trends in Automotive and Construction. *Nova Institute*, 5(14), 1–16.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoğlu, M. (2019). *Termodinámica* (4a ed.).
- Cervantes, M., & Raymundo, J. (2012). *Arquitectura y confort térmico : teoría, cálculo y ejercicios* (1a ed.).
- Cestari, S. P., Mendes, L. C., Altstädt, V., Mano, E. B., Da Silva, D. F., & Keller, J. H. (2014). Properties of Recycled High Density Polyethylene and Coffee Dregs Composites Sibebe. *Polymers and Polymer Composites*, 22(6), 541–549. <https://doi.org/10.1177/096739111402200606>
- Chavan, S., Gumtapure, V., & D, A. P. (2020). Numerical and experimental analysis on thermal energy storage of polyethylene / functionalized graphene composite phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 27(October 2019), 101045. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101045>
- Chavan, S., Gumtapure, V., & Perumal, D. A. (2019). Characterization of linear low-density polyethylene with graphene as thermal energy storage material. *Materials Research Express*, 6(6), 65511. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab0e36>
- Cheng, A., Lin, W. T., & Huang, R. (2011). *Application of rock wool waste in cement-based composites*.
- Chilton, T., Burnley, S., & Nesaratnam, S. (2010). A life cycle assessment of the closed-loop recycling and thermal recovery of post-consumer PET. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Chiu, Y. J., Yan, W. M., Chiu, H. C., Jang, J. H., & Ling, G. Y. (2018). Investigation on the thermophysical properties and transient heat transfer characteristics of composite phase change materials. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 98(October), 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.09.011>
- Choi, Y. W., Moon, D. J., Chung, J. S., & Cho, S. K. (2005). Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 776–781.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.014>

Choi, Y., & Yuan, R. L. (2005). Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1587–1591.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.010>

p. | 206

Chong, S., Yang, T. C., Lee, K., Chen, Y., Juan, J. C., Tiong, T. J., Huang, C., & Pan, G. (2020). Evaluation of the physico-mechanical properties of activated-carbon enhanced recycled polyethylene / polypropylene 3D printing filament. *Sādhana*, 0123456789, 10–15. <https://doi.org/10.1007/s12046-020-1294-7>

Chriaa, I., Trigui, A., Karkri, M., Jedidi, I., & Abdelmouleh, M. (2020). Thermal properties of shape-stabilized phase change materials based on Low Density Polyethylene , Hexadecane and SEBS for thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 171(February), 115072. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115072>

Chuang, K., Grady, J., Arnold, S., Draper, R., Shin, E., Patterson, C., Santelle, T., Lao, C., Rhein, M., & Mehl, J. (2015). A Fully Nonmetallic Gas Turbine Engine Enabled by Additive Manufacturing, Part II: Additive Manufacturing and Characterization of Polymer Composites. *CAMX Conf. Proceed.*, 1–15.

Collaboration for Environmental Evidence. (2013). Guidelines for Systematic Reviews in Environmental Management. Version 4.2, March, 80. <http://www.environmentalevidence.org/wp-content/uploads/2014/06/Review-guidelines-version-4.2-final.pdf>

Consoli, N. C., Montardo, J. P., Prietto, P. D. M., & Pasa, G. S. (2002). Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.

Craighill, A. L., & Powell, J. C. (1996). Lifecycle assessment and economic evaluation of recycling: A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 17(2), 75–96. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(96\)01105-6](https://doi.org/10.1016/0921-3449(96)01105-6)

Cromer, A. H., & Fernández-Ferrer, J. (1986). *Física en la Ciencia y en la Industria*.

DA, & DAF. (1988). U.S. Army Corps of Engineers Technical Manual: Arctic and Subarctic Construction: Calculation Methods for Determination of Depths of Freeze and Thaw in Soils, TM 5-852-6/AFR 88-19. *Departments of the Army and Air Force USA*, 6.

Dalhat, M. A., & Wahhab, H. I. A. (2016). Cement-less and asphalt-less concrete bounded by recycled

- plastic. *Construction and Building Materials*, 119, 206–214.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.010>
- Decagon Devices, I. (2016). *KD2 Pro Thermal Properties Analyzer*. 1–71. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10841-9_18
- Dhawan, R., Mohan, B., Bisht, S., Kumar, R., & Kumari, S. (2019). Recycling of plastic waste into tiles with reduced flammability and improved tensile strength. *Process Safety and Environmental Protection*, 124, 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.02.018>
- Di Perna, C., Stazi, F., Casalena, A. U., & D'Orazio, M. (2011). Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads. *Energy and Buildings*, 43(1), 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.007>
- Dodbiba, G., Takahashi, K., Sadaki, J., & Fujita, T. (2008). The recycling of plastic wastes from discarded TV sets: comparing energy recovery with mechanical recycling in the context of life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 16(4), 458–470. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.029>
- Echeverria, C. A., Pahlevani, F., & Sahajwalla, V. (2020). Valorisation of discarded nonwoven polypropylene as potential matrix-phase for thermoplastic-lignocellulose hybrid material engineered for building applications. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120730. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120730>
- efunda. (n.d.). *Introduction to Compression Molding*.
https://www.efunda.com/processes/plastic_molding/molding_compression.cfm
- Eleftheriou, P. (2007). Energy from waste: a possible alternative energy source for large size municipalities. *Waste Management & Research*, 25(5), 483–486.
- Eliche-Quesada, D., Pérez-Villarejo, L., Iglesias-Godino, F. J., Martínez-García, C., & Corpas-Iglesias, F. A. (2011). Incorporation of coffee grounds into clay brick production. *Advances in Applied Ceramics*, 110, 225–232. <https://doi.org/10.1179/1743676111Y.0000000006>
- Environmental Protection Agency. (2006). *Solid waste management and greenhouse gases: a life-cycle assessment of emissions and sinks* (3rd editio).
<https://archive.epa.gov/epawaste/conservation/tools/warm/pdfs/Plastics.pdf>
- Eriksson, O., Reich, M. C., Frostell, B., Björklund, A., Assefa, G., Sundqvist, J. O., Granath, J., Baky, A., &

- Thyselius, L. (2005). Municipal solid waste management from a systems perspective. *Journal of Cleaner Production*, 13(3), 241–252. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.02.018>
- Eriksson, Ola, & Finnveden, G. (2009). Plastic waste as a fuel - CO₂-neutral or not? *Energy and Environmental Science*, 2(9), 907–914. <https://doi.org/10.1039/b908135f>
- Espert, A., Camacho, W., & Karlson, S. (2003). Thermal and thermomechanical properties of biocomposites made from modified recycled cellulose and recycled polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*.
- Estokova, A., Vilcekova, S., & Porhincak, M. (2017). Analyzing Embodied Energy, Global Warming and Acidification Potentials of Materials in Residential Buildings. *Procedia Engineering*, 180, 1675–1683. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.330>
- Foolmaun, R. K., & Ramjeeawon, T. (2012). Comparative life cycle assessment and life cycle costing of four disposal scenarios for used polyethylene terephthalate bottles in Mauritius. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 33(17), 2007–2018. <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.655321>
- Fraternali, F., Ciancia, V., Chechile, R., Rizzano, G., Feo, L., & Incarnato, L. (2011). Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete. *Composite Structures*, 93(9), 2368–2374. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.03.025>
- Fraternali, F., Farina, I., Polzone, C., Pagliuca, E., & Feo, L. (2013). On the use of R-PET strips for the reinforcement of cement mortars. *Composites Part B: Engineering*, 46, 207–210. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.070>
- Gardner, D. J., Han, Y., & Wang, L. (2015). Wood–Plastic composite technology. *Current Forestry Reports*, 1(3), 139–150. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0016-6>
- Ge, Z., Huang, D., Sun, R., & Gao, Z. (2014). Properties of plastic mortar made with recycled polyethylene terephthalate. *Construction and Building Materials*, 73, 682–687. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.005>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gomes, A., Matos, M., & Carvalho, I. (2008). Separate collection of the biodegradable fraction of MSW: an economic assessment. *Waste Management*, 28(10), 1711–1719.

- Gómez, G., Meneses, M., Ballinas, L., & Castells, F. (2008). Characterization of urban solid waste in Chihuahua, Mexico. *Waste Management*, 28(12), 2465–2471.
- Gonzalez-Trevizo, M. E. (2015). Método simplificado para determinar propiedades termofísicas de especímenes en régimen estacionario. *Palapa*, 3(2), 59–70.
- Goodfellow. (n.d.). *Material properties*.
http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat2.php?ewd_token=TZYvvaDSWKbevxA Nm1amgL8Qz6MMnf&n=UeNfDSkBSiF6rwLQIG1xGgm71ZenWY
- Grant, T., James, K. L., Lundie, S., & Sonneveld, K. (2001). *Report for Life Cycle Assessment for paper and packaging waste management scenarios in Victoria*.
- Guillén Guillén, C. A., Muciño Vélez, A., Santa Ana Lozada, P., & Verduzco Chirino, G. (2018). Análisis de las propiedades térmicas del Arundo Donax (carrizo) y Zea Mays (caña maíz) para su uso como material aislante de cubiertas. *Academia XXII*, 9(18), 90.
<https://doi.org/10.22201/fa.2007252xp.2018.18.67947>
- Gulhane, S. S., & Gulhane, S. N. (2017). *Analysis of Housing Structures Made From Recycled Plastic*. May, 45–55.
- Hassan, T., Jamshaid, H., Mishra, R., & Khan, M. Q. (2020). Acoustic , Mechanical and Thermal Properties of Green Composites Reinforced with Natural. *Polymers*.
- Hernández Sampeiri, R. (n.d.). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN*.
- Herrera, J. P., Bedoya-Ruiz, D., & Hurtado, J. E. (2018). Seismic behavior of recycled plastic lumber walls: An experimental and analytical research. *Engineering Structures*, 177, 566–578.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.006>
- Hittini, W., Mourad, A. I., & Abu-jdayil, B. (2019). Cleaner production of thermal insulation boards utilizing buffing dust waste. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117603.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117603>
- Horta, J. F., Simões, F. J., & Mateus, A. (2017). Study of Wood-Plastic Composites with Reused High Density Polyethylene and Wood Sawdust. *Procedia Manufacturing*, 12.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.08.026>
- Hsie, M., Tu, C., & Song, P. S. (2008). Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced

- concrete. *Materials Science and Engineering A*, 494(1–2), 153–157.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.05.037>
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*, 262(December 2020), 0–3. p. | 210
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- Hysek, S., Neuberger, P., Sikora, A., Schonfelder, O., & Ditommaso, G. (2019). Waste Utilization : Insulation Panel from Recycled. *Materials*.
- Ibarra-Salzar, A. B., & Rojas-Pacheco, F. J. (2012). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR PARABÓLICO GIRATORIO DE MEDIANA TEMPERATURA*.
- Incropera, F. P., & De Witt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* (4th ed.). Pearson Educación.
- International Energy Agency. (2018). *2018 Global Status Report - Global Alliance for Buildings and Construction*.
https://webstore.iea.org/download/direct/2408?fileName=2018_Global_Status_Report.pdf
- International Organization for Standardization. (1991). *ISO 8302:1991. Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Guarded hot plate apparatus*.
www.iso.org/standard/15422.html
- IPCC. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis* (V. B. and P. M. M. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia & (eds.)] (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Iucolano, F., Liguori, B., Caputo, D., Colangelo, F., & Cioffi, R. (2013). Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties. *Materials and Design*, 52, 916–922.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.025>
- Jnr, A. K., Yunana, D., Kamsouloum, P., Webster, M., Wilson, D. C., & Cheeseman, C. (2018). Recycling waste plastics in developing countries : Use of low-density polyethylene water sachets to form plastic bonded sand blocks. *Waste Management*, 80, 112–118.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.003>

- Johansson, P., Ekstrand-Tobin, A., & Bok, G. (2014). An innovative test method for evaluating the critical moisture level for mould growth on building materials. *Building and Environment*, 81, 404–409. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.002>
- Jun, Z., Xiang-ming, W., Jian-min, C., & Kai, Z. (2008). Optimization of processing variables in wood-rubber composite panel manufacturing technology. *Bioresource Technology*, 99(7), 2384–2391. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.031>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Woerdan, F. Van. (2018). *What a Waste 2.0 Introduction*. 1–38. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Kehinde, O., Omotosho, O. A., & Ohijeagbon, I. O. (2019). The Effect of Varying Sand and Plastic Additives on the Mechanical Properties of Cement Matrix Tiles. *Journal of Physics: Conference Series*, 1378(2). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/2/022077>
- Keskisaari, A., Kärki, T., & Vuorinen, T. (2019). Mechanical properties of recycled polymer composites made from side-stream materials from different industries. *Sustainability (Switzerland)*, 11(21). <https://doi.org/10.3390/su11216054>
- Kim, J. H. J., Park, C. G., Lee, S. W., Lee, S. W., & Won, J. P. (2008). Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites Part B: Engineering*, 39(3), 442–450. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.05.001>
- Kim, S. B., Yi, N. H., Kim, H. Y., Kim, J. H. J., & Song, Y. C. (2010). Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 32(3), 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002>
- Krishna, B. V., & Reddy, E. R. (2018). *Applications of green materials for the preparation of eco- friendly bricks and pavers*. 7, 75–79.
- Krishnaswamy, B. P., & Lampo, R. (2001). Recycled-Plastic Lumber Standards : From Waste Plastics to Markets for Plastic Lumber Bridges. *World Standards Day: 2001 Paper Competition*, 1–12. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.551.129&rep=rep1&type=pdf>
- Kumar, A., Jyske, T., & Möttönen, V. (2020). Properties of injection molded biocomposites reinforced withwood particles of short-rotation aspen and willow. *Polymers*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/polym12020257>

- Lachheb, A., Allouhi, A., El Marhoune, M., Saadani, R., Kousksou, T., Jamil, A., Rahmoune, M., & Oussouaddi, O. (2019). Thermal insulation improvement in construction materials by adding spent coffee grounds: An experimental and simulation study. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1411–1419. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.140>
- Lahtela, V., Mustonen, K., & Kärki, T. (2017). The effect of primary sludge on the mechanical performance of high-density polyethylene composites. *Industrial Crops and Products*, 104(November 2016), 129–132. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.039>
- Lawrence Berkeley National Laboratory, & James J. Hirsch & Associates. (2009). DOE-2.2 Building Energy Use and Cost Analysis Program. *DOE*, 4.
- Lee, S. J., Jeong, S. H., Kim, D. U., & Won, J. P. (2020). Graphene oxide as an additive to enhance the strength of cementitious composites. *Composite Structures*, 242(February), 112154. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112154>
- Lenkiewicz, Z., & Webster, M. (2017). *Making waste work: a toolkit, community waste management in middle and low income countries*.
- Li, D., Guo, Y., Zhu, S., & Chen, Y. (2019). Thermal Properties of Wood-Plastic Composites with. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma12060881>
- Limami, H., Manssouri, I., Cherkaoui, K., & Saadaoui, M. (2020). Thermal performance of unfired lightweight clay bricks with HDPE & PET waste plastics additives. *Journal of Building Engineering*, 30(February), 101251. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101251>
- Mansour, A. M. H., & Ali, S. A. (2015). Reusing waste plastic bottles as an alternative sustainable building material. *Energy for Sustainable Development*, 24, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.11.001>
- Mardoyan, A., & Braun, P. (2015). Analysis of Czech subsidies for solid biofuels. *International Journal of Green Energy*, 12(4), 405–408. <https://doi.org/10.1080/15435075.2013.841163>
- Marouf, J., & Ak, J. (2018). Managing Environmental Innovation: Case Study on Biorefineryconcept. *Universidad Del Zulia*.
- Marques, B., Tadeu, A., António, J., Almeida, J., & Brito, J. De. (2020). Mechanical , thermal and acoustic behaviour of polymer-based composite materials produced with rice husk and expanded cork. *Construction and Building Materials*, 239, 117851. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117851>

- Martinez Lopez, Y., Paes, J. B., Gustave, D., Gonçalves, F. G., Méndez, F. C., & Theodoro Nantet, A. C. (2019). Production of wood-plastic composites using cedrela odorata sawdust waste and recycled thermoplastics mixture from post-consumer products - A sustainable approach for cleaner production in Cuba. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118723. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118723>
- Martins, G., Antunes, F., Mateus, A., & Malça, C. (2017). Optimization of a wood plastic composite for architectural applications. *Procedia Manufacturing*, 12(December 2016), 203–220. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.08.025>
- Marzouk, O. Y., Dheilly, R. M., & Queneudec, M. (2007). Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management*, 27(2), 310–318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>
- Masri, T., Ounis, H., Sedira, L., Kaci, A., & Benchabane, A. (2018). Characterization of new composite material based on date palm leaflets and expanded polystyrene wastes. *Construction and Building Materials*, 164, 410–418. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.197>
- Moberg, Å., Finnveden, G., Johansson, J., & Lind, P. (2005). Life cycle assessment of energy from solid waste - Part 2: Landfilling compared to other treatment methods. *Journal of Cleaner Production*, 13(3), 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.02.025>
- Mohan, H. T., Jayanarayanan, K., & Mini, K. M. (2021). Recent trends in utilization of plastics waste composites as construction materials. *Construction and Building Materials*, 271, 121520. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121520>
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2005). Natural Fiber, Biopolymer, and Biocomposites. *CRC Press: Borarton*.
- Mondal, M. K., Bose, B. P., & Bansal, P. (2019). Recycling waste thermoplastic for energy efficient construction materials: An experimental investigation. *Journal of Environmental Management*, 240(May 2018), 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.016>
- Moreno, D. D. P., Hirayama, D., & Saron, C. (2018). Accelerated aging of pine wood waste / recycled LDPE composite. *Polymer Degradation and Stability*, 149(February), 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.01.014>
- Muni, R., Manalo, A. C., Karunasena, W., & Lau, K. (2016). Characterisation of recycled mixed plastic solid

- wastes: Coupon and full-scale investigation. *Waste Management*, 48, 72–80.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.017>
- Muñoz, P., Letelier, V., Muñoz, L., & Bustamante, M. A. (2020). Adobe bricks reinforced with paper & pulp wastes improving thermal and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 254. p. | 214
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119314>
- Mussatto, S. I., Machado, E. M. S., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2011). Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. *Food Bioprocess Technol.*
<https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z>
- Nakilcioğlu-Taş, E., & Ötleş, S. (2019). Physical characterization of Arabica ground coffee with different roasting degrees. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 91(2), e20180191.
<https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180191>
- National Geographic. (2018). *Plastics 101*. National Geographic Society. <https://youtu.be/ggh0Ptk3VGE>
- Ochi, T., Okubo, S., & Fukui, K. (2007). Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 448–455.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002>
- Ojeda-Benitez, S., & Saldaña-Durán, C. E. (2019). *MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN MÉXICO*. 35, 7–9. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.esp02.01>
- Pacheco-Torgal, F., Ding, Y., & Jalali, S. (2012). Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview. In *Construction and Building Materials* (Vol. 30, pp. 714–724). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.047>
- Pérez, C., Palacios, F., Vaca, H., Paredes, J., & Núñez, D. (2018). Mechanical characterization of a composite material of latex elastomeric matrix reinforced with recycled rubber granules to obtain floors. *AIP Conference Proceedings*, 2003. <https://doi.org/10.1063/1.5050363>
- Perugini, Floriana, Mastellone, M. L., & Arena, U. (2004). Environmental aspects of mechanical recycling of PE and PET: A life cycle assessment study. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 20(1), 69–84. <https://doi.org/10.1177/147776060402000106>
- Perugini, Floriane, Mastellone, M. L., & Arena, U. (2005). A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes. *Environmental Progress*,

24(2), 137–154. <https://doi.org/10.1002/ep.10078>

Petrella, A., Mundo, R. Di, & Notarnicola, M. (2020). *Recycled Expanded Polystyrene as Lightweight Aggregate for Environmentally Sustainable Cement Conglomerates*.

PlasticsEurope. (n.d.). *What are plastics?* <https://www.plasticseurope.org/en/about-plastics/what-are-plastics>

p. | 215

Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: a review. *Fuel Processing Technology*, 181, 215–232. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>

Pundien, I. (2020). Cleaner production of polyurethane foam : Replacement of conventional raw materials , assessment of fire resistance and environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, 183(2018), 760–771. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.164>

Puttaraj, M., Hiremath, S., Shetty, N., & Rai, P. P. G. T. B. (2014). Utilization Of Waste Plastic In Manufacturing Of Plastic-Soil Bricks. *International Journal of Technology Enhancements and Emerging Engineering Research*, 2(8), 102.

Qi, C., Zhang, F., Mu, J., Zhang, Y., & Yu, Z. (2020). Enhanced mechanical and thermal properties of hollow wood composites filled with phase-change material. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120373. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120373>

Rachakornkij, M., Poonyakan, A., Wecharatana, M., & Smittakorn, W. (2018). Potential Use of Plastic Wastes for Low Thermal Conductivity Concrete. *Materials*, 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma11101938>

Rajendran, S., Hodzic, A., Scelsi, L., Hayes, S., Soutis, C., Al-Maadeed, M. A., & Kahraman, R. (2013). Plastics recycling: insights into life cycle impact assessment methods. *Plastics, Rubber and Composites*. <https://doi.org/10.1179/1743289812Y.0000000002>

Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42(10), 1592–1600. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007>

Rana, M. N., Islam, M. N., Nath, S. K., Das, A. K., Ashaduzzaman, M., & Shams, M. I. (2020). Influence of chemical additive on the physical and mechanical properties of cement-bonded composite panels made from jute stick. *Journal of Building Engineering*, 31(March), 101358. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101358>

Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G.,

- Lützkendorf, T., & Passer, A. (2020). Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258(October 2019), 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>
- Rubino, C., Gisbert-pay, J., Liuzzi, S., Stefanizzi, P., Zamorano, M., & Martellotta, F. (2019). Composite Eco-Friendly Sound Absorbing Materials Made of Recycled Textile Waste and Biopolymers †. *Materials*.
- Sauer, M., Shiozawa, H., Ayala, P., Ruiz-Soria, G., Liu, X., Chernov, A., Krause, S., Yanagi, K., Kataura, H., & Pichler, T. (2013). Internal charge transfer in metallicity sorted ferrocene filled carbon nanotube hybrids. *Carbon*, 59, 237–245. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.03.014>
- Seiscubos. (2018). *Nivel de masa térmica*. <https://www.seiscubos.com/>
- SENER. (2018). Balance Nacional de Energía 2017. *Secretaría de Energía, Subsecretaría de Planeación y Transición Energética.*, 184.
- Shonfield, P. (2008). *LCA of management options for mixed waste plastics. Waste and Resources Action Programme.*
- Sijercic, E., & Leung, P. T. (2016). Effects of surface charge on the anomalous light extinction from metallic nanoparticles. *Optics Communications*, 370, 198–202. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.02.065>
- Silvestre, J. D., De Brito, J., & Pinheiro, M. D. (2014). Environmental impacts and benefits of the end-of-life of building materials - Calculation rules, results and contribution to a “cradle to cradle” life cycle. *Journal of Cleaner Production*, 66, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.028>
- Solanki, P., & Bhattarai, S. (2019). Properties of composite prepared by stabilizing soil with molten post-consumer plastic waste bottles. *Sustainable Construction Materials and Technologies*, 1(2000). <https://doi.org/10.18552/2019/idscomt5045>
- Sommerhuber, P. F., Wang, T., & Krause, A. (2019). Wood-plastic composites as potential applications of recycled plastics of electronic waste and recycled particleboard. *Journal of Cleaner Production*, 121(2016), 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.036>
- Sommerhuber, P. F., Welling, J., & Krause, A. (2015). Substitution potentials of recycled HDPE and wood particles from post-consumer packaging waste in Wood-Plastic Composites. *Waste Management*, 46, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.011>

- Sormunen, P. (2019). *Compression Molded Thermoplastic Composites Entirely Made of Recycled Materials*. <https://doi.org/10.3390/su11030631>
- Soucy, J., Godard, F., Rivard, P., & Koubaa, A. (2018). Rheological behavior of high-density polyethylene (HDPE) filled with paper mill sludge. *Journal of Applied Polymer Science*.
- Souza, A. M., Nascimento, M. F., Almeida, D. H., Lopes Silva, D. A., Almeida, T. H., Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2018). Wood-based composite made of wood waste and epoxy based ink-waste as adhesive: A cleaner production alternative. *Journal of Cleaner Production*, 193, 549–562. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.087>
- Souza, P. R., Nunes, C. S., Freitas, A. R., Belinato, J. R., Pilau, E. J., Fajardo, A. R., da Silva Filho, E. A., Schreiner, W. H., & Muniz, E. C. (2020). Sub- and supercritical D-limonene technology as a green process to recover glass fibres from glass fibre-reinforced polyester composites. *Journal of Cleaner Production*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119984>
- Stoica, A., Sandberg, M., & Holby, O. (2009). Energy use and recovery strategies within wastewater treatment and sludge handling at pulp and paper mills. *Bioresource Technology*, 100(14), 3497–3505. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.041>
- Sukontasukkul, P. (2009). Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1084–1092. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.021>
- Taboada-gonzález, P., Aguilar-virgen, Q., Taboada-, P., & Ojeda-benítez, S. (2012). Seasonal analysis of the generation and composition of solid waste: Potential use - A case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, September. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2893-5>
- Tawiah, B., Yu, B., Ullah, S., Wei, R., Yuen, R. K. K., Xin, J. H., & Fei, B. (2019). Flame retardant poly (lactic acid) biocomposites reinforced by recycled wool fibers – Thermal and mechanical properties. *Express Polymer Letters*, 13(8), 697–712.
- TEPPFA, T. E. P. P. and F. A. (n.d.). *Production Processes*. <https://www.teppfa.eu/benefits-of-plastic-pipes-and-fittings/production-processes/>
- Todd, R. H., Allen, D. K., & Alting, L. (1994). *Manufacturing Processes Reference Guide* (I. Industrial Press (ed.)).

Turku, I., & Kärki, T. (2019). Recyclability of plastic waste extracted from electrical devices. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 587, 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/587/1/012001>

Turku, Irina, Kärki, T., & Puurtinen, A. (2018). Durability of wood plastic composites manufactured from recycled plastic. *Heliyon*, 4(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00559>

Turku, Irina, Keskiisaari, A., Kärki, T., Puurtinen, A., & Marttila, P. (2017). Characterization of wood plastic composites manufactured from recycled plastic blends. *Composite Structures*, 161, 469–476. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.073>

U.S. Department of Energy. (2012). 2011 Buildings Energy Data Book. In *U.S. Department of Energy*. http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/ChapterIntro2.aspx%5Cnhttp://buildingsdatabook.eren.doe.gov/docs/DataBooks/2011_BEDB.pdf

Valdevino, D., Luis, R., Regina, H., Silva, T., Egert, P., Oscar, G., Parma, C., Girotto, E., Consoni, D., Benavides, R., Silva, L., & Faverzani, R. (2018). Recycled polyethylene terephthalate-based boards for thermal- acoustic insulation. *Journal of Cleaner Production*, 189, 251–262. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.069>

Väntsi, O., & Kärki, T. (2014). Utilization of recycled mineral wool as filler in wood-polypropylene composites. *Construction and Building Materials*, 55, 220–226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.050>

Velasco, P. M., Mendivil, M. A., Morales, M. P., & Muñoz, L. (2016). Eco-fired clay bricks made by adding spent coffee grounds: a sustainable way to improve buildings insulation. *Materials and Structures*, 49, 641–650.

Verma, S. P. (2016). *El análisis estadístico de datos composicionales* (Universidad Nacional Autónoma de México (ed.)).

Wagner, J. R., Mount, E. M., & Giles, H. F. (2014). *Extrusion - the Definitive Processing Guide and Handbook* (William Andrew Inc (ed.)).

Wenisch, S., Rousseaux, P., & Métivier-Pignon, H. (2004). Analysis of technical and environmental parameters for waste-to-energy and recycling: Household waste case study. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(5), 519–529. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2003.10.001>

- Williams, C., Goodhew, S., Griffiths, R., & Watson, L. (2010). The feasibility of earth block masonry for building sustainable walling in the United Kingdom. *Journal of Building Appraisal*, 6, 99–108. <https://doi.org/10.1057/jba.2010.15>.
- Wollny, V., Dehoust, G., Fritsche, U., & Weinem, P. (2001). Comparison of plastic packaging waste management options: feedstock recycling versus energy recovery in Germany. *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1162/108819801760049468>
- Xie, Y., Tong, Q., Chen, Y., Liu, J., & Lin, M. (2011). Manufacture and properties of ultra-low density fiberboard from wood fiber. *BioResources*, 6(4), 4055–4066.
- Yang, C., Navarro, M. E., Zhao, B., Leng, G., Xu, G., Wang, L., Jin, Y., & Ding, Y. (2016). Thermal conductivity enhancement of recycled high density polyethylene as a storage media for latent heat thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 152, 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.02.022>
- Yang, J., Wu, H., Xu, X., Huang, G., Xu, T., Guo, S., & Liang, Y. (2019). Numerical and experimental study on the thermal performance of aerogel insulating panels for building energy efficiency. *Renewable Energy*, 138, 445–457. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.120>
- Yuan, H., Zhang, S., Lu, C., He, S., & An, F. (2013). Improved interfacial adhesion in carbon fiber/polyether sulfone composites through an organic solvent-free polyamic acid sizing. *Applied Surface Science*, 279, 279–284. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.04.085>
- Zami, M., & Lee, A. (2010). Economic benefits of contemporary earth construction in low- cost urban housing: state of the art review. *Journal of Building Appraisal*, 5, 259–271. <https://doi.org/10.1057/jba.2009.32>.
- Zeng, Y., Trauth, K. M., Peyton, R. L., & Banerji, S. K. (2005). Characterization of solid waste disposed at Columbia Sanitary Landfill in Missouri. *Waste Management & Research*, 23(1), 62–71.
- Zhang, X., Hao, X., Hao, J., & Wang, Q. (2018). Thermochimica Acta Heat transfer and mechanical properties of wood-plastic composites filled with flake graphite. *Thermochimica Acta*, 664(September 2017), 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.04.003>
- Zheng, S., Bellido-Aguilar, D. A., Hu, J., Huang, Y., Zhao, X., Wang, Z., Zeng, X., Zhang, Q., & Chen, Z. (2019). Waterborne bio-based epoxy coatings for the corrosion protection of metallic substrates.

- Progress in Organic Coatings*, 136(August), 105265. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105265>
- Zhou, Y., Fan, M., & Lin, L. (2017). Investigation of bulk and in situ mechanical properties of coupling agents treated wood plastic composites. *Polymer Testing*, 58, 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.12.026>
- Zhou, Y., Stanchev, P., Katsou, E., Awad, S., & Fan, M. (2019). A circular economy use of recovered sludge cellulose in wood plastic composite production : Recycling and eco-efficiency assessment. *Waste Management*, 99, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.08.037>
- Zhou, Y., Wang, Y., & Fan, M. (2019). Incorporation of tyre rubber into wood plastic composites to develop novel multifunctional composites: Interface and bonding mechanisms. *Industrial Crops and Products*, 141(April), 111788. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111788>

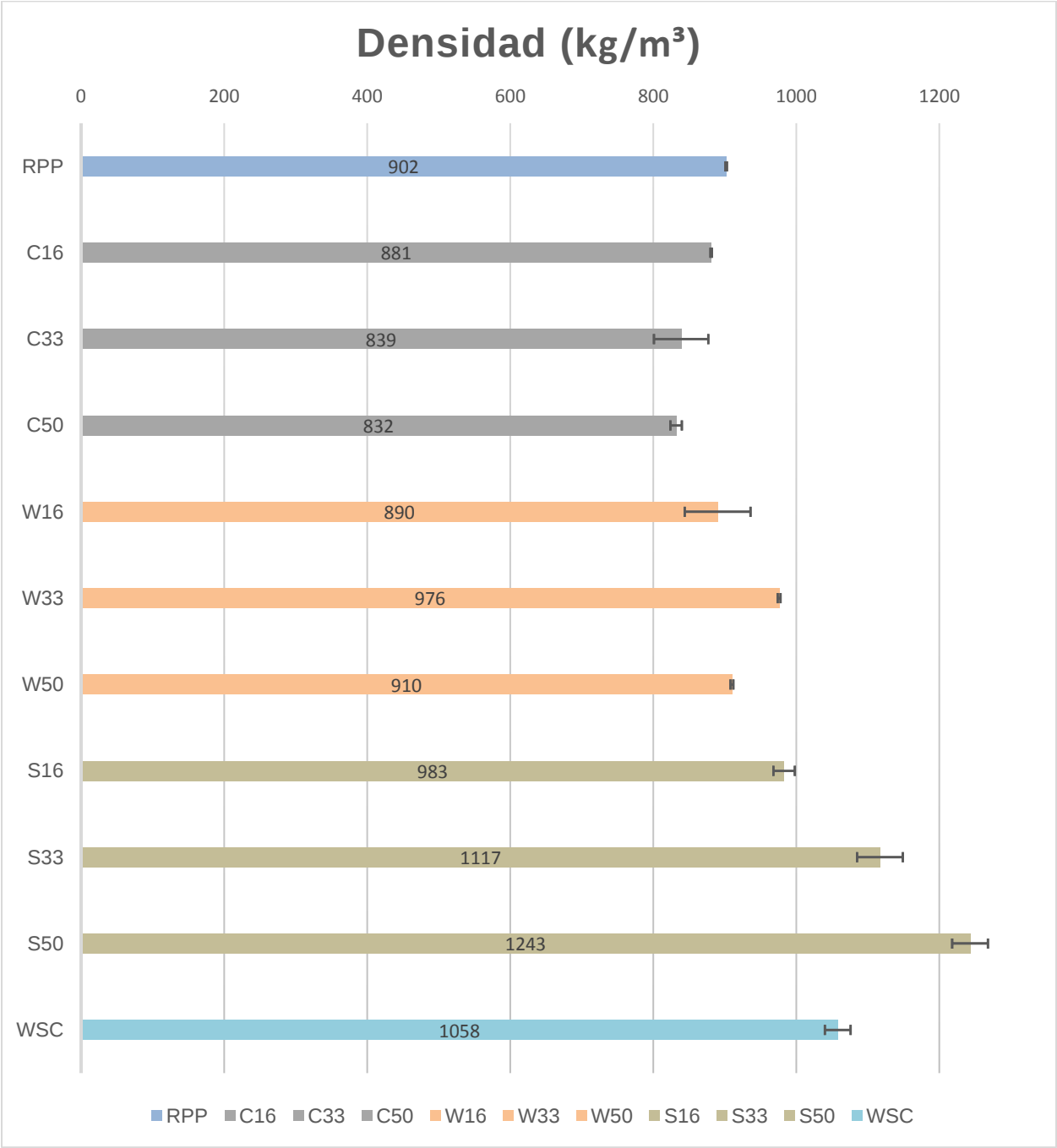
APÉNDICE A

Tabla A 1. Resultados de densidad (ρ).

Código	Densidad (ρ)						
	ρ (kg/m ³)	Observa- ciones (n)	ρ Promedio (kg/m ³)	D.S. (σ)	C.I. (95%)	L.I. (kg/m ³)	L.S. (kg/m ³)
RPP-01	902	3	902	1	1	901	903
RPP-02	901						
RPP-03	902						
C16-01	881	3	881	1	1	880	883
C16-02	882						
C16-03	880						
C33-01	872	3	839	34	38	801	877
C33-02	841						
C33-03	805						
C50-01	825	3	832	7	8	824	839
C50-02	832						
C50-03	838						
W16-01	850	3	890	41	46	844	936
W16-02	932						
W16-03	888						
W33-01	956	3	976	17	20	956	996
W33-02	985						
W33-03	986						
W50-01	889	3	910	18	20	889	930
W50-02	916						
W50-03	923						
S16-01	976	3	983	14	15	968	998
S16-02	975						
S16-03	999						
S33-01	1 142	3	1 117	29	32	1 085	1 149
S33-02	1 122						
S33-03	1 086						
S50-01	1 229	3	1 243	22	25	1 218	1 268
S50-03	1 269						
S50-04	1 231						
WSC-01	1 053	4	1 058	18	18	1 040	1 076
WSC-02	1 071						
WSC-03	1 073						
WSC-04	1 034						

Nota. A partir del total de valores de densidad por muestra obtenidos de cada espécimen del material, se procedió a estimar el promedio para obtener los valores de desviación estándar (D.S), intervalo de confianza al 95%, límite inferior (L.I) y límite superior (L.S).

Figura A 1. Gráfica de densidad (p) e intervalo de confianza (C.I.).



Nota: Las unidades están dadas en (kg/m³). El valor presentado al centro de la barra representa la media (promedio) de la muestra. La línea delgada al final de cada barra (lado derecho), representa el intervalo de confianza al 95% por muestra, es decir la estimación del límite inferior (L.I) y límite superior (L.S).

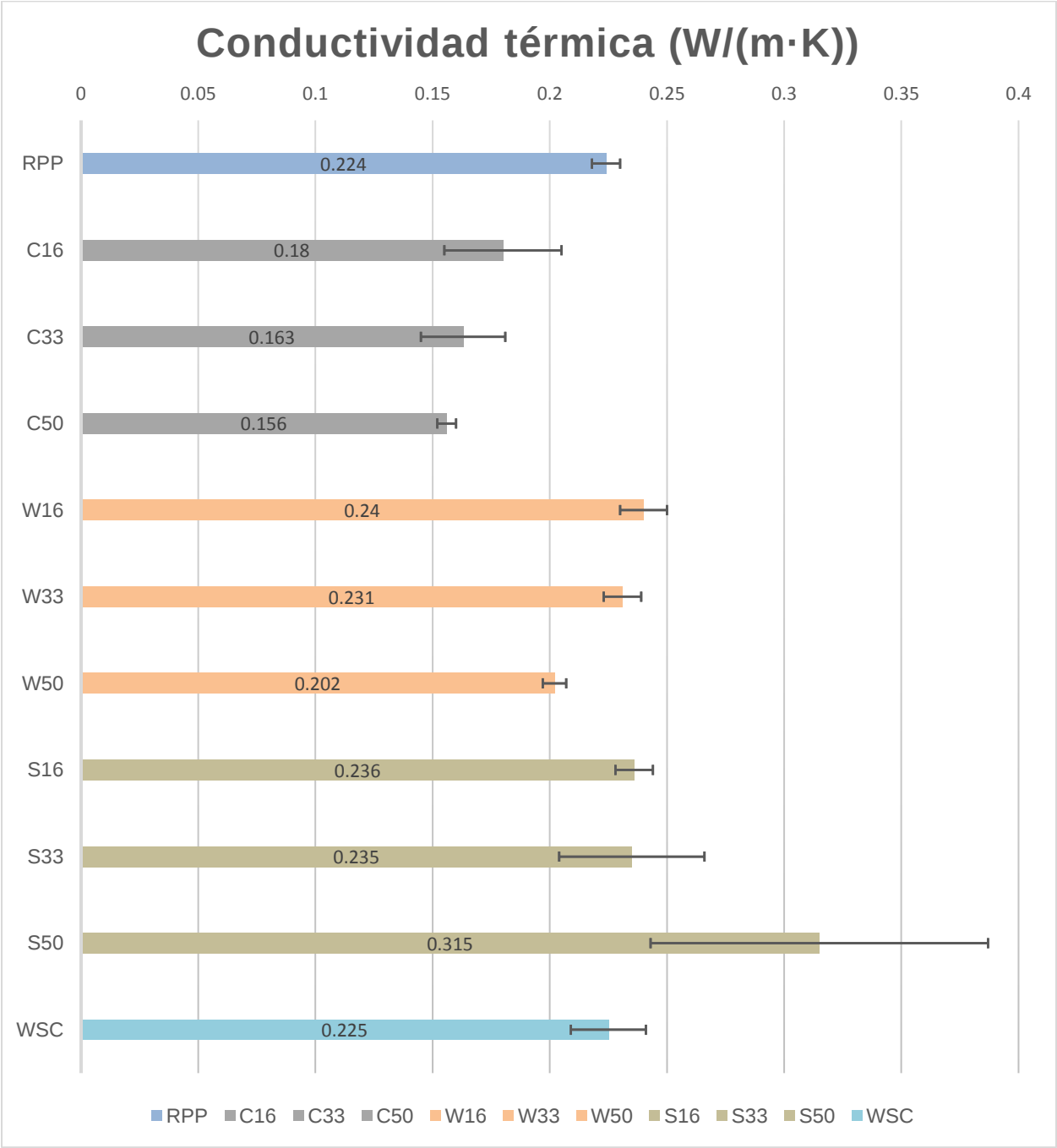
Tabla A 2. Resultados de conductividad térmica (λ).

Código	Conductividad térmica (λ)						
	λ (W/(m·K))	Observaciones (n)	λ Promedio (W/(m·K))	D.S. (σ)	C.I. (95%)	L.I. (W/(m·K))	L.S. (W/(m·K))
RPP-01	0.226	3	0.224	0.005	0.006	0.218	0.229
RPP-02	0.227						
RPP-03	0.218						
C16-01	0.156	3	0.180	0.022	0.025	0.155	0.206
C16-02	0.200						
C16-03	0.185						
C33-01	0.181	3	0.163	0.016	0.018	0.144	0.181
C33-02	0.156						
C33-03	0.151						
C50-01	0.157	3	0.156	0.003	0.004	0.152	0.159
C50-02	0.158						
C50-03	0.152						
W16-01	0.248	3	0.240	0.009	0.010	0.231	0.250
W16-02	0.231						
W16-03	0.242						
W33-01	0.224	3	0.231	0.007	0.008	0.223	0.239
W33-02	0.238						
W33-03	0.231						
W50-01	0.198	3	0.202	0.004	0.005	0.197	0.206
W50-02	0.206						
W50-03	0.201						
S16-01	0.229	3	0.236	0.007	0.008	0.228	0.244
S16-02	0.235						
S16-03	0.243						
S33-01	0.266	3	0.235	0.027	0.031	0.204	0.266
S33-02	0.214						
S33-03	0.225						
S50-01	0.242	3	0.315	0.063	0.072	0.243	0.386
S50-03	0.343						
S50-04	0.359						
WSC-01	0.236	4	0.225	0.016	0.016	0.210	0.241
WSC-02	0.239						
WSC-03	0.204						
WSC-04	0.222						

p. | 223

Nota. A partir del total de valores de conductividad por muestra obtenidos de cada espécimen del material, se procedió a estimar el promedio para obtener los valores de desviación estándar (D.S), intervalo de confianza al 95%, límite inferior (L.I) y límite superior (L.S).

Figura A 2. Gráfica de conductividad térmica (λ) e intervalo de confianza (C.I.).



Nota: Las unidades están dadas en (W/(m·K)). El valor presentado al centro de la barra representa la media (promedio) de la muestra. La línea delgada al final de cada barra (lado derecho), representa el intervalo de confianza al 95% por muestra, es decir la estimación del límite inferior (L.I) y límite superior (L.S).

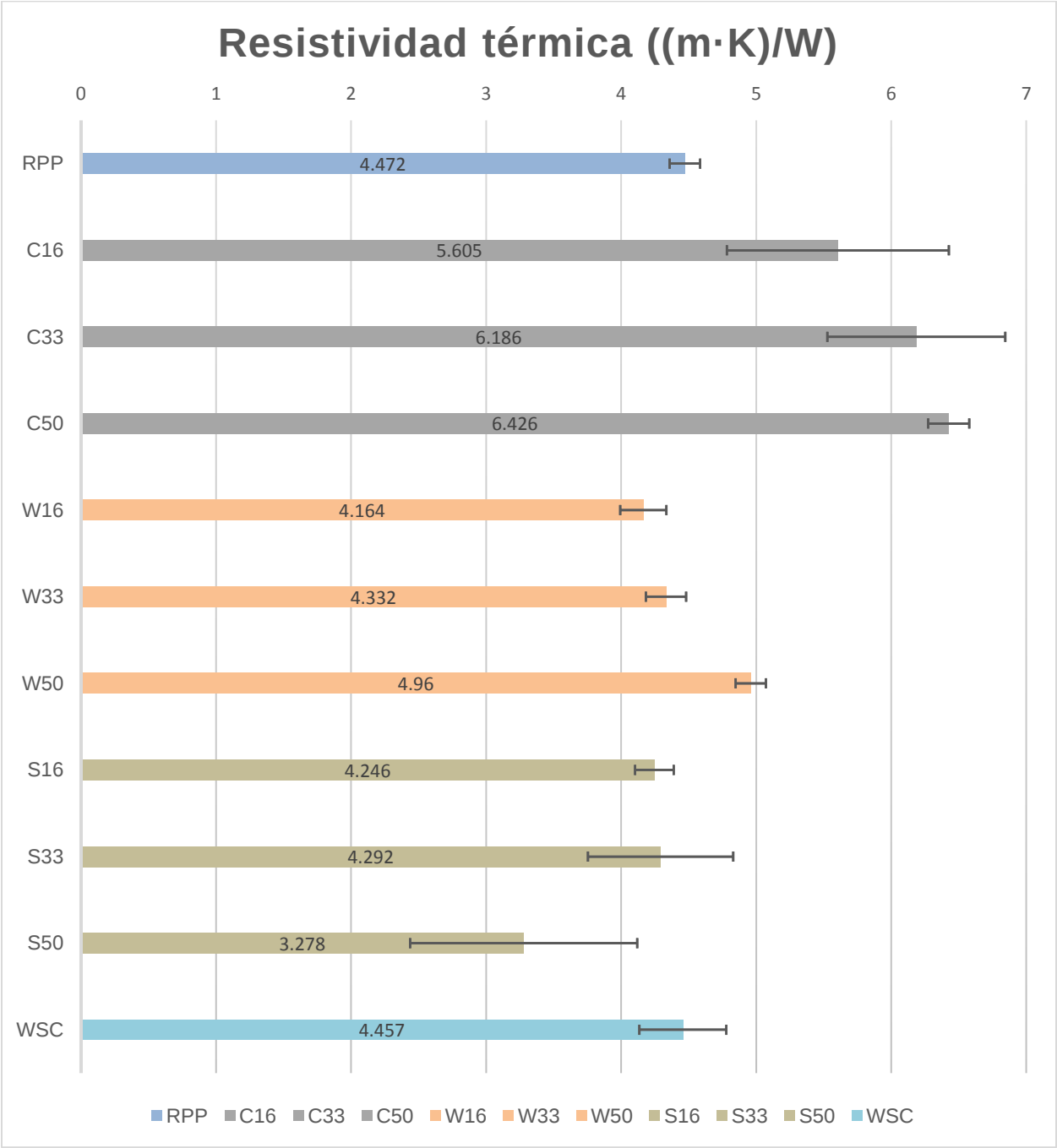
Tabla A 3. Resultados de resistividad térmica (Rho).

Código	Resistividad térmica (Rho)						
	Rho ((m·K)/W)	Observa- ciones (n)	Rho Promedio ((m·K)/W)	D.S. (σ)	C.I. (95%)	L.I. ((m·K)/W)	L.S. ((m·K)/W)
RPP-01	4.425	3	4.472	0.100	0.113	4.359	4.585
RPP-02	4.405						
RPP-03	4.587						
C16-01	6.410	3	5.605	0.726	0.822	4.784	6.427
C16-02	5.000						
C16-03	5.405						
C33-01	5.525	3	6.186	0.582	0.659	5.527	6.845
C33-02	6.410						
C33-03	6.623						
C50-01	6.369	3	6.426	0.134	0.152	6.274	6.578
C50-02	6.329						
C50-03	6.579						
W16-01	4.032	3	4.164	0.151	0.171	3.994	4.335
W16-02	4.329						
W16-03	4.132						
W33-01	4.464	3	4.332	0.131	0.149	4.183	4.480
W33-02	4.202						
W33-03	4.329						
W50-01	5.051	3	4.960	0.099	0.112	4.848	5.072
W50-02	4.854						
W50-03	4.975						
S16-01	4.367	3	4.246	0.126	0.143	4.103	4.388
S16-02	4.255						
S16-03	4.115						
S33-01	3.759	3	4.292	0.475	0.538	3.754	4.830
S33-02	4.673						
S33-03	4.444						
S50-01	4.132	3	3.278	0.743	0.841	2.437	4.118
S50-03	2.915						
S50-04	2.786						
WSC-01	4.237	4	4.457	0.328	0.322	4.135	4.779
WSC-02	4.184						
WSC-03	4.902						
WSC-04	4.505						

p. | 225

Nota. A partir del total de valores de resistividad por muestra obtenidos de cada espécimen del material, se procedió a estimar el promedio para obtener los valores de desviación estándar (D.S), intervalo de confianza al 95%, límite inferior (L.I) y límite superior (L.S).

Figura A 3. Gráfica de resistividad térmica (Rho) e intervalo de confianza (C.I.).



Nota: Las unidades están dadas en ((m·K)/W). El valor presentado al centro de la barra representa la media (promedio) de la muestra. La línea delgada al final de cada barra (lado derecho), representa el intervalo de confianza al 95% por muestra, es decir la estimación del límite inferior (L.I) y límite superior (L.S).

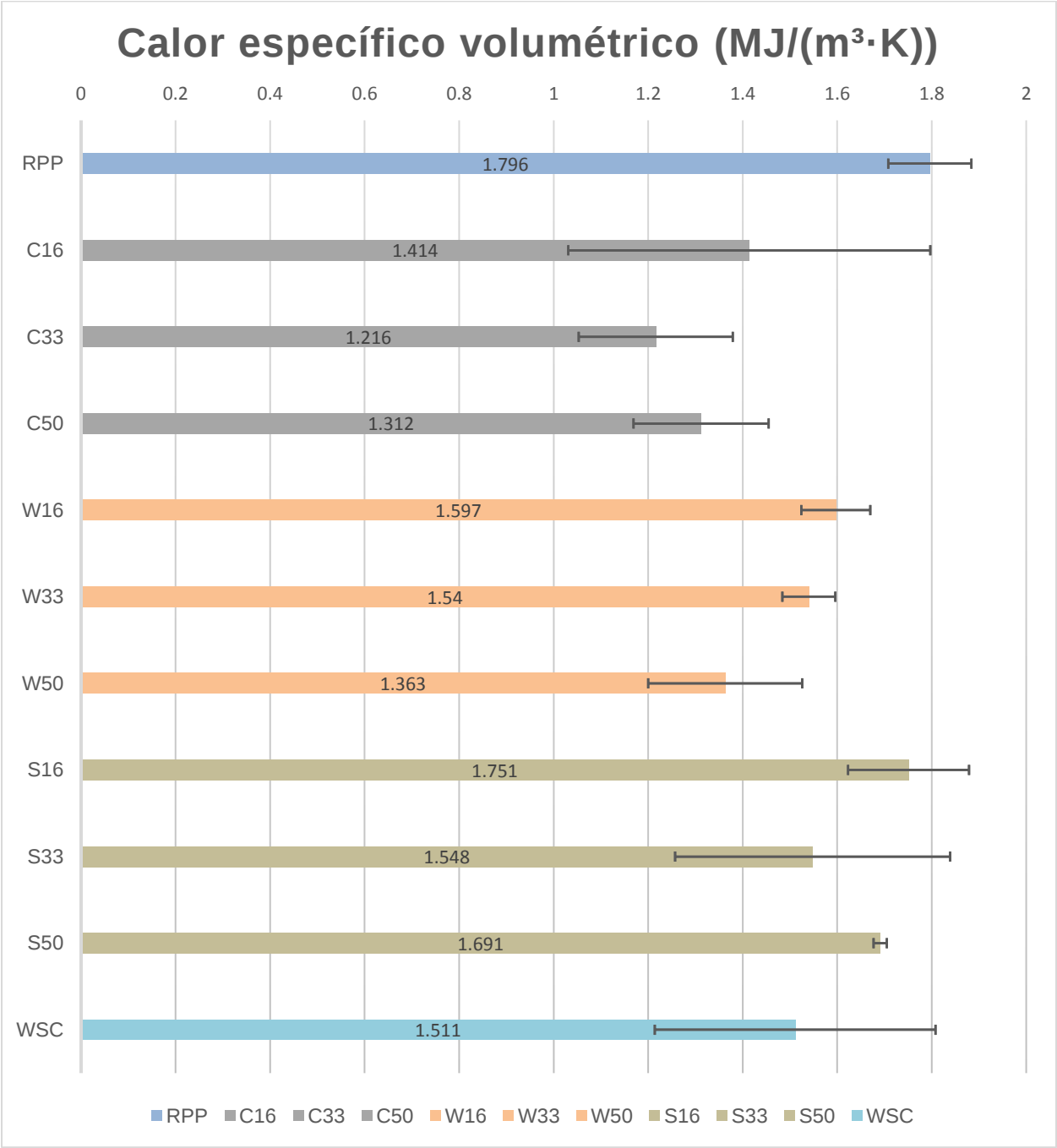
Tabla A 4. Resultados de calor específico volumétrico (VCp).

Calor específico volumétrico (VCp)							
Código	VCp (MJ/(m ³ ·K))	Observa- ciones (n)	VCp Promedio (MJ/(m ³ ·K))	D.S. (σ)	C.I. (95%)	L.I. (MJ/(m ³ ·K))	L.S. (MJ/(m ³ ·K))
RPP-01	1.816	3	1.796	0.078	0.088	1.708	1.884
RPP-02	1.862						
RPP-03	1.710						
C16-01	1.664	3	1.414	0.338	0.383	1.031	1.797
C16-02	1.549						
C16-03	1.029						
C33-01	1.359	3	1.216	0.144	0.163	1.053	1.379
C33-02	1.217						
C33-03	1.071						
C50-01	1.303	3	1.312	0.126	0.143	1.169	1.455
C50-02	1.191						
C50-03	1.443						
W16-01	1.523	3	1.597	0.064	0.073	1.524	1.670
W16-02	1.631						
W16-03	1.638						
W33-01	1.540	3	1.540	0.050	0.056	1.484	1.596
W33-02	1.590						
W33-03	1.491						
W50-01	1.197	3	1.363	0.144	0.163	1.200	1.525
W50-02	1.456						
W50-03	1.435						
S16-01	1.647	3	1.751	0.113	0.128	1.623	1.878
S16-02	1.734						
S16-03	1.871						
S33-01	1.283	3	1.548	0.257	0.291	1.256	1.839
S33-02	1.563						
S33-03	1.797						
S50-01	1.706	3	1.691	0.013	0.014	1.677	1.706
S50-02	1.684						
S50-03	1.684						
WSC-01	1.290	4	1.511	0.303	0.297	1.214	1.808
WSC-02	1.924						
WSC-03	1.277						
WSC-04	1.552						

p. | 227

Nota. A partir del total de valores de calor específico volumétrico por muestra obtenidos de cada espécimen del material, se procedió a estimar el promedio para obtener los valores de desviación estándar (D.S), intervalo de confianza al 95%, límite inferior (L.I) y límite superior (L.S).

Figura A 4. Gráfica de calor específico volumétrico (VCp) e intervalo de confianza (C.I.).



Nota: Las unidades están dadas en (MJ/(m³·K)). El valor presentado al centro de la barra representa la media (promedio) de la muestra. La línea delgada al final de cada barra (lado derecho), representa el intervalo de confianza al 95% por muestra, es decir la estimación del límite inferior (L.I) y límite superior (L.S).

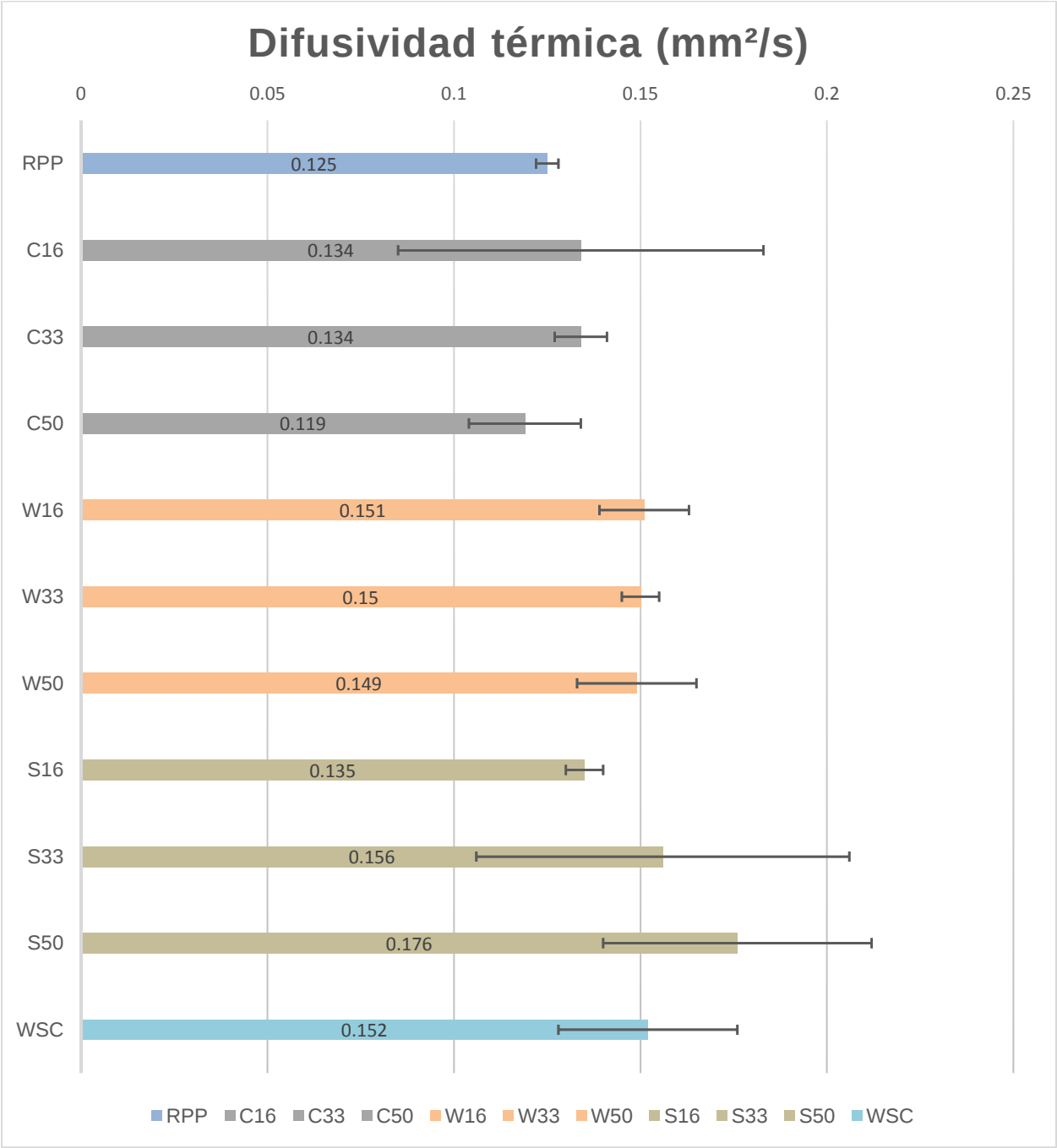
Tabla A 5. Resultados de difusividad térmica (D).

Código	Difusividad térmica (D)						
	D (mm ² /s)	Observa- ciones (n)	D Promedio (mm ² /s)	D.S. (σ)	C.I. (95%)	L.I. (mm ² /s)	L.S. (mm ² /s)
RPP-01	0.124	3	0.125	0.003	0.003	0.121	0.128
RPP-02	0.122						
RPP-03	0.127						
C16-01	0.094	3	0.134	0.043	0.049	0.085	0.183
C16-02	0.129						
C16-03	0.180						
C33-01	0.133	3	0.134	0.006	0.007	0.127	0.141
C33-02	0.128						
C33-03	0.141						
C50-01	0.120	3	0.119	0.014	0.015	0.104	0.135
C50-02	0.133						
C50-03	0.105						
W16-01	0.163	3	0.151	0.011	0.012	0.138	0.163
W16-02	0.142						
W16-03	0.148						
W33-01	0.145	3	0.150	0.005	0.005	0.145	0.155
W33-02	0.150						
W33-03	0.155						
W50-01	0.165	3	0.149	0.014	0.016	0.133	0.165
W50-02	0.141						
W50-03	0.140						
S16-01	0.139	3	0.135	0.005	0.005	0.130	0.140
S16-02	0.136						
S16-03	0.130						
S33-01	0.207	3	0.156	0.044	0.050	0.106	0.207
S33-02	0.137						
S33-03	0.125						
S50-01	0.142	3	0.176	0.031	0.036	0.141	0.212
S50-02	0.183						
S50-03	0.204						
WSC-01	0.183	4	0.152	0.025	0.024	0.128	0.177
WSC-02	0.124						
WSC-03	0.160						
WSC-04	0.143						

p. | 229

Nota. A partir del total de valores de difusividad por muestra obtenidos de cada espécimen del material, se procedió a estimar el promedio para obtener los valores de desviación estándar (D.S), intervalo de confianza al 95%, límite inferior (L.I) y límite superior (L.S).

Figura A 5. Gráfica de difusividad térmica (D) e intervalo de confianza (C.I.).



Nota: Las unidades están dadas en (mm²/s). El valor presentado al centro de la barra representa la media (promedio) de la muestra. La línea delgada al final de cada barra (lado derecho), representa el intervalo de confianza al 95% por muestra, es decir la estimación del límite inferior (L.I) y límite superior (L.S).

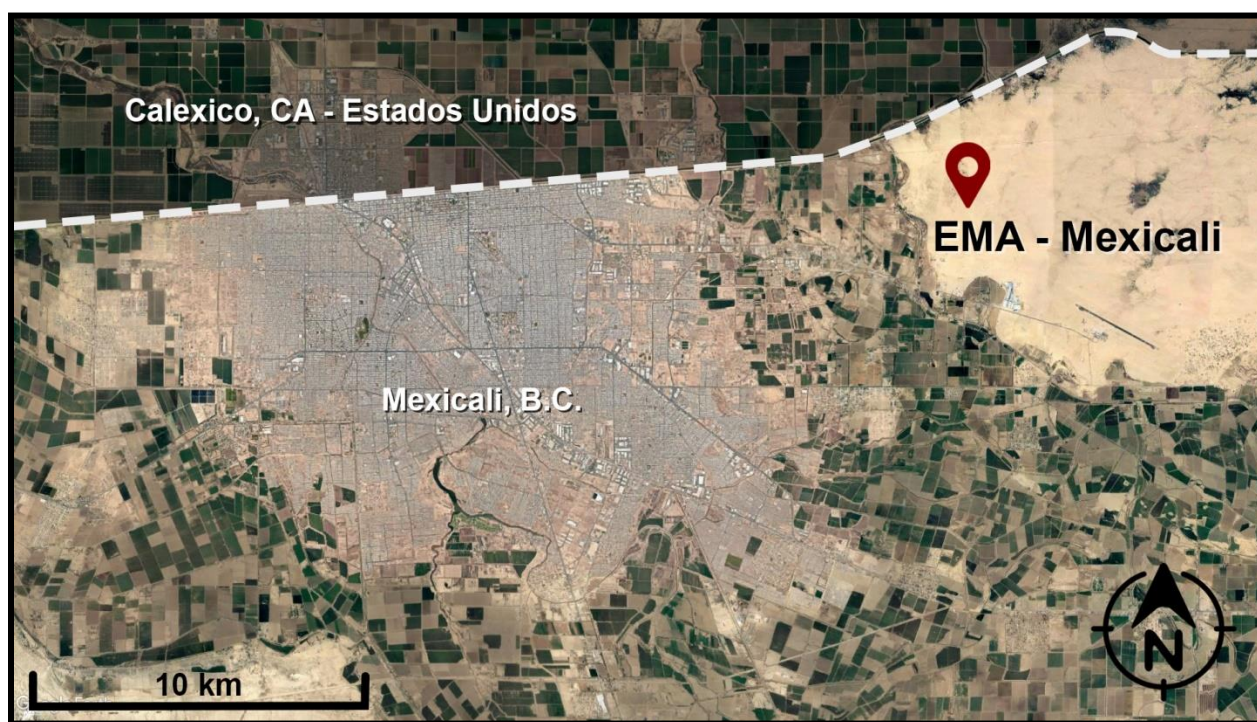
APÉNDICE B

1. ANÁLISIS CLIMÁTICO

Para el análisis climático se utilizaron los datos obtenidos de la Estación Meteorológica Automática (EMA) BC03-Mexicali durante un periodo de registro de 20 años comprendidos desde el 26 de marzo de 2000, hasta el 02 de septiembre de 2019 (Tabla B 1). La estación meteorológica se encuentra ubicada al este del centro urbano de la ciudad de Mexicali, B.C. (Figura B 1), siendo sus coordenadas geográficas: latitud $32^{\circ} 40' 01''$ N, longitud $115^{\circ} 17' 27''$ W, altitud 50 msnm, misma que es dependiente del Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA).

p. | 231

Figura B 1. Ubicación de la EMA BC03-Mexicali (Elaboración propia a partir de información del SMN-CONAGUA e imágenes de Google Earth).



De acuerdo con el sistema de clasificación climática de Köppen (García, 2014), el clima de la ciudad de Mexicali es BW(h')hs(x')(e') (muy seco, muy extremo, no es tipo ganges y con presencia de canícula). Por otra parte, de acuerdo con el sistema de agrupación bioclimática local (Fuentes & Figueroa, 1990), Mexicali corresponde al bioclima **cálido seco**.

Tabla B 1. Normales climatológicas (período 2000-2019) de la Estación Meteorológica Automática Mexicali, dependiente del Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA).

COORDENADAS		32° 40' 0" N 115° 17' 26" W 50 msnm		CIUDAD MEXICALI, B.C.																
PERÍODO		2000-2019		CLIMA: BW(h°)s(x°)(e°) (Muy seco, muy extremo, no es tipo gauges, presencia de canícula) BIOCLIMA: Cálido Seco																
FUENTE	VARIABLES CLIMATOLÓGICAS		UNIDAD	AÑOS	MESES												ANUAL			
					ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC				
a	TEMPERATURA	MAXIMA EXTREMA FECHA	°C	20	31.7	32.3	38.0	40.0	45.3	49.1	49.1	46.9	46.3	42.8	35.7	31.2	49.1			
a			n/d	2003 Ene 31	29/2016	2004 Mar 21	2000 Abr 26	2008 may 15	202017	2005 Jul 17	25/2011	03/2010	03/2012	2008 nov 01	2003 Dic 04	20-jun.-2017				
a		PROMEDIO MÁXIMA	°C	20	21.9	23.6	27.8	31.0	35.3	40.5	42.4	42.1	39.8	32.9	26.2	21.1	32.1			
a		MEDIA	°C	20	15.6	17.1	20.8	23.5	27.4	32.3	35.2	35.1	32.6	19.8	15.0	15.0	25.0			
a		PROMEDIO MINIMA	°C	20	9.3	10.5	13.7	16.0	19.4	24.0	28.1	28.0	25.4	19.0	13.5	8.9	18.0			
a	MINIMA EXTREMA FECHA	MINIMA EXTREMA	°C	20	-1.8	-0.4	5.4	8.3	11.3	14.7	19.9	18.9	15.0	10.3	3.7	1.3	-1.8			
a			n/d	2007 Ene 14	03/2011	2002 Mar 03	2001 Abr 10	16/2015	02/2011	2000 Jul 05	30/2010	2002 Sep 30	2009 oct 30	26/2010	2000 Dic 30	2007 Ene 14				
b		OSCILACIÓN	°C	20	12.5	13.1	14.1	15.0	15.9	16.5	14.3	14.1	14.4	13.9	12.7	12.3	14.1			
c		INSOLACIÓN TOTAL		n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d			
a			TOTAL (Global)	h	20	622.6	739.2	872.3	973.6	984.6	979.1	964.1	930.8	870.9	766.6	642.4	574.8	827.6		
a	DIRECTA		Win ²	20	554.3	590.5	656.4	765.5	752.8	782.6	747.1	692.6	717.9	692.2	589.6	552.3	674.5			
a	RADIACIÓN	DIFFUSA	Win ²	20	68.3	148.7	215.9	208.1	241.8	196.5	217.0	238.3	152.9	74.4	52.8	22.5	153.1			
a		MEDIA	hPa	20	1017.5	1035.0	1011.8	1010.3	1007.6	1005.4	1006.6	1006.6	1006.9	1009.9	1014.3	1017.1	1 010.8			
d		TENSION MEDIA DE VAPOR	mb	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d			
a	HUMEDAD	RELATIVA MÁXIMA	%	20	59.5	58.8	51.9	48.8	47.7	48.2	56.0	53.6	53.6	52.1	52.7	60.2	54.1			
a		RELATIVA MEDIA	%	20	41.7	39.9	33.2	29.8	27.7	26.2	33.2	35.5	33.1	33.4	35.8	42.2	34.3			
a		RELATIVA MINIMA	%	20	23.7	21.8	17.0	14.5	12.9	11.0	16.3	17.3	15.6	17.9	20.2	24.4	17.7			
c		EVAPORACIÓN TOTAL	mm	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d			
c		TEMP. DE BULBO HUMEDO	°C	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d			
a	PRECIPITACIÓN	TOTAL	mm	20	5.5	7.4	2.5	1.1	1.1	0.2	4.0	7.4	3.6	3.6	1.5	5.5	43.5			
a		MAXIMA	mm	20	24.0	27.3	11.7	10.4	13.7	3.6	41.1	51.3	26.7	19.9	12.6	36.3	51.3			
a		FECHA	aaaa	n/d	2010	2003	2015	2004	2015	2015	2011	2005	2013	2004	2004	2011	AGO-2005			
a		MAXIMA EN 24 h	mm	20	15.4	21.3	7.8	7.8	12.2	2.3	38.9	31.5	19.8	14.7	11.9	29.7	38.9			
a		FECHA	dd/aaaa	n/d	21/2010	19/2011	07/2010	2004 Abr 02	15/2015	09/2015	08/2011	2005 Ago 10	08/2013	2005 Oct 16	2004 Nov 21	13/2011	8-jul.-2011			
a		MAXIMA EN 1 h	mm	20	3.6	7.4	3.3	3.3	3.0	2.0	37.1	24.6	19.3	8.9	4.6	9.9	37.1			
a		FECHA	dd/aaaa	n/d	14/2017	2004 Feb 23	2003 Mar 18	2004 Abr 02	15/2015	09/2015	08/2011	21/2014	08/2013	2005 Oct 16	2007 Nov 12	2003 Dic 04	8-jul.-2011			
a	MINIMA	mm	20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
a		FECHA	aaaa	n/d	2002	2002	2002	2000	2000	2000	2000	2000	2001	2003	2001	2000	2000			
Unidades:																				
°C	Grados Centígrados	m m	Milímetros																	
h	Hora	Días	Días																	
Win ²	Watt / Metro cuadrado	aaaa	Año (4 dígitos)																	
hPa	Hectopascal	dd/aaaa	Día (2 dígitos) / Año (4 dígitos)																	
%	Porcentaje	n/d	Dato no disponible																	
Fuente:																				
a.				Promedios determinados apartir de lecturas obtenidas en la Estación Meteorológica Automatica Mexicali (período 2000-2019) ubicada al oriente de la ciudad de Mexicali (latitud 32°40'0" N, longitud 115°17'26" W, altitud 50 msnm) administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA).																
				"Datos calculados" en virtud de no contar con información de esta variable climática en alguna de las normales climatológicas de las estaciones analizadas.																

Unidades:

°C	Grados Centígrados	m m	Minímetros
h	Hora	Días	Días
W/m ²	Watt / Metro cuadrado	aaaa	Año (4 dígitos)
hPa	Hectopascal	dd/aaaa	Día (2 dígitos) / Año (4 dígitos)
%	Porcentaje	n/d	Dato no disponible

Fuente:

a. Promedios determinados apartir de lecturas obtenidas en la Estación Meteorológica Automatca Mexicali (período 2000-2019) ubicada al oriente de la ciudad de Mexicali (latitud 32°40'0" N, longitud 115°17'26" W, altitud 50 msnm) administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA).

b. "Datos calculados" en virtud de no contar con información de esta variable climática en alguna de las normales climatológicas de las estaciones analizadas.

2. ANÁLISIS PARAMÉTRICO

El análisis paramétrico consiste en analizar las variables climáticas presentadas en el lugar de estudio. Variables como la temperatura, humedad relativa, precipitación pluvial, presión atmosférica, radiación solar, viento, entre otras son analizadas. Para el presente análisis climático se utilizó la aplicación informática *Bioclimatic Analysis Tool* (BAT) desarrollada por Rincón y Fuentes (2014).

p. | 233

Para definir la Temperatura Neutra (**T_n**) o de Termopreferendum, se ha empleado la ecuación lineal desarrollada por Auliciems y Szokolay (2007), misma que es utilizada mundialmente para definir rangos de confortabilidad térmica. La ecuación que considera como variable independiente la temperatura media anual del caso de estudio es la siguiente:

$$T_n = 17.6 + 0.31 T_{med} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

T_n = Temperatura neutra.

T_{med} = Temperatura media (mensual).

Para definir la Zona de Confort (ZC) —rango de temperatura donde las personas pueden experimentar confortabilidad térmica sin sentir malestar—, se empleó el modelo de Auliciems y Szokolay (2007), mismo que consiste en ampliar el grado térmico de 2.0 °C a 2.5 °C sobre T_n, de tal forma que los límites superior e Inferior de la ZC se definen de la siguiente manera:

$$ZC_i = T_n - 2.5 K \quad (\text{Ec. 2})$$

$$ZC_s = T_n + 2.5 K \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

ZC_i = Límite inferior de la ZC.

ZC_s = Límite superior de la ZC.

2.1. TEMPERATURA

La temperatura media (T_{med}) anual de la ciudad de Mexicali, B.C. es de 25,0 °C, siendo julio el mes más cálido con una T_{med} de 35.2 °C, y diciembre el más frío con una T_{med} de 15.0 °C. Por lo tanto, según la ecuación lineal para definir la Temperatura Neutra (T_n) y el modelo para definir la Zona de Confort (ZC), ambos desarrollados por Auliciems y Szokolay (2007), la T_n anual es de 25.4 °C con un rango de aceptabilidad (ZC) entre los 22.9 °C y los 27.9 °C.

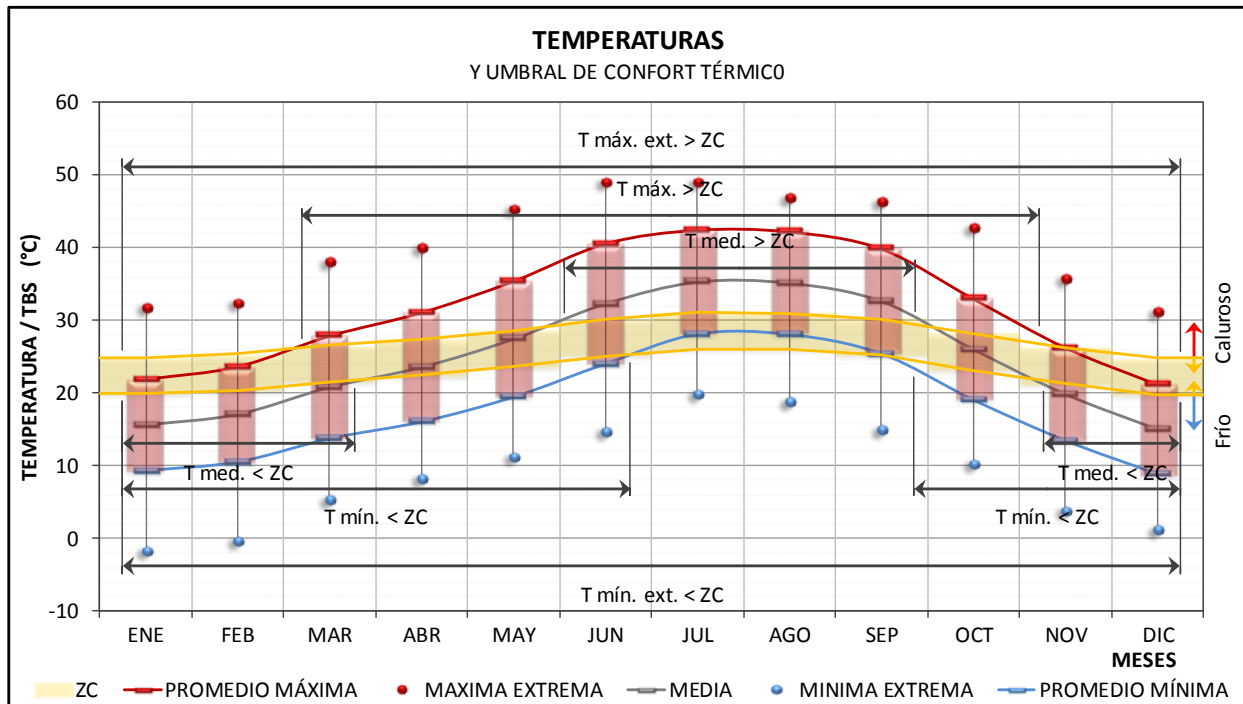
p. | 234

Como se puede observar en el gráfico de temperaturas (Figura B 2), las Temperaturas Máximas (T_{max}) que se encuentran dentro de la ZC, se presentan entre mediados de noviembre e inicios de marzo. El resto del año las T_{max} se ubican por encima de la ZC. Por otro lado, las Temperaturas Mínimas (T_{min}) dentro de la ZC se presentan únicamente entre finales de junio y mediados de septiembre, el resto del año por debajo de la ZC. Las Temperaturas Medias (T_{med}), únicamente se presentan dentro de la ZC los meses abril, mayo y octubre, el resto de los meses fuera de la ZC estando por encima de la misma los meses cercanos al solsticio de verano y por debajo los cercanos al solsticio de invierno. Asimismo, tanto las Temperaturas Máximas Extremas ($T_{max\ ext}$), como las Temperaturas Mínimas Extremas ($T_{min\ ext}$), que se presentaron una única vez en el periodo de estudio (2000-2019), se encuentran, $T_{max\ ext}$ por encima de la ZCs y $T_{min\ ext}$ por debajo de la ZCi, quedando todas fuera de la ZC. Con respecto a la oscilación de temperatura, tanto la anual como la diaria son extremas, siendo de 20.2 °C y 14.1 °C, respectivamente.

Al observar el gráfico de temperaturas horarias (Figura B 3) y de acuerdo con Fuentes, (2004), se puede apreciar que dentro de las normales de temperatura del periodo, todas las T_{min} se presentan alrededor de las 06 h 00, horario solar. Por otra parte, todas las T_{max} lo hicieron alrededor de las 15 h 00, horario solar.

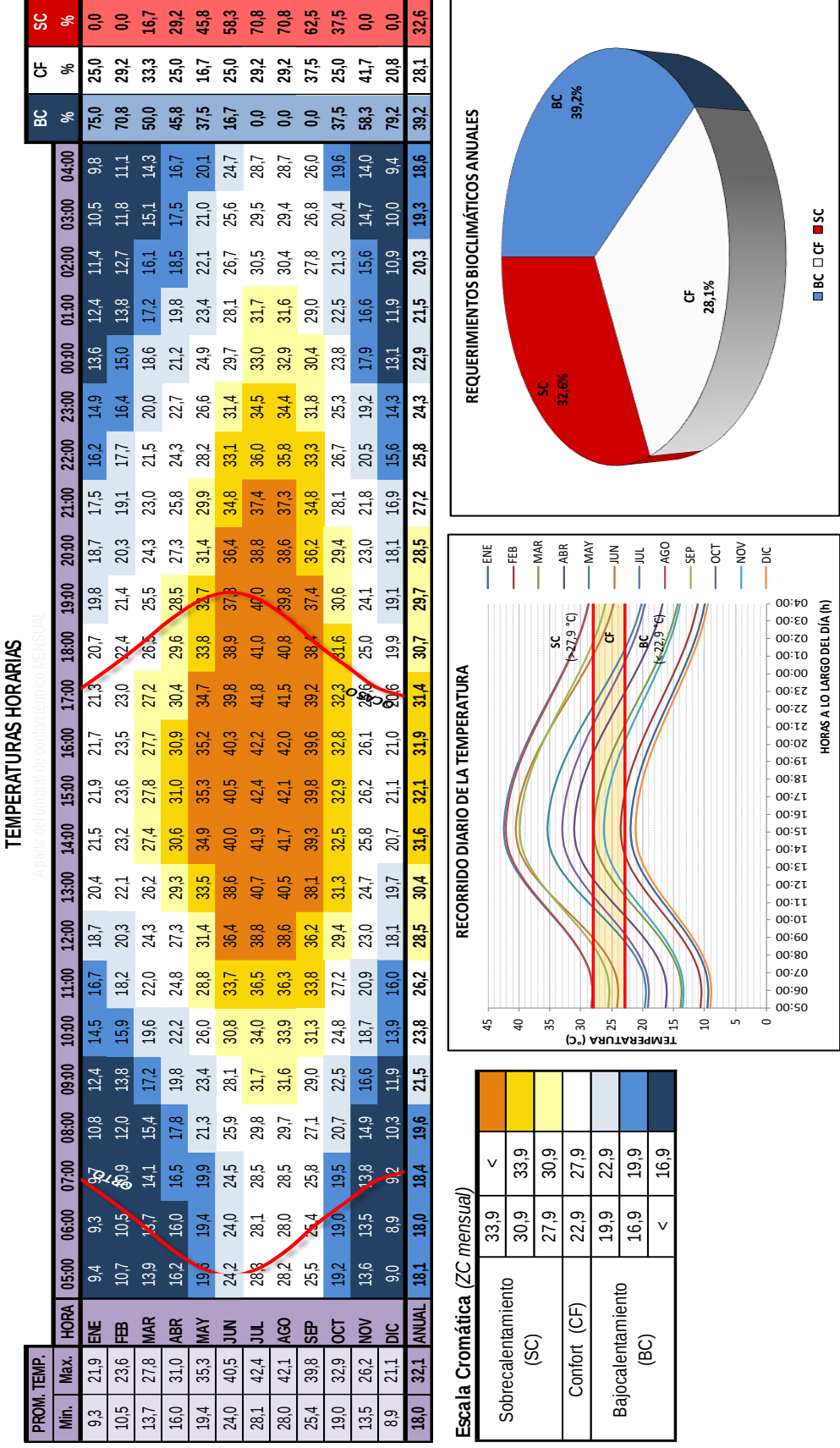
En general, se puede apreciar que la condición que mayor presencia tiene a lo largo del año es la de Bajo Calentamiento con 39.2%, seguido de la condición de Sobrecalentamiento con 32.6 % y por último y con menor presencia, la condición de Confort con 28.1% (Figura B 3- Requerimientos Bioclimáticos Anuales de temperatura).

Figura B 2. Comportamiento mensual de las temperaturas máximas, media y mínimas frente a la ZC del modelo de Auliciems y Szokolay —5.0 K— (Gráfica elaborada a partir de datos climáticos procesados).



Con la información presentada hasta el momento podemos concluir que el periodo frío, cálido y los de transición corresponden de la siguiente manera: diciembre-febrero corresponden al periodo frío, marzo-mayo corresponde al periodo de transición del frío al cálido, junio-septiembre corresponde al periodo cálido, y octubre-noviembre corresponden al periodo de transición del cálido al frío. Asimismo, se puede concluir que cerca de tres cuartas partes del año (71.8%) presentan requerimientos ya sea de enfriamiento o de calentamiento, y que únicamente poco más de una cuarta parte (28.1%) presentan condiciones ideales de confort térmico, misma que en general se presenta de manera constante por las madrugadas en los meses más cálidos (julio, agosto y septiembre), y por las tardes en los más fríos (noviembre, diciembre, enero y febrero). En el gráfico de temperaturas horarias (Figura B 3), se aprecia también que los meses y los horarios que presentan condiciones de enfriamiento crítico, se presentan entre los meses de junio-septiembre en un horario entre las 12 h 00 y las 20 h 00. Por otra parte, las condiciones de calentamiento crítico se presentan entre los meses de diciembre-febrero en un horario entre las 01 h 00 y las 09 h 00.

Figura B 3. Arriba. Representación horaria de la temperatura promedio mensual y anual presentada durante el transcurso del día, a partir del Modelo de Auliciems y Szokolay (1997) —5.0 K—. A la izquierda. Rangos de temperatura y simbología cromática que representan la intensidad térmica horaria durante un día mensual y anual. Al Centro. Recorrido horario de temperaturas mensuales. A la Derecha. Requerimientos anuales de enfriamiento o calentamiento para lograr la ZC (Gráficos elaborados a partir de datos climáticos procesados del sitio en estudio).



2.2. HUMEDAD RELATIVA

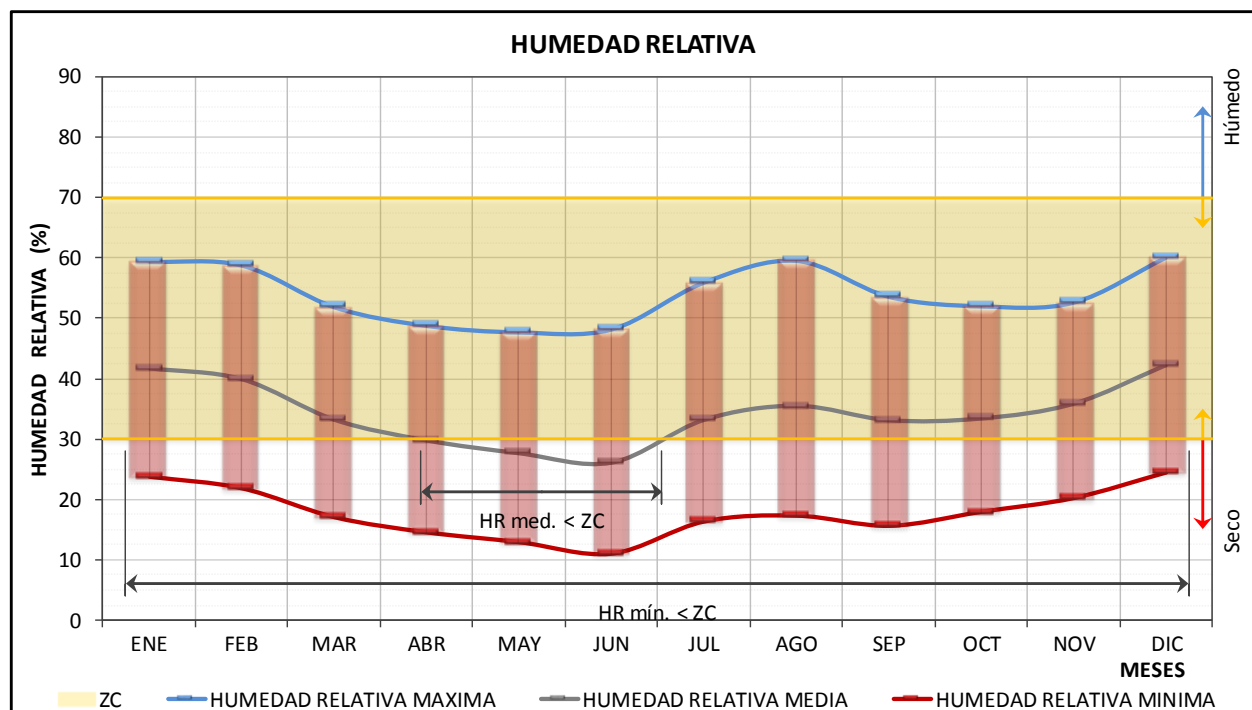
De acuerdo con algunas investigaciones (Marcó *et al.*, 2003; Sosa y Siem, 2004), y para fines de este análisis de Humedad Relativa (HR), dentro de un margen entre el 30.0% al 70.0%, el ser humano es poco sensible a los cambios de HR. Por lo tanto, el rango de confort hídrico que se ha determinado utilizar para el presente análisis climático oscila entre el 30.0 % y 70.0 %.

p. | 237

Conforme a las normales climatológicas de la EMA de Mexicali (ver Tabla B 1, p. 232), la Humedad Relativa Media (HR_{med}) anual de Mexicali es de 34.3 %, siendo junio el mes más seco con una HR_{med} de 26.2 %, y diciembre el más húmedo con una HR_{med} de 42.2 %.

Con base en el gráfico de la Figura B 4, con excepción del periodo comprendido entre mediados de abril a inicios de julio, la HR_{med} del resto del año al igual que todas las Humedades Relativas Máximas (HR_{max}) se encuentran dentro del rango de confort hídrico.

Figura B 4. Comportamiento mensual de las HR mínima, media y máxima, frente a la ZC permisible que acepta un rango del 30.0 % al 70.0 % (Gráfica elaborada a partir de datos climáticos procesados).



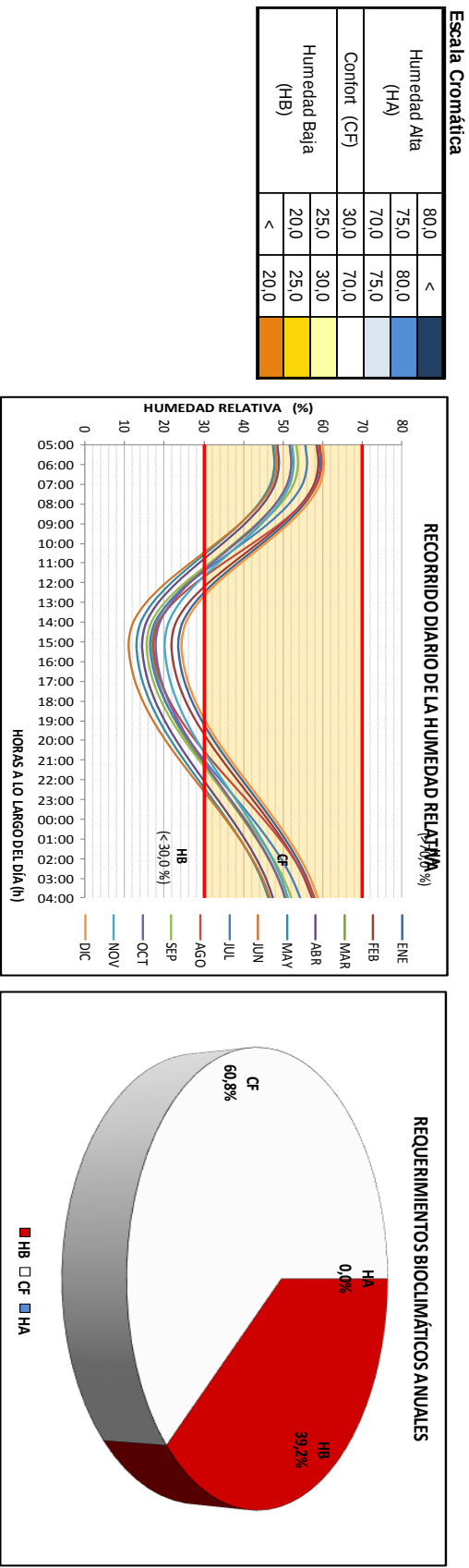
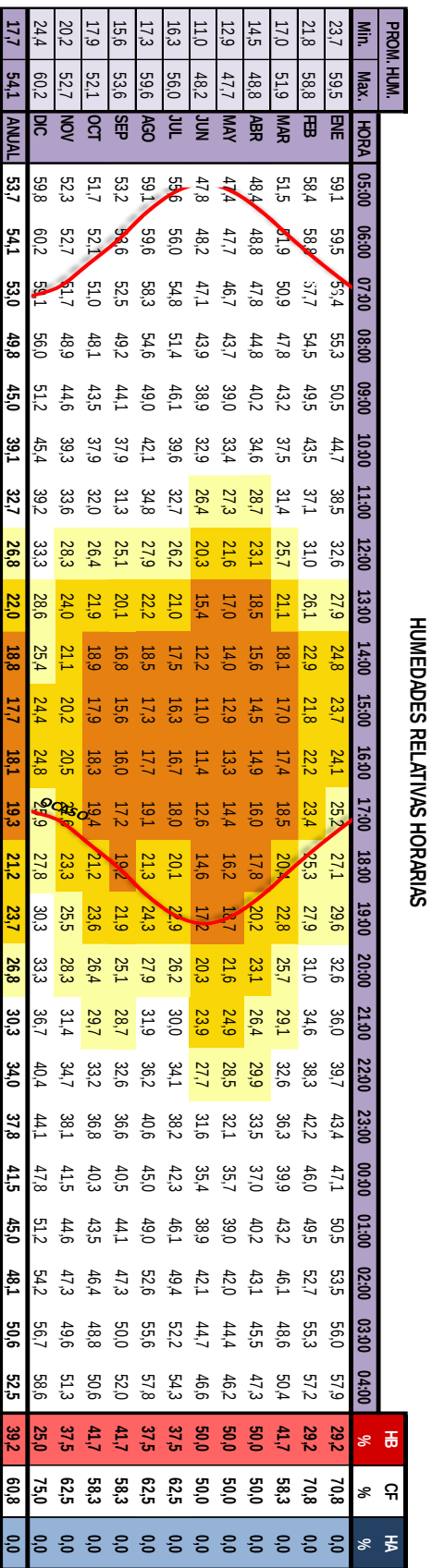
En contraste, todas las Humedades Relativas mínimas (HRmin), así como el periodo anteriormente mencionado (mediados de abril - inicios de julio) se encuentran por debajo de la Zona de Confort higríco.

De acuerdo con el gráfico de Requerimientos Bioclimáticos Anuales de humedad de la Figura B 5, poco más de la mitad del año (60.8%) la ciudad de Mexicali se encuentra dentro de un rango de confort higríco. No obstante, un 39.2% del año presenta requerimientos de humidificación, que como se puede observar en el gráfico de Humedades Relativas Horarias (Figura B 5), estos requerimientos de humidificación se presentan prácticamente de manera uniforme a lo largo de todo el año por la tarde en un horario entre las 13 h 00 y las 19 h 00, horario solar.

p. | 238

Asimismo, se puede apreciar que los meses más críticos en lo que a requerimientos de humidificación respecta, son los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre, con especial requerimiento de humidificación entre el lapso de tiempo comprendido entre las 14 h 00 y las 17 h 00 (horario solar) donde la HR promedio mensual se encuentra por debajo del 20.0%. Este periodo del año anteriormente mencionado (marzo-octubre), con excepción del mes de noviembre y con base en la información concluida en la sección de *Temperaturas* (p. 234), corresponde al periodo de transición del frío al cálido (marzo-mayo), al periodo cálido (junio-septiembre), y al periodo de transición del cálido al frío (octubre-noviembre).

Figura B 5. Arriba. Representación horaria del recorrido de la HR promedio mensual y anual presentada durante el día. A la izquierda. Rangos de humedad y simbología cromática que representan la intensidad de humedad horaria durante un día mensual y anual. Al centro. Comportamiento horario de humedades mensuales durante el día. A la Derecha. Requerimientos anuales para lograr la zona de confort (Gráficos elaborados a partir de datos climáticos procesados del sitio en estudio).

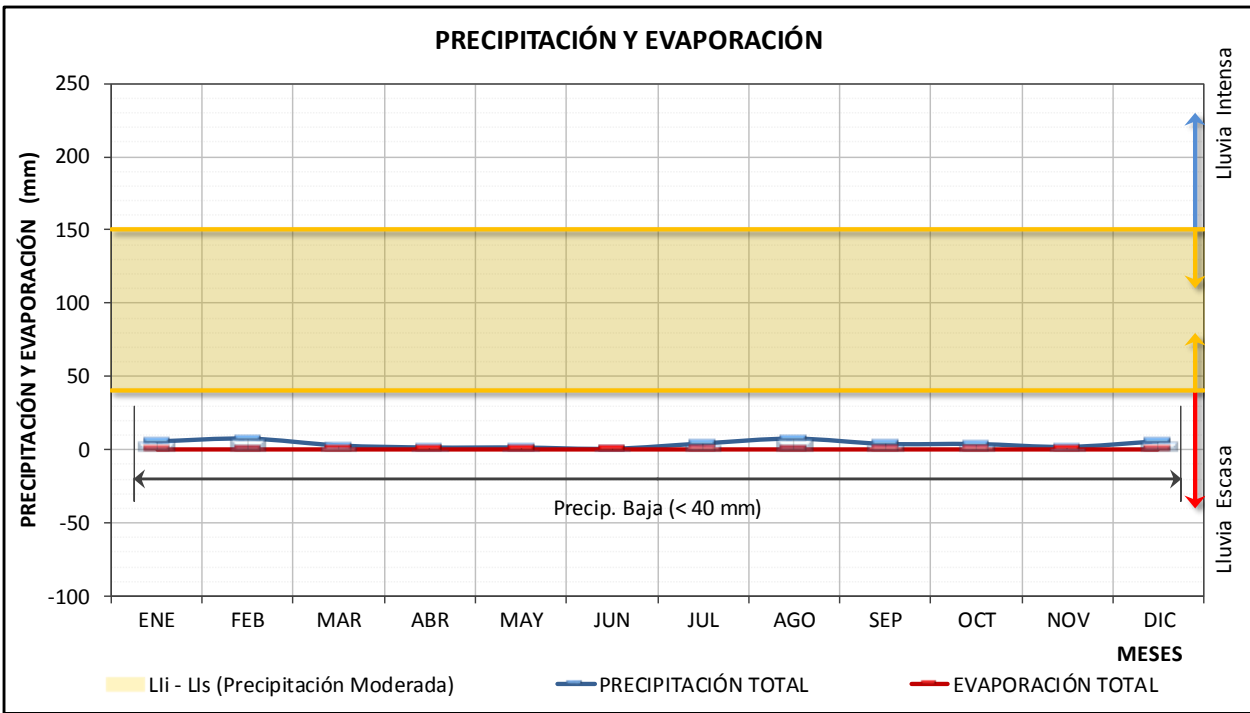


2.3. PRECIPITACIÓN

De acuerdo al rango de precipitación definido por Fuentes (2004), una precipitación moderada comprende un rango entre los 650 mm y los 1 000 mm. Por debajo de este rango se considera el caso de estudio como: seco, y por encima: húmedo. Con lo anterior y de acuerdo con las normales climatológicas de la EMA de Mexicali (ver Tabla B 1, *pág.* 232), la precipitación es: baja, al presentar una anual de 43.5 mm.

En general, la precipitación en la ciudad de Mexicali en el transcurso del año es extremadamente baja, siendo febrero y agosto los meses con mayor presencia de lluvias con apenas 7.4 mm., y siendo junio el mes más seco con 0.2 mm. Asimismo y como se puede apreciar en la Figura B 6, todos los meses se encuentran debajo del Límite Indicativo Inferior (Lli) mismo que permite identificar una precipitación moderada de una precipitación escasa.

Figura B 6. Comportamiento mensual de la precipitación respecto a la evaporación durante el año (Gráfico elaborado a partir de datos climáticos procesados del sitio en estudio).



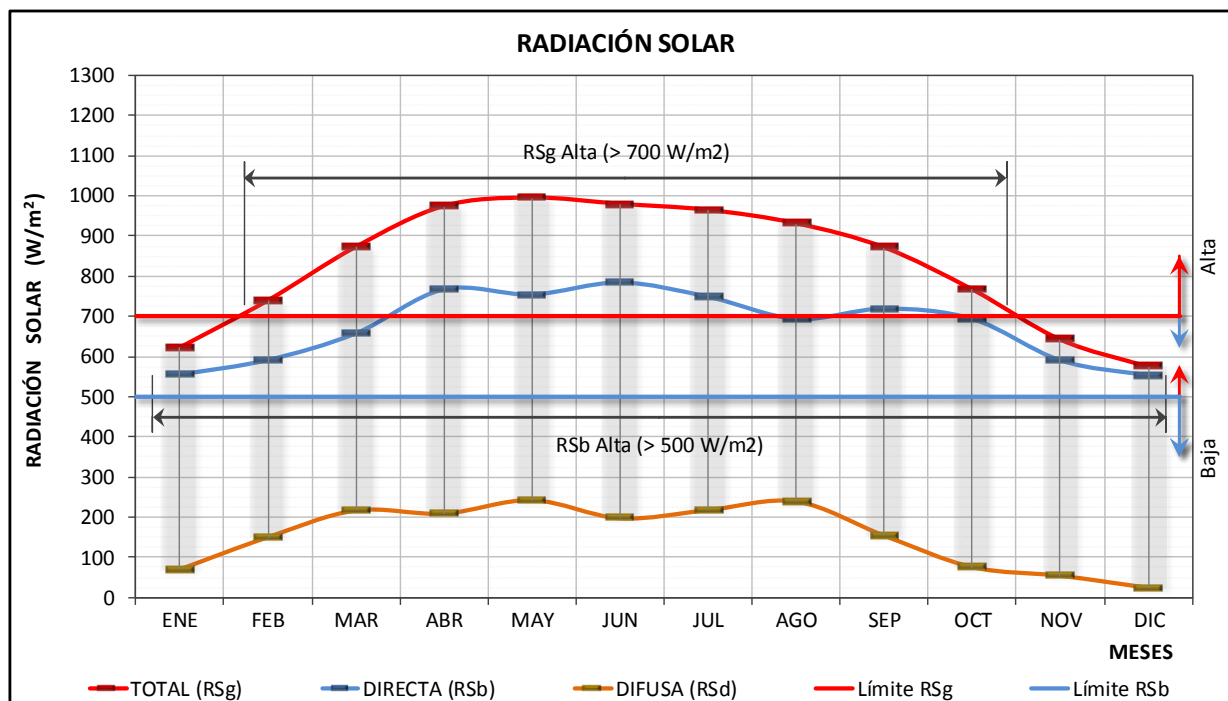
2.4. RADIACIÓN

La Radiación Solar Total (RSg) anual de la ciudad de Mexicali es de 827.6 W/m². De acuerdo al gráfico de comportamiento mensual de radiación en la ciudad de Mexicali (ver Figura B 7), la Radiación Solar Total (RSg) máxima promedio en Mexicali es alta durante prácticamente todo el periodo del año, pues se ubica por encima del Límite Indicativo para considerar intensidad de la RSg (Límite RSg), misma que se pondera en los 700.0 W/m². Únicamente el periodo que comprende de finales de octubre a inicios de febrero se encuentra por debajo del Límite RSg. Mayo destaca con la RSg máxima promedio más alta con 994.6 W/m², y en contraste, diciembre con la RSg más baja con 574.8 W/m².

p. | 241

Como se puede observar en la Figura B 7, la radiación solar es más alta en los meses cálidos —cuando el sol está más próximo a la tierra—, y es más baja en los meses fríos —cuando el sol está más alejado de la misma—.

Figura B 7. Comportamiento mensual de las RSg, RSb y RSd máximas promedio respecto a los niveles aceptables de Radiación Solar —para aprovechamiento de energía renovable— (Gráfico elaborado a partir de datos climáticos procesados del sitio en estudio).



2.5. VIENTO

La Tabla B 2 muestra información detallada con respecto a la velocidad y frecuencia del viento en la ciudad de Mexicali a lo largo del periodo de estudio, mismo que comprende del año 2000 a 2019. El comportamiento del viento se muestra de manera mensual, anual y por dirección de origen.

p. | 242

De igual manera, se muestra el porcentaje que se considera como ausencia de viento (calmas). Asimismo, se muestra el promedio y máxima por mes. En la parte inferior de la tabla se puede apreciar una síntesis mensual y anual de la presencia dominante del viento por frecuencia y velocidad, así como la dirección de origen de donde provienen los vientos más fuertes (viento reinante).

Tabla B 2. Desglose detallado del comportamiento de viento a lo largo del año a partir de su dirección, intensidad y periodo. Promedios mensual y anual del viento dominante y reinante durante el periodo observado, 2000-2019 (Tabla elaborada a partir de datos climáticos procesados del sitio en estudio).

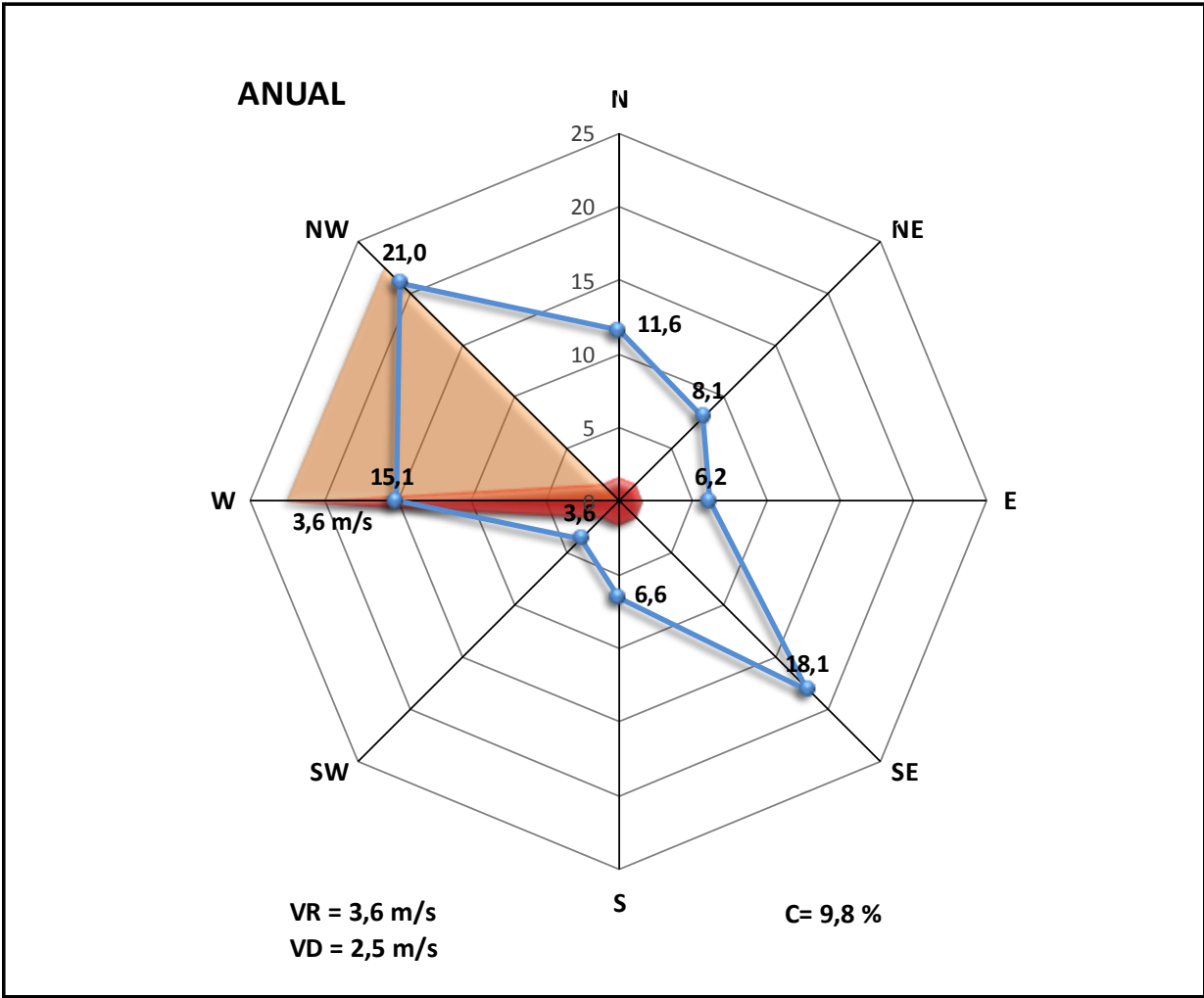
MESES	PARÁMETRO	UNIDAD	DIRECCIONES								CALMAS (%)	PROMED.	MÁXIMA
			N	NE	E	SE	S	SW	W	NW			
ENERO	Frecuencia	%	15,5	7,5	4,3	8,4	5,0	5,1	20,6	25,9	7,8	11,5	25,9
	Velocidad	m/s	2,6	1,8	1,6	2,1	1,8	1,7	2,7	2,7		2,2	2,7
FEBRERO	Frecuencia	%	13,3	8,5	5,0	10,3	5,8	4,8	19,8	22,9	9,4	11,3	22,9
	Velocidad	m/s	2,6	2,0	1,7	2,2	1,7	1,8	3,5	3,2		2,3	3,5
MARZO	Frecuencia	%	13,5	6,5	3,9	9,5	5,5	3,5	19,9	26,2	11,4	11,1	26,2
	Velocidad	m/s	2,8	2,2	2,0	2,2	1,8	1,8	4,1	3,7		2,6	4,1
ABRIL	Frecuencia	%	11,9	6,6	4,4	12,6	5,5	3,2	20,4	26,2	9,2	11,3	26,2
	Velocidad	m/s	3,0	2,3	2,2	2,6	2,1	2,2	4,8	4,4		3,0	4,8
MAYO	Frecuencia	%	10,2	8,0	6,0	18,7	6,5	2,9	15,5	23,1	9,0	11,4	23,1
	Velocidad	m/s	2,7	2,4	2,2	2,8	2,2	1,8	4,5	4,6		2,9	4,6
JUNIO	Frecuencia	%	7,4	8,3	8,4	30,9	8,1	2,3	9,7	15,6	9,3	11,3	30,9
	Velocidad	m/s	2,3	2,3	2,3	3,1	2,5	1,8	4,3	4,3		2,8	4,3
JULIO	Frecuencia	%	5,7	8,5	9,3	41,6	9,4	2,1	6,0	8,7	8,7	11,4	41,6
	Velocidad	m/s	2,2	2,3	2,4	3,4	2,6	2,0	3,5	3,5		2,7	3,5
AGOSTO	Frecuencia	%	6,6	8,7	10,4	36,9	9,6	2,6	4,9	8,8	11,6	11,0	36,9
	Velocidad	m/s	2,0	2,1	2,4	3,2	2,5	2,0	3,0	3,0		2,5	3,2
SEPTIEMBRE	Frecuencia	%	10,6	8,9	8,9	23,4	8,1	3,2	8,9	17,6	10,4	11,2	23,4
	Velocidad	m/s	2,3	2,1	2,2	2,9	2,3	1,9	3,1	3,3		2,5	3,3
OCTUBRE	Frecuencia	%	14,7	9,9	5,3	10,0	5,1	3,5	16,2	25,7	9,7	11,3	25,7
	Velocidad	m/s	2,6	2,0	1,8	2,3	1,9	1,7	3,3	3,4		2,4	3,4
NOVIEMBRE	Frecuencia	%	15,7	8,4	3,8	6,6	4,6	4,8	20,2	26,2	9,9	11,3	26,2
	Velocidad	m/s	2,3	1,9	1,5	1,8	1,6	1,7	2,9	3,0		2,1	3,0
DICIEMBRE	Frecuencia	%	14,1	7,2	4,3	8,1	5,6	5,3	19,6	25,0	10,8	11,1	25,0
	Velocidad	m/s	2,6	1,8	1,5	1,9	1,6	1,7	3,0	2,7		2,1	3,0
ANUAL	Frecuencia	%	11,6	8,1	6,2	18,1	6,6	3,6	15,1	21,0	9,8	11,3	21,0
	Velocidad	m/s	2,5	2,1	2,0	2,5	2,1	1,8	3,6	3,5		2,5	3,6

VIENTO	UNIDAD	MESES												ANUAL
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
DOMINANTE		NW	NW	NW	NW	NW	SE	SE	SE	SE	NW	NW	NW	NW
		NW	W	W	W	NW	W	W	SE	NW	NW	NW	W	W
MÁXIMA	m/s	2,7	3,5	4,1	4,8	4,6	4,3	3,5	3,2	3,3	3,4	3,0	3,0	3,6
PROMED.	m/s	2,2	2,3	2,6	3,0	2,9	2,8	2,7	2,5	2,5	2,4	2,1	2,1	2,5
CALMAS	(%)	7,8	9,4	11,4	9,2	9,0	9,3	8,7	11,6	10,4	9,7	9,9	10,8	9,8

El siguiente grafico Figura B 8, muestra de manera esquemática —a través de una rosa de los vientos— la procedencia anual de los viendo predominantes de Mexicali.

La rosa anual de vientos dominantes y reinantes de la capital baja californiana, muestra que el viento a lo largo del año proviene principalmente del rango Oeste-Noroeste (W-NW), con una frecuencia de 21.0% para el Noroeste (NW) y 15.1% para el Oeste (W), lo que representa poco más de una tercera parte de la frecuencia anual (36.1%). No obstante, destaca la presencia de viento procedente del Sureste (SE) con una frecuencia anual de 18.1%, misma que representa la segunda frecuencia más alta y que es a la vez opuesta a la frecuencia dominante: la del Noroeste (21.0%).

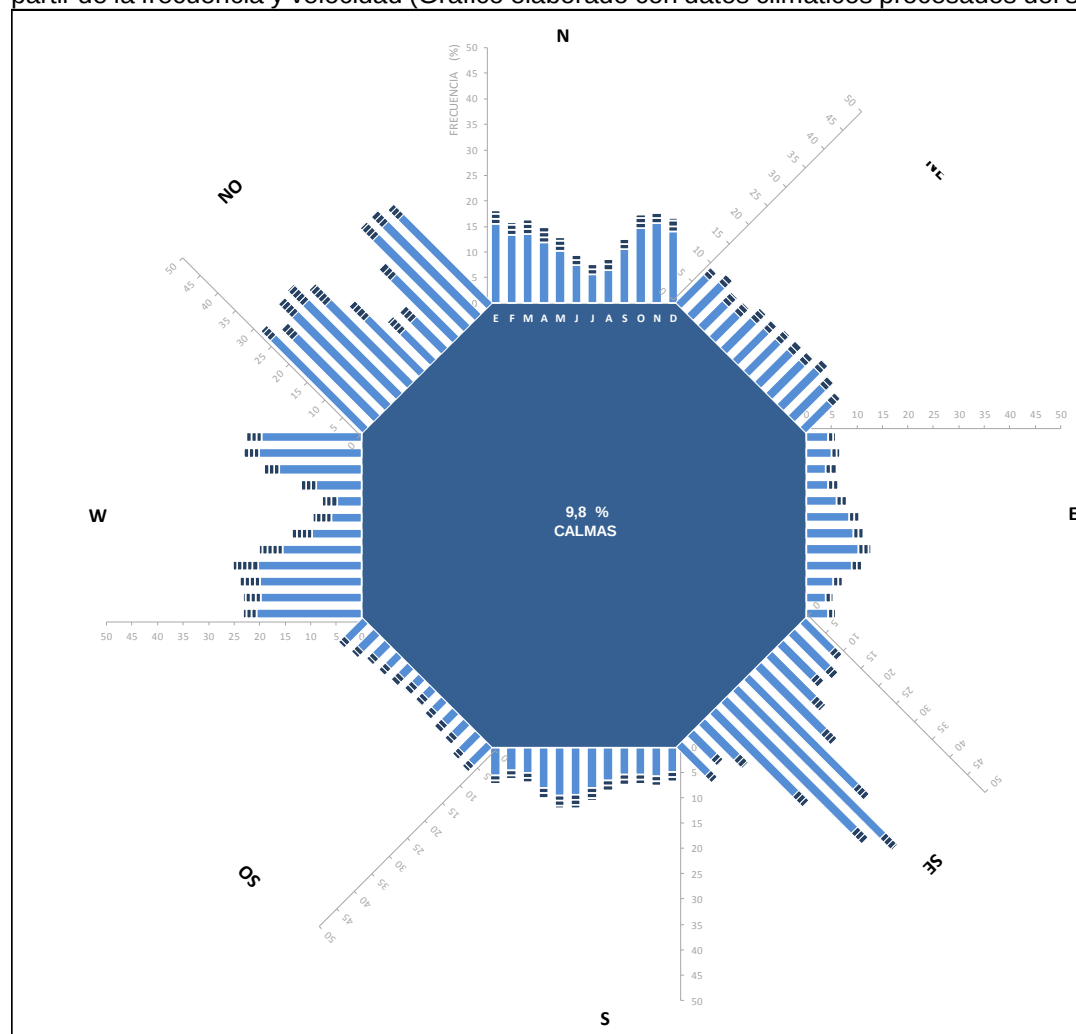
Figura B 8. Rosa anual de vientos dominantes y reinantes. Procedencia del viento a partir de promedios anuales por dirección (Gráfico elaborado a partir de datos climáticos procesados del sitio en estudio).



La rosa anual de los vientos también muestra el origen de los vientos reinantes, mismos que proceden del Oeste (W) con una velocidad promedio anual de 3.6 m/s y que coincidentemente provienen de una de las orientaciones dominantes de los vientos: Oeste-Noroeste (W-NW).

La rosa de los vientos octogonal (Figura B 9), muestra la frecuencia y velocidad mensual del viento por orientación de origen. Se puede apreciar que, de manera general, la frecuencia de los vientos dominantes tiene su mayor presencia en el periodo frío y los periodos de transición —periodo de transición del frío al cálido, y del cálido al frío—. En su contraparte, se puede ver que los vientos procedentes de la orientación Sureste (SE), son aquellos que se dan con mayor frecuencia en el periodo cálido.

Figura B 9. Rosa de los Vientos Octogonal. Comportamiento mensual del viento presentado por rumbo a partir de la frecuencia y velocidad (Gráfico elaborado con datos climáticos procesados del sitio en estudio).



3. ANÁLISIS BIOCLIMÁTICO

Conforme al análisis climático de la ciudad de Mexicali presentado hasta el momento, se ha realizado el análisis bioclimático con el fin de —con forme a las condiciones climáticas del sitio de estudio— presentar las estrategias bioclimáticas para poder lograr un confort térmico a lo largo de año. Para el presente análisis se utilizarán las siguientes herramientas bioclimáticas: diagrama bioclimático, tablas de Mahoney, triángulos de confort y el diagrama psicométrico.

p. | 245

3.1. TRIÁNGULOS DE CONFORT

Los triángulos de confort de John Martin Evans (2000) es una herramienta que relaciona la temperatura media de cada mes del año con la oscilación térmica. Debido a que considera la variación de temperatura durante el día (oscilación), permite considerar la inercia térmica de los materiales (amortiguamiento y retraso térmico).

De acuerdo con esta herramienta bioclimática y como se puede apreciar en la Figura B 10, la ciudad de Mexicali presenta condiciones térmicas de confort para circulación interior los meses de febrero, marzo y noviembre. Asimismo, presenta condiciones térmicas de confort para circulación exterior los meses de diciembre y enero. El resto de los meses se encuentran fuera de cualquier zona de confort.

Para poder resolver los requerimientos de confort térmico y con base a la Figura B 11, los meses de marzo, abril, octubre y noviembre se puede resolver con inercia térmica de los materiales. De igual manera, octubre y el mes de mayo se puede resolver mediante ventilación selectiva. Los meses de diciembre, enero y febrero requieren de la suma de las estrategias tanto de inercia térmica como del aprovechamiento de la radiación solar. En contraste, los meses de junio, julio, agosto y septiembre —mismos que formar parte del periodo cálido (ver 2.1. TEMPERATURA, p. 234)— no pueden ser resueltos con ninguna de las estrategias bioclimáticas propuestas por los triángulos de confort, por lo que será necesario recurrir a otro tipo de estrategias.

Figura B 10. Triángulos de Confort (de John Martin Evans) muestran cuatro ZC (Evans, 2000) y las actividades mensuales que se pueden desarrollar según las condiciones térmicas con que se cuenten (Gráfica elaborada a partir de datos climáticos procesados del sitio en estudio).

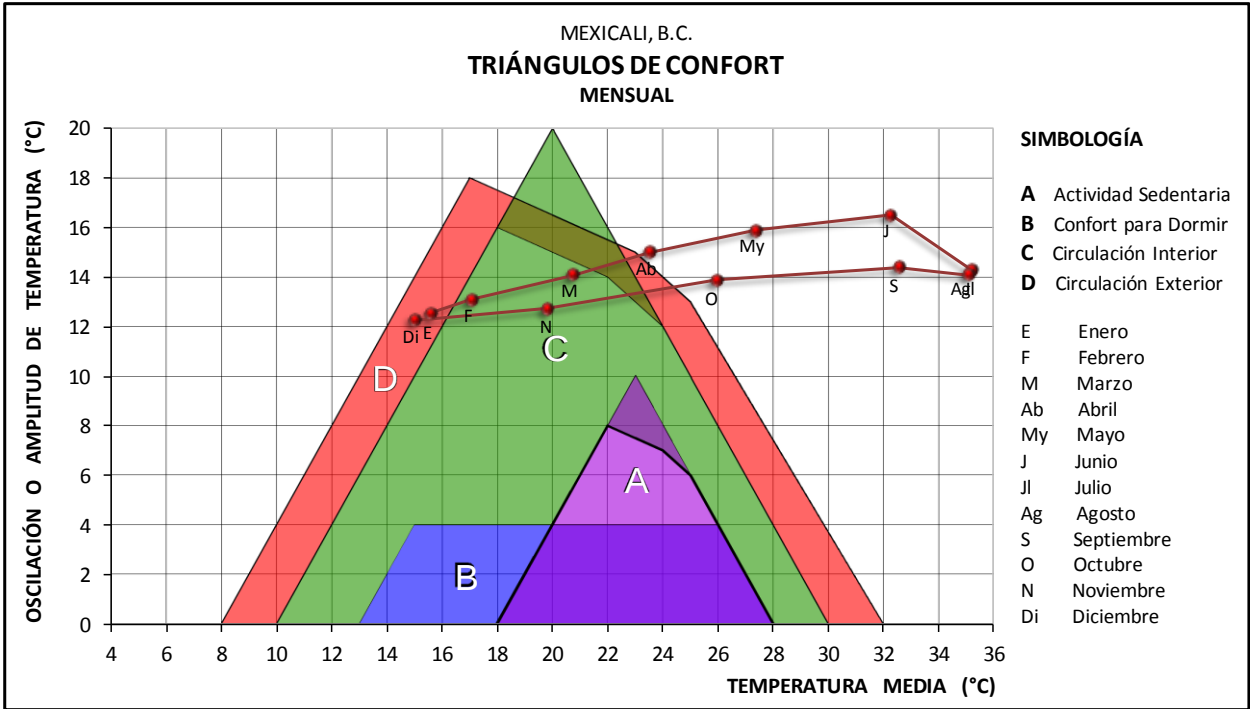
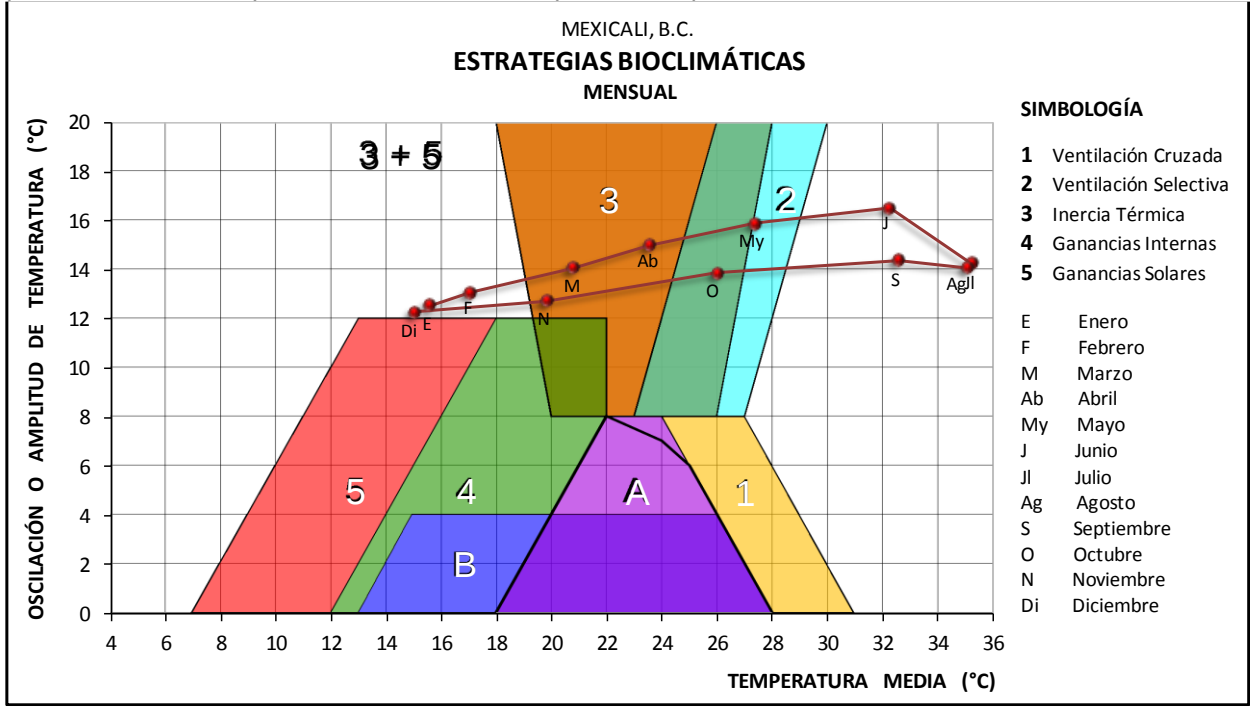


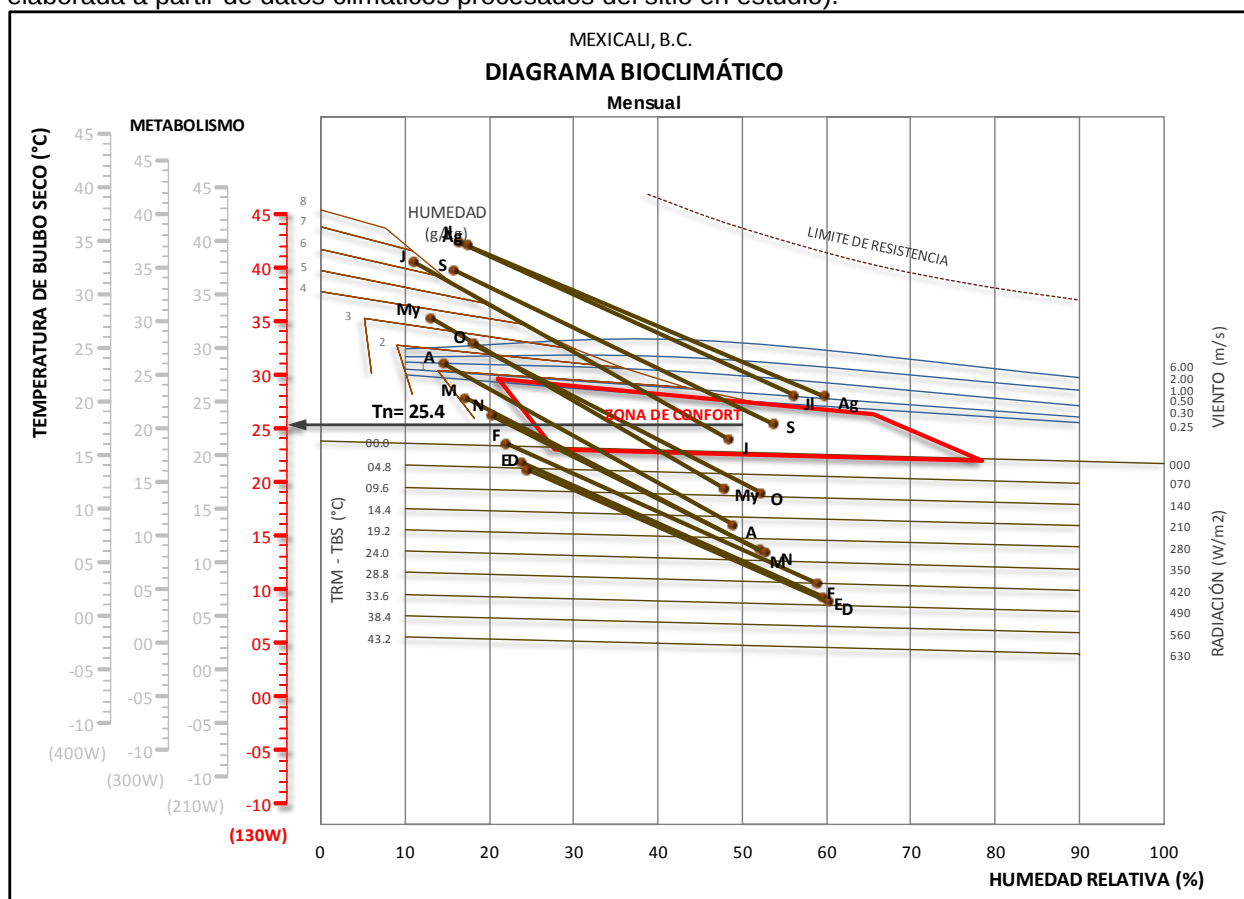
Figura B 11. Triángulos de Confort de John Martin Evans (2000). Recomendaciones bioclimáticas pasivas resultantes de graficar conjuntamente la temperatura media y la oscilación térmica, ambas mensuales (Gráfica elaborada a partir de datos climáticos procesados).



p. | 247

Como se puede observar en la Figura B 12, en el centro y con forma de trapecioide delineado de color rojo, se encuentra la zona de confort. Fuera de esta zona, el confort higrotérmico se deberá lograr mediante el aprovechamiento ya sea de la radiación solar cuando la temperatura se encuentre por debajo de la zona de confort, o del aprovechamiento de las corrientes de aire y de la humedad en el ambiente cuando la temperatura se encuentre por encima de la zona de confort.

Figura B 12. Diagrama Bioclimático para la ciudad de Mexicali. Este diagrama originalmente fue desarrollado por los hermanos Olgyay y posteriormente fue adaptado por el Dr. Steven Szokolay (Gráfica elaborada a partir de datos climáticos procesados del sitio en estudio).



3.3. TABLAS DE MAHONEY

Las tablas de Mahoney es una herramienta bioclimática que recomienda estrategias bioclimáticas de acuerdo a la integración de variables climáticas del sitio como la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa y la precipitación pluvial. Para el caso de la ciudad de Mexicali, y de acuerdo con los rangos de confort propuestos por las tablas de Mahoney (Figura B 13), las estrategias son las siguientes:

p. | 248

- **Distribución:** Concepto de patio compacto.
- **Espaciamiento:** Se propone una configuración compacta en el interior de los espacios con el fin de evitar infiltraciones y promover un control sobre la estratificación térmica.
- **Ventilación:** Debido a las altas temperaturas en el periodo cálido, así como a las bajas temperaturas del periodo frío, se propone la ausencia de ventilación para ambos periodos.
- **Tamaño de las aberturas:** Con relación al primero y al último de los puntos anteriores, el tamaño de los vanos no deberá exceder el rango comprendido entre el 10% y el 20% de la superficie de las fachadas (aberturas pequeñas).
- **Protección de las aberturas:** Sombreado total y permanente durante el periodo cálido, especialmente a aberturas orientadas al sur y con especial atención en el periodo cálido.
- **Muros y pisos:** Deberán ser masivos (con un retardo térmico superior a las ocho horas) con el objeto de almacenar el calor durante el día y aprovecharlo durante las noches y madrugadas.
- **Techumbres:** Al igual que la recomendación anterior, las cubiertas deberán contar con una masividad que garantice el retardo térmico de, al menos, ocho horas al día.
- **Espacios nocturnos exteriores:** De acuerdo a las condiciones climáticas de la ciudad, el uso de espacios exteriores de uso nocturno es viable.

Figura B 13. Recomendaciones bioclimáticas sugeridas por los indicadores y las tablas de Mahoney (Tabla elaborada a partir de datos climáticos procesados del sitio en estudio).

MEXICALI, B.C.							TABLAS DE MAHONEY	
INDICADORES	1	2	3	4	5	6	No.	RECOMENDACIONES
NÚM. INDICADORES	0	0	0	12	6	1		
DISTRIBUCIÓN							X	1
								2
ESPACIAMIENTO							X	3
								4
VENTILACIÓN							X	5
								6
TAMAÑO DE ABERTURAS							X	7
								8
POSICIÓN DE ABERTURAS							X	9
								10
PROTECCIÓN DE ABERTURAS							X	11
								12
MUROS Y PISOS							X	13
								14
TECHUMBRE							X	15
								16
ESPACIOS NOCTURNOS EXT.							X	17
								18

NOTA: Para cada aspecto se da una sólo recomendación o ninguna, excepto en "Protección de las aberturas" y "Espacios nocturnos exteriores", donde varias recomendaciones son posibles.

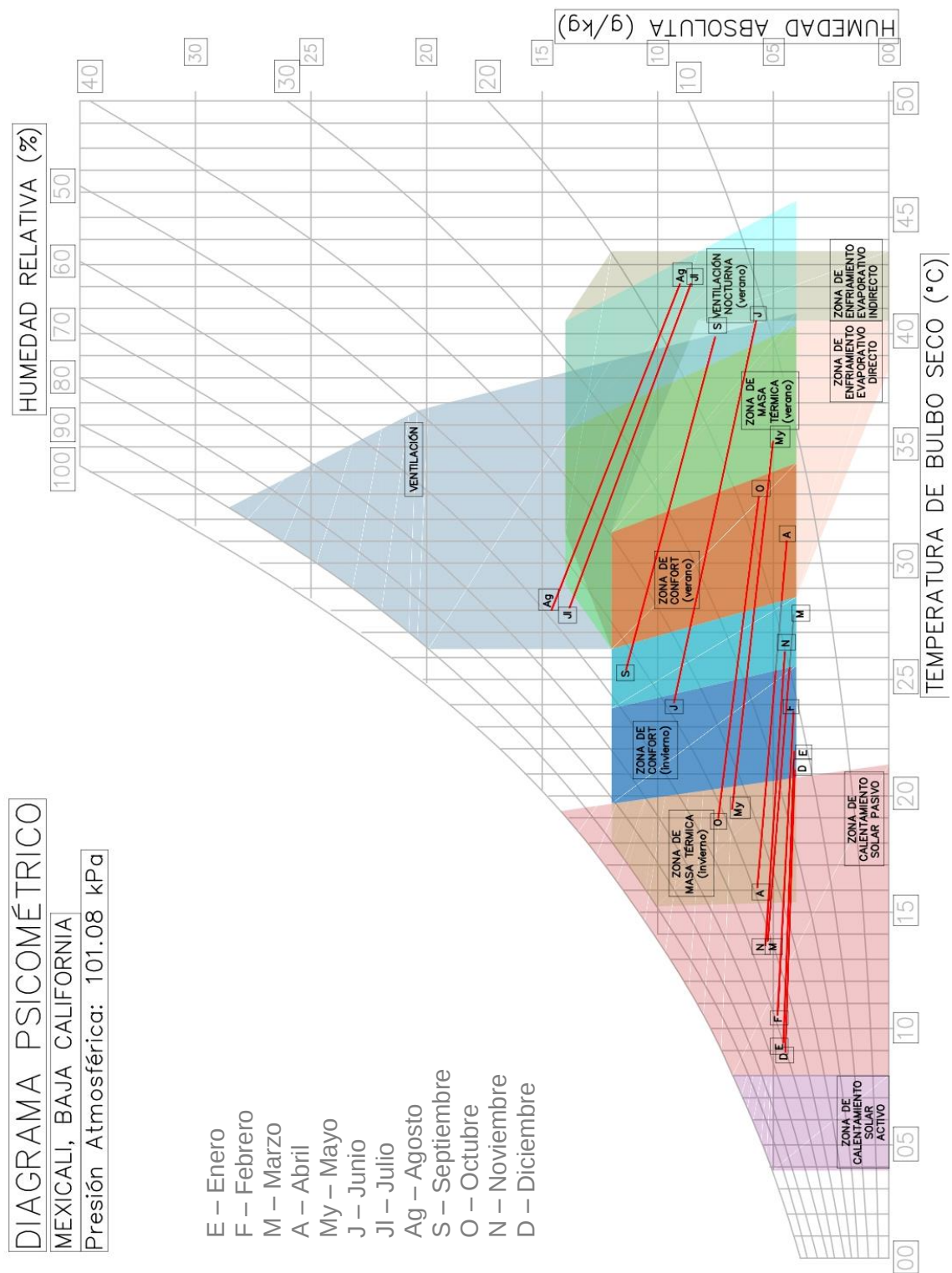
3.4. DIAGRAMA PSICOMÉTRICO

Esta herramienta bioclimática desarrollada por Baruch Givoni muestra variables como la humedad relativa, humedad absoluta, temperatura de bulbo seco, entre otras. El diagrama psicométrico muestra el comportamiento de las variables anteriormente mencionados a lo largo del día por mes. Lo anterior tomando en cuenta la temperatura máxima —que se presenta por la mañana y que coincide con la humedad relativa mínima—, y asimismo tomando en cuenta la temperatura mínima —que se presenta por la tarde y que coincide con la humedad relativa máxima—.

p. | 250

De acuerdo con este diagrama y con forme a las variables climáticas de la ciudad de Mexicali, B. C. (Figura B 14), prácticamente todos los meses del año se encuentran en algún punto de día fuera de la zona de confort. Según el diagrama, las mañanas de los meses de octubre a mayo podrían entrar en confort térmico utilizando la estrategia del aprovechamiento de energía radiante proporcionada por el sol; no obstante, los meses de abril, mayo y octubre podrían equilibrar ese confort por la mañana únicamente con la implementación de materiales de masa térmica eficiente. En contraste, las tardes de los meses de octubre a abril se encuentran dentro de la zona de confort térmico. Es destacable como los meses de octubre y mayo —meses que forman parte de los periodos de transición del periodo cálido al frío y del frío al cálido, respectivamente— son los dos meses que prácticamente se encuentran en su mayor parte del día dentro de una zona de confort y que para lograr un confort térmico en todo el día, este se podría lograr con la masa térmica de los materiales de la envolvente arquitectónica. Junio y septiembre solo se encuentran en una zona de confort por la mañana y la madrugada, el resto del día requieren la implementación de estrategias como la ventilación, el enfriamiento evaporativo directo e indirecto, y la masa térmica de materiales. Por otra parte, los meses de julio y agosto —los dos meses más cálidos del año— se encuentra todo el día fuera de la zona de confort, por lo que requieren de la implementación de la combinación de todas las estrategias anteriormente mencionadas, así como también la ventilación nocturna.

Figura B 14. Diagrama Psicrométrico de Baruch Givoni. Permite graficar la temperatura de bulbo seco —máxima y mínima— contra la humedad relativa —mínima y máxima, respectivamente—, arrojando estrategias bioclimáticas por mes con el objeto conseguir una ZC durante el transcurso del día (Gráfica elaborada a partir de datos climáticos procesados del sitio en estudio).



4. BIBLIOGRAFÍA

Auliciems, A., & Szokolay, S. (2007). Thermal comfort. In *PLEA : Passive and Low Energy Architecture International* (second).

p. | 252

Evans, J. (2000). Técnicas Bioclimáticas de Diseño: Las Tablas de Confort y los Triángulos de Confort. *Conferencia Internacional Confort y Comportamiento Térmico de Edificaciones, Maracaibo*. Maracaibo.

Fuentes, V. (2004). *Clima y Arquitectura* (M. Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Unidad Azcapotzalco, ed.).

Fuentes, V., & Figueroa, A. (1990). *Criterios de Adecuación Bioclimática en la Arquitectura* (Instituto & Mexicano del Seguro Social, eds.). Instituto Mexicano del Seguro Social.

García, E. (2014). *Modificaciones al sistema de clasificación köppen* (pp. 1–90). pp. 1–90.
Retrieved from
http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf

Marcó Gratacós, J., Martí Costa, S., Martín Zorraquino, J. V., Pastor Pérez, P., & Rodríguez Tarodo, J. A. (2003). *Guía Técnica para la Prevención y Control de la Legionelosis en Instalaciones* (E. Subdirección General de Sanidad Ambiental y Salud, Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, Ed.).

Rincón, J., & Fuentes, V. (2014). *Bioclimatic Analysis Tool (BAT)*. Ciudad de México, México.

Sosa, M. E., & Siem, G. (2004). Manual de diseño para edificaciones energéticamente eficientes en el trópico. In *Idec*. Retrieved from
http://www.fau.ucv.ve/idec/racionalidad/pdf/manual_energia.pdf