

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO



## ALTO ALBEDO Y VEGETACIÓN COMO ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DE LA ISLA DE CALOR EN SUPERFICIES URBANAS DE UN CLIMA MEDITERRÁNEO

**T E S I S**

que para obtener el grado de

**DOCTORA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO**

Presenta

**MARÍA FERNANDA ARRIAGA OSUNA**

Directora de tesis

**DRA. KAREN ESTRELLA MARTÍNEZ TORRES**

Co-Director de tesis

**DR. CARLOS JAVIER ESPARZA LÓPEZ**

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA. NOVIEMBRE DE 2025

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO



## DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

Alto albedo y vegetación como estrategias de mitigación de la isla de calor en superficies urbanas de un clima mediterráneo

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

PRESENTA

**MARÍA FERNANDA ARRIAGA OSUNA**

Correo electrónico: fernanda.arriaga@uabc.edu.mx  
Identificador ORCID: 0000-0002-2630-8332

Director de tesis: Dra. Karen Estrella Martínez Torres  
Identificador ORCID: 0000-0002-6744-8622

Co-Director de tesis: Dr. Carlos Javier Esparza López  
Identificador ORCID: 0000-0003-0058-5072

Revisor de tesis: Dr. Marcos Eduardo González Trevizo

Revisor de tesis: Dr. Julio César Rincón Martínez

Revisor de tesis: Dra. Claudia Rivera Torres

Revisor de tesis: Dr. Jesús Abelardo Licón Portillo

**Ensenada, B.C. Noviembre de 2025**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO**

DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

**ALTO ALBEDO Y VEGETACIÓN COMO ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DE LA ISLA DE CALOR EN SUPERFICIES URBANAS DE UN CLIMA MEDITERRÁNEO**

**TESIS**

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

**María Fernanda Arriaga Osuna**

Aprobada por:

---

**Dra. Karen Estrella Martínez Torres**  
Directora de tesis

---

**Dr. Marcos Eduardo González Trevizo**  
Síndico

---

**Dr. Julio César Rincón Martínez**  
Síndico

---

**Dra. Claudia Rivera Torres**  
Síndico

---

**Dr. Jesús Abelardo Licón Portillo**  
Síndico

Ensenada, Baja California, México. 28 de octubre de 2025

## DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Declaro que esta tesis contiene material original que no ha sido presentado para la obtención de un grado académico o diploma en esta u otra institución y que, hasta donde tengo conocimiento, no incluye material previamente publicado o escrito por otra persona, salvo donde se reconoce como tal a través de las citas.

Ensenada, B.C., 28 de octubre de 2025



---

**María Fernanda Arriaga Osuna**

## **AVAL DE TERMINACIÓN DE TESIS**

Fecha: 28 de octubre de 2025

DR. JULIÁN ISRAEL AGUILAR DUQUE  
Director de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
Presente.-

Para dar cumplimiento al artículo 106 del ESTATUTO ESCOLAR DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, en su TÍTULO CUARTO DE LOS TÍTULOS PROFESIONALES, GRADOS ACADÉMICOS Y DIPLOMAS, CAPÍTULO ÚNICO, sobre los requisitos para la obtención del grado de **Doctorado 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 el presente documento que avala que la estudiante:

**María Fernanda Arriaga Osuna**

ha concluido su tesis de grado titulada:

### **ALTO ALBEDO Y VEGETACIÓN COMO ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DE LA ISLA DE CALOR EN SUPERFICIES URBANAS DE UN CLIMA MEDITERRÁNEO**

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 **DRA. KAREN ESTRELLA MARTÍNEZ TORRES**

  
FIRMA

CO-DIRECTOR DE TESIS **DR. CARLOS JAVIER ESPARZA LÓPEZ**

  
FIRMA

## **DEDICATORIA**

**A mi madre Claisalia Guadalupe Osuna Ley:**

**Por su amor y apoyo incondicional en todo lo que me he propuesto en la vida, sin ella no habrían sido posibles ninguno de mis logros.**

## AGRADECIMIENTOS

### **A mi directora de tesis, Dra. Karen Estrella Martínez Torres:**

Por compartir conmigo su conocimiento y experiencia, pero sobre todo por su interés genuino en mi trabajo. Representa a la figura más importante en mi formación como investigador y su orientación, paciencia y confianza fueron fundamentales para superar las dificultades que se presentaron durante este posgrado. Es una de las personas que más admiro y le doy gracias por creer en mí, ayudarme a desarrollarme en lo que tanto me gusta y siempre impulsarme a alcanzar metas que parecían inalcanzables. Tras este largo recorrido, me queda el firme anhelo de que, en algún momento, pueda corresponderle con una aportación tan valiosa como la guía y las enseñanzas que me ha otorgado.

### **Dr. Carlos Javier Esparza López:**

El entusiasmo que compartió por esta investigación me impulsó a mantener mi motivación por realizar este trabajo y constituyó un apoyo invaluable para superar las adversidades. Le agradezco por transmitirme confianza en el desarrollo de mi labor, por orientarme en la dirección correcta y por reconocer el valor de mi esfuerzo y mi trabajo. Su guía resultó esencial tanto para la consolidación de este proyecto como para mi crecimiento académico.

### **Dr. Marcos Eduardo González Trevizo:**

Por contagiar su pasión por la investigación, cuyas valiosas sugerencias y comentarios no solo contribuyeron a llevar el rumbo del presente trabajo hacia un camino más sólido y enriquecedor, sino que también marcaron en mí una forma distinta de comprender la Arquitectura. Le agradezco profundamente la dedicación, el tiempo y la disposición que siempre mostró, elementos que fueron esenciales para el desarrollo de esta tesis y para mi propia formación.

### **Dr. Julio César Rincón Martínez:**

Le agradezco por su apoyo, sus observaciones críticas y sus valiosas aportaciones que contribuyeron de manera significativa a fortalecer la solidez de este trabajo.

Gracias por motivarme a participar en publicaciones, mantener un desempeño riguroso y por la convivencia durante las materias que nos ha impartido. Sin duda, el tiempo compartido constituye un recuerdo muy valioso, lleno de aprendizajes, experiencias enriquecedoras y momentos memorables que siempre atesoraré.

**Dra. Claudia Rivera Torres:**

La dedicación y el entusiasmo con los que compartió su conocimiento, fueron de gran ayuda para el desarrollo de esta tesis. Ha sido una persona fundamental en mi formación académica, acompañándome desde el inicio de la licenciatura hasta la culminación de este programa de doctorado, dejando una huella profunda en mi crecimiento profesional y personal. Su guía y ejemplo seguirán siendo una inspiración para los proyectos que emprenda en el futuro.

**A los profesores del Programa de Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño (DAUD);** el Dr. Francisco Fernández Melchor, Dra. Laura Zamudio Vega, Dra. Aurora García Gacía de León, Dr. Aníbal Luna León:

Cada uno de ustedes ha sido parte esencial de mi formación como investigadora. Agradezco sus comentarios y críticas durante las diferentes clases del posgrado, que contribuyeron significativamente a mi desarrollo académico desde Maestría hasta el Doctorado.

**A SECIHTI:**

Por beneficiarme con una beca, que me permitió realizar mis estudios de Doctorado, dedicando tiempo completo a ello.

## RESUMEN

La isla de calor urbana (UHI) incrementa el estrés térmico y representa un riesgo para la salud, especialmente en climas mediterráneos sujetos a olas de calor. A partir de lo anterior, este estudio busca evaluar estrategias de mitigación combinando vegetación y pavimentos de alto albedo en la ciudad de Ensenada, B.C. Para ello, se realizaron simulaciones microclimáticas con el programa informático ENVI-met, considerando escenarios con uno y dos árboles cada 7.0 m y pavimentos de bajo y alto albedo, durante las estaciones de verano e invierno. La temperatura del aire se analizó a 1.50 m de altura, con el fin de estimar el impacto en el microclima urbano de 7 escenarios por cada fraccionamiento. Se identificó que, en verano, el escenario CB-2-A (dos árboles cada 7.0 m y pavimento de alto albedo) logró reducciones de hasta 3.4 °C, mientras que en invierno la disminución fue de hasta 1.5 °C respecto al caso base. Estas variaciones evidencian que la combinación de vegetación estratégica y materiales reflectantes es más efectiva que su aplicación aislada.

En conclusión, este trabajo aporta evidencia cuantitativa sobre el potencial de dichas estrategias para climas mediterráneos costeros, contribuyendo a generar pautas de diseño urbano orientadas a la sostenibilidad y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 3 (Salud y bienestar) y 13 (Acción por el clima).

**Palabras clave:** Isla de calor urbano, Desempeño térmico, Zonas climáticas locales, Albedo, Vegetación

## ABSTRACT

Urban heat islands (UHIs) intensify thermal stress and generate significant health risks, particularly in Mediterranean-type climates subject to recurrent heatwaves. This study evaluates urban heat mitigation strategies through the combined implementation of vegetation and high-albedo pavements in Ensenada, Mexico. Microclimatic simulations were conducted using the ENVI-met model under scenarios with one and two trees every 7.0 m, in combination with pavements of low and high albedo, during the summer and winter seasons. Air temperature was assessed at 1.50 m above ground level to quantify the cooling performance of seven scenarios for residential areas.

Results indicate that, in summer, the CB-2-A scenario (two trees every 7.0 m combined with high-albedo pavement) reduced air temperature by up to 3.4 °C, while in winter the maximum reduction reached 1.5 °C relative to the baseline. These outcomes demonstrate that the application of vegetation and reflective pavements provides greater cooling effectiveness than either strategy applied independently.

In conclusion, the research delivers quantitative evidence on the applicability of combined mitigation measures for Mediterranean coastal climates. The findings contribute to design guidelines that promote sustainable urban development and advance progress toward Sustainable Development Goals 3 (Good Health and Well-being) and 13 (Climate Action).

**Keywords:** Urban heat island, Thermal performance, Local climate zone, Albedo, Vegetation

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	XIII
LISTADO DE ABREVIATURAS .....	XIV
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Panorama General.....	2
1.2. Planteamiento del Problema .....	3
1.3. Justificación .....	5
1.4. Antecedentes.....	7
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
2.1. Marco Teórico.....	19
2.1.1. Origen de la Isla de Calor Urbana (UHI).....	21
2.1.1.1. <i>Posicionamiento histórico de la UHI</i> .....	22
2.1.1.2. <i>Zonas climáticas locales (LZC)</i> .....	23
2.1.1.3. <i>Geometría urbana</i> .....	25
2.1.1.4. <i>Ecología Urbana</i> .....	26
2.1.2. Efectos producidos por el microclima en el entorno urbano .....	26
2.1.2.1. <i>Energía en los espacios urbanos</i> .....	26
2.1.2.2. <i>Calidad ambiental de la ciudad</i> .....	27
2.1.3. Confort térmico en los espacios urbanos.....	27
2.1.3.1. <i>Temperatura Fisiológicamente Efectiva (PET)</i> .....	28
2.1.3.2. <i>Voto Medio Predicho (PMV)</i> .....	30
2.1.3.3. <i>Índice Universal del Clima Térmico (UTCI)</i> .....	30
2.1.3.4. <i>Métodos de estudio de microclimas</i> .....	31
2.1.4. Estrategias de mitigación de la UHI.....	33
2.1.5. Enfriamiento por medio de vegetación .....	34
2.1.5.1. <i>Árboles de sombra</i> .....	34
2.1.5.2. <i>Índice del Área Foliar (LAI)</i> .....	35

2.1.6.	Enfriamiento por medio de superficies con alto albedo .....	36
2.1.6.1.	<i>Transferencia de calor</i> .....	37
2.1.6.2.	<i>Tecnologías de enfriamiento</i> .....	39
2.1.6.3.	<i>Propiedades de los materiales</i> .....	41
2.2.	Pregunta de investigación e hipótesis.....	43
2.2.1.	Pregunta de investigación .....	43
2.2.2.	Hipótesis.....	43
2.3.	Objetivos de investigación .....	44
2.3.1.	Objetivo general.....	44
2.3.2.	Objetivos específicos.....	44
<b>CAPÍTULO 3. MÉTODO</b>	<b>.....</b>	<b>45</b>
3.1.	Diseño de la investigación .....	46
3.2.	Objeto de estudio.....	49
3.3.	Variables de estudio .....	49
3.4.	Área de estudio.....	51
3.4.1.	Unidad de análisis .....	51
3.5.	Diseño del experimento .....	58
3.6.	Trabajo de campo y medición.....	58
3.6.1.	Formulación de plan de medición de campo .....	60
3.6.1.1.	<i>Determinación de instrumentos</i> .....	61
3.6.1.2.	<i>Selección de las condiciones climáticas</i> .....	62
3.6.2.	Selección de la vegetación y materiales.....	63
3.6.3.	Diseño de escenarios .....	66
3.6.4.	Simulación .....	69
3.6.4.1.	<i>Modelo de simulación</i> .....	70
3.6.4.2.	<i>Configuración de ENVI-met</i> .....	74
3.6.4.3.	<i>Ejecutar la simulación</i> .....	76
3.6.4.4.	<i>Análisis de resultados</i> .....	76
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>.....</b>	<b>80</b>
4.1.	Validación de escenarios base .....	81

4.2.1.	Escenarios de simulación Fracc. del Sol .....	86
4.2.2.	Temperatura del aire Fracc. del Sol.....	91
4.2.2.1.	<i>Receptores en Fracc. del Sol</i> .....	95
4.2.3.	Humedad relativa Fracc. del Sol.....	105
4.2.4.	Escenarios de simulación Fracc. Pedregal Playitas .....	121
4.2.5.	Temperatura del aire de Fracc. Pedregal Playitas.....	127
4.2.5.1.	<i>Receptores en Fracc. Pedregal Playitas</i> .....	127
4.2.6.	Humedad relativa en Fracc. Pedregal Playitas .....	137
4.2.7.	Relación entre el LAI y la reducción de la temperatura del aire.....	146
4.2.8.	Relación entre el albedo de las superficies y el desempeño térmico exterior	147
4.2.9.	Efectos de enfriamiento a partir de las combinaciones de LAI de la vegetación y albedo de las superficies .....	148
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....</b>		<b>150</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>155</b>
<b>APÉNDICE 1. Trabajo y medición en campo .....</b>		<b>166</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Temperaturas superficiales de los materiales y plantas sombreados y sin sombra.....	8
Figura 2. Índice de área foliar (método del ceptómetro) dentro de la sombra del árbol por superficie.....	9
Figura 3. Modelo de ENVI-met para simulación.....	10
Figura 4. Modelos en ENVI-met de los casos de estudio.....	11
Figura 5. Temperatura superficial de distintos recubrimientos durante la mañana, la tarde y la noche.....	12
Figura 6. Impacto de los techos fríos en términos de reducción. (a) Promedio para todo el período; (b) promedio diurno (08:00 h – 20:00 h); (c) promedio nocturno (20:00 h – 08:00 h).....	13
Figura 7. Comparación de escenarios del efecto de las sequoias. ....	14
Figura 8. Escenarios con distintas configuraciones de vegetación y materiales fríos en un cañón urbano .....	15
Figura 9. Cálculo del confort térmico (PET) en cañones urbanos de un área residencial.....	16
Figura 10. Consideraciones teóricas retomadas en la investigación.....	19
Figura 11. Balance energético en superficies urbanas .....	22
Figura 12. Zonas climáticas locales .....	24
Figura 13. Escala de sensación térmica del índice PMV .....	30
Figura 14. Resumen de las propiedades del espectro electromagnético.....	39
Figura 15. Estructura de los pavimentos.....	40
Figura 16. Absorción, reflexión y transmisión de la radiación incidente por un material .....	42
Figura 17. Tipos de reflexión de la luz: A) Difusa y B) Especular.....	42

Figura 18. Selección de unidad de análisis a través de mapa del centro de población, temperatura superficial, índice de vegetación normalizada y LCZ de la ciudad de Ensenada, Baja California.....	52
Figura 19. Áreas residenciales correspondientes a la unidad de análisis .....	53
Figura 20. Distribución de equipo y caracterización de unidad de análisis para el Fracc. del Sol .....	55
Figura 21. Distribución de equipo y caracterización de unidad de análisis para Fracc. Pedregal Playitas .....	57
Figura 22. Flujo de trabajo de medición de campo .....	60
Figura 23. Características de los árboles de sombreado según el clima .....	64
Figura 24. Rangos de albedo de las superficies utilizadas en la literatura.....	65
Figura 25. Software RayMan para cálculo de SVF a partir de imagen de ojo de pescado .....	67
Figura 26. Módulos de trabajo de ENVI-met .....	70
Figura 27. Modelado en Spaces de ENVI-met y especificaciones de los materiales .....	72
Figura 28. Ubicación de receptores en modelos de simulación .....	73
Figura 29. Módulo Albero para la creación de árbol Cupressus forbesii y sus dimensiones.....	73
Figura 30. Módulo ENVI-guide para configuración de la simulación.....	75
Figura 31. Módulo ENVI-core para ejecutar la simulación .....	76
Figura 32. Módulo BIO-met para calcular índices de confort térmico.....	77
Figura 33. Módulo Leonardo para visualizar datos .....	78
Figura 34. Comparación entre temperatura del aire monitoreada en punto A y receptor 7 del CB .....	82

Figura 35. Comparación entre temperatura del aire monitoreada en punto B y receptor 6 del CB .....	83
Figura 36. Comparación entre temperatura del aire monitoreada en punto A y receptor 3 del CB .....	85
Figura 37. Comparación entre temperatura del aire monitoreada en punto D y receptor 1 del CB .....	85
Figura 38. Mapas térmicos de los escenarios de simulación en verano a las 05:00 h y 14:00 h a 1.50 m de altura.....	87
Figura 39. Mapas térmicos de los escenarios de simulación en invierno a las 05:00 h y 14:00 h a 1.50 m de altura.....	89
Figura 40. Temperatura media del aire del día 18/09/2024 del Fracc. del Sol.....	92
Figura 41. Temperatura media del aire del día 23/02/2024 del Fracc. del Sol.....	94
Figura 42. Temperatura del aire registrada en Receptor 6 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura .....	97
Figura 43. Temperatura del aire registrada en Receptor 7 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura .....	99
Figura 44. Temperatura del aire registrada en el Receptor 6 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura .....	101
Figura 45. Temperatura del aire registrada en el Receptor 7 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura .....	103
Figura 46. Humedad Relativa media del día 18/09/2023 en el Fracc. del Sol.....	107
Figura 47. Humedad Relativa registrada en el Receptor 6, el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura .....	110
Figura 48. Humedad Relativa registrada en el Receptor 7, el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura .....	112
Figura 49. Humedad Relativa media del día 23/02/2024 en el Fracc. del Sol.....	114

Figura 50. Humedad Relativa registrada en el Receptor 6, el día 23/02/2024 en el Fracc. del Sol .....	117
Figura 51. Humedad Relativa registrada en el Receptor 7, el día 23/02/2024 en el Fracc. del Sol .....	119
Figura 52. Mapas térmicos de los escenarios de simulación en verano a las 05:00 h y 14:00 h a 1.50 m de altura.....	122
Figura 53. Mapas térmicos de los escenarios de simulación en invierno a las 05:00 h y 14:00 h a 1.50 m de altura.....	125
Figura 54. Temperatura del aire registrada en el Receptor 4 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura .....	129
Figura 55. Temperatura del aire registrada en el Receptor 1 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura .....	131
Figura 56. Temperatura del aire registrada en el Receptor 4 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura .....	133
Figura 57. Temperatura del aire registrada en el Receptor 1 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura .....	135
Figura 58. Humedad Relativa registrada en el Receptor 4, el 18/09/2023 en el Fracc. Pedregal Playitas .....	139
Figura 59. Humedad Relativa registrada en el Receptor 1, el 18/09/2023 en el Fracc. Pedregal Playitas .....	141
Figura 60. Humedad Relativa registrada en el Receptor 4, el 23/02/2024 en el Fracc. Pedregal Playitas .....	143
Figura 61. Humedad Relativa registrada en el Receptor 1, el 23/02/2024 en el Fracc. Pedregal Playitas .....	145

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Hallazgos de estudios y estrategias evaluadas.....	17
Tabla 2. Tabla-resumen del marco teórico de la investigación .....	20
Tabla 3. Ventajas y limitaciones de distintos índices de confort térmico.....	28
Tabla 4. Rangos de Temperatura Fisiológicamente Equivalente (PET).....	29
Tabla 5. Rango UTCI y nivel de estrés térmico correspondiente. ....	31
Tabla 6. Datos utilizados en ENVI-met .....	33
Tabla 7. Proceso metodológico de la investigación .....	46
Tabla 8. Objeto de estudio .....	49
Tabla 9. Variables dependientes e independientes utilizadas en la investigación	49
Tabla 10. Operalización de variables .....	50
Tabla 11. Características del sitio, según los parámetros de las Zonas climáticas locales.....	54
Tabla 12. Especificaciones del equipo .....	61
Tabla 13. Temperatura del aire y humedad relativa del día típico de verano e invierno .....	62
Tabla 14. Características de la vegetación utilizada en los escenarios de simulación .....	65
Tabla 15. Características de escenarios de simulación en Fracc. del Sol .....	68
Tabla 16. Características de escenarios de simulación en Fracc. Pedregal Playitas .....	69
Tabla 17. Parámetros de entrada de ENVI-met .....	74
Tabla 18. Casos análogos .....	79

Tabla 19. Gráfico de ajuste de puntos monitoreados y el receptor simulado correspondiente el día 18 de septiembre del 2023 a escala peatonal (1.50 m) en el Fracc. del Sol. ....	81
Tabla 20. Gráfico de ajuste de puntos monitoreados y el receptor simulado correspondiente, el día 18 de septiembre del 2023 a escala peatonal (1.50 m) en el Fracc. Pedregal Playitas. ....	84
Tabla 21. Temperatura media del aire del día 18/09/2024 del Fracc. del Sol .....	91
Tabla 22. Temperatura media del aire del día 23/02/2024 del Fracc. del Sol .....	93
Tabla 23. Temperatura del aire registrada en Receptor 6 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura .....	96
Tabla 24. Temperatura del aire registrada en Receptor 7 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura .....	98
Tabla 25. Temperatura del aire registrada en el Receptor 6 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura .....	100
Tabla 26. Temperatura del aire registrada en el Receptor 7 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura .....	102
Tabla 27. Aumento o disminución de la temperatura del aire (°C) promedio en comparación del Caso Base en el Receptor 6 y 7 del Fracc. Del Sol .....	105
Tabla 28. Humedad Relativa media del día 18/09/2023 en el Fracc. del Sol .....	106
Tabla 29. Humedad Relativa registrada en el Receptor 6, el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura .....	109
Tabla 30. Humedad Relativa registrada en el Receptor 7, el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura .....	111
Tabla 31. Humedad Relativa media del día 23/02/2024 en el Fracc. del Sol .....	113
Tabla 32. Humedad Relativa registrada en el Receptor 6, el día 23/02/2024 en el Fracc. del Sol .....	116

Tabla 33. Humedad Relativa registrada en el Receptor 7, el día 23/02/2024 en el Fracc. del Sol .....	118
Tabla 34. Aumento o disminución de la Humedad Relativa (%) promedio en comparación del Caso Base en el Receptor 6 y 7 del Fracc. del Sol.....	121
Tabla 35. Temperatura del aire registrada en el Receptor 4 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura .....	128
Tabla 36. Temperatura del aire registrada en el Receptor 1 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura .....	130
Tabla 37. Temperatura del aire registrada en el Receptor 4 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura .....	132
Tabla 38. Temperatura del aire registrada en el Receptor 1 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura .....	134
Tabla 39. Aumento o disminución de la Temperatura del aire (°C) promedio en comparación del Caso Base con los Receptores 6 y 7 del Fracc. Pedregal Playitas .....	137
Tabla 40. Humedad Relativa registrada en el Receptor 4, el 18/09/2023 en el Fracc. Pedregal Playitas .....	138
Tabla 41. Humedad Relativa registrada en el Receptor 1, el 18/09/2023 en el Fracc. Pedregal Playitas .....	140
Tabla 42. Humedad Relativa registrada en el Receptor 4, el 23/02/2024 en el Fracc. Pedregal Playitas .....	142
Tabla 43. Humedad Relativa registrada en el Receptor 1, el 23/02/2024 en el Fracc. Pedregal Playitas .....	144
Tabla 44. Aumento o disminución de la Humedad Relativa (%) promedio en comparación del Caso Base con los Receptores 6 y 7 del Fracc. Pedregal Playitas .....	146

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 1. Índice del área foliar .....	36
Ec. 2. Absortividad ( $\alpha$ ).....	42
Ec. 3. Reflectividad ( $\rho$ ).....	42
Ec. 4. Transmisividad (T) .....	42

## LISTADO DE ABREVIATURAS

Isla de calor urbana	UHI
Gases de efecto invernadero	GEI
Factor de cielo visible	SVF
Isla de calor urbana superficial	SUHI
Isla de calor urbana de dosel	CUHI
Índice del área foliar	LAI
Temperatura fisiológicamente efectiva	PET
Voto medio predicho	PMV
Índice Universal del Clima Térmico	UTCI
Dinámica de fluidos computacional	CFD
Sistema de información geográfica	SIG
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada	CICESE
Comisión Nacional del Agua	CONAGUA
Instituto Nacional de Estadística y Geografía	INEGI
Modelo de simulación microclimática	ENVI-met
Objetivos de Desarrollo Sostenible	ODS
Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California	PEACC-BC
Métodos basados en imágenes de teledetección	RS
Sociedad Internacional de Biometeorología	ISB
Organización Meteorológica Mundial	WMO
Cooperación Europea en Ciencia y Tecnología	COST
Forzamiento radiativo	RF
Demanda de energía del edificio	BED
Índice de Reflectancia Solar	SRI
Grado de Rezago Social	GRS
Área Geoestadística Básica	AGEB

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. Panorama General

Los investigadores que estudian los entornos urbanos han explorado una amplia gama de estrategias para enfriar el entorno urbano y mejorar el confort térmico (Abreu-Harbich et al., 2015). Las decisiones humanas sobre cómo gestionar la extensión, la composición y los patrones espaciales de las cubiertas de suelo urbano ayudan a dar forma a la estructura y función emergente de los ecosistemas urbanizados (Byrne et al., 2008). Debido a la rápida urbanización, las superficies permeables, incluidos el suelo y los paisajes naturales, han sido reemplazadas en gran medida por hormigón y otros materiales impermeables hechos por el hombre. Estos cambios ambientales conducen a la alteración del balance energético urbano y, en consecuencia, a la formación del fenómeno de isla de calor urbano (UHI, por sus siglas en inglés) (Ouyang et al., 2020).

De las diferentes estrategias de mitigación, el uso de vegetación parece ser la medida más eficaz para mitigar el efecto UHI, su eficacia está probada y aceptada por los expertos. Además, la selección adecuada de los materiales del pavimento también puede contribuir a la reducción del efecto de sobrecalentamiento (Nuruzzaman, 2015). Tradicionalmente los materiales utilizados para la construcción urbana presentan valores menores de albedo que los existentes en el medio rural, razón por la que la absorción de energía de éstos materiales ocasiona un mayor almacenamiento de calor en los mismos (Azcarate et al., 2019).

En el caso de Ensenada, que se ubica en la costa noroeste de Baja California, presenta un clima mediterráneo seco (BSk, clasificación Köppen-Geiger) caracterizado por veranos cálidos y secos e inviernos templados. De acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2023), la temperatura máxima promedio en verano ha alcanzado valores cercanos a 29.5 °C, con eventos extremos que superan los 35 °C en los últimos cinco años. Paralelamente, el crecimiento urbano ha sido significativo: entre 2010 y 2020 la población del municipio aumentó un 17 %, y la superficie urbana se expandió principalmente hacia zonas costeras y periurbanas (INEGI, 2020). Este incremento de la densidad de construcción y reducción de áreas vegetadas incrementa el riesgo de intensificación de la UHI, fenómeno que se suma a las tendencias globales

de calentamiento y urbanización. El objetivo de esta investigación es simular el albedo de diferentes superficies urbanas, bajo el sombreado de árboles con distinto Índice del Área Foliar (LAI, por sus siglas en inglés), para analizar el efecto de enfriamiento en el microclima urbano de la ciudad de Ensenada B.C. en temporada de verano e invierno. El contenido de esta tesis se organiza en cuatro capítulos. El Capítulo 1 presenta el contexto general, el planteamiento del problema, la justificación y el marco de referencia. El Capítulo 2 desarrolla el marco teórico, abordando los conceptos clave sobre isla de calor urbana, albedo y vegetación, así como estudios previos relevantes. El Capítulo 3 describe la metodología empleada, incluyendo el diseño experimental, el área de estudio, las variables y los procedimientos de simulación. El Capítulo 4 expone los resultados y la discusión, seguidos de las conclusiones y recomendaciones para el diseño urbano en climas mediterráneos.

## **1.2. Planteamiento del Problema**

Se ha reconocido que la vida humana y el bienestar general son afectados por factores ambientales microclimáticos (Srivani & Jareemit, 2020). La historia de los hábitats urbanos no es solo de adaptación pasiva al clima regional, sino de transformación activa para producir microclimas radicalmente diferentes al terreno circundante (Hebbert & Jankovic, 2013). El crecimiento de la población en las ciudades está alineado con el aumento de la construcción y la densificación urbana, que en última instancia resulta en malestar térmico en las ciudades (Nasrollahi et al., 2020). El área urbana total del mundo se ha expandido en un 168% entre 2001 y 2018 (Dewan et al., 2021) y la UHI claramente es el resultado de las diferencias en el balance energético urbano/rural (Oke, 1982).

El aumento de las emisiones de calor antropogénico, la reducción del enfriamiento por evaporación, el aumento de la rugosidad de la superficie, un bajo albedo de las superficies y la geometría de los cañones urbanos estrechos asociados con las ciudades a menudo dan como resultado la formación de la UHI (Debbage & Shepherd, 2015), que incluye la reducción de la calidad ambiental, la exacerbación del malestar térmico y la aceleración de los problemas de salud pública relacionados con el calor (Nwakaire et al., 2020). El aumento de la temperatura tiene un impacto grave en la

vida de la ciudad y en particular sobre el consumo de energía para la refrigeración, el confort al aire libre, la salud y la economía local. Varios estudios han documentado las consecuencias específicas del cambio climático local sobre la energía y la demanda máxima de electricidad (Santamouris et al., 2017).

Por esta razón las áreas urbanas al aire libre deben planificarse teniendo en cuenta la selección adecuada de las estrategias de mitigación (Salata et al., 2015). El vecindario ha sido de gran interés para el estudio del entorno construido como una unidad básica de planificación. Sin embargo, cualquier discusión sobre estas preocupaciones, sin considerar el análisis del microclima urbano, sería un desastre debido al creciente aumento de la población y cambio climático (Fahmy et al., 2018). La situación desafía a los planificadores y diseñadores urbanos a diseñar entornos al aire libre y proyectos residenciales para superar el estrés térmico extremo durante los meses calurosos (Srivani & Jareemit, 2020).

Para esta investigación se establece una delimitación temporal, considerando periodos de trabajo de campo y simulaciones de las condiciones microclimáticas correspondientes a días representativos de verano e invierno. Esta elección permite capturar el contraste estacional en el comportamiento térmico urbano de Ensenada, e identificar tanto los episodios de mayor radiación solar y malestar térmico, como aquellos donde los efectos de la isla de calor urbana se manifiestan de forma moderada.

Si bien existen numerosos estudios internacionales que documentan los beneficios de la vegetación y de los pavimentos de alto albedo en la mitigación de la UHI, la presente investigación busca generar información específica y cuantitativa sobre el desempeño térmico de estas estrategias en Ensenada, una ciudad con clima mediterráneo costero. Para ello se consideran variables locales como las condiciones climatológicas, la configuración urbana y el patrón de crecimiento reciente. De esta manera, se contribuye a fortalecer la base de conocimientos existente con datos aplicables al diseño urbano en ciudades con características similares.

En este contexto, surge la necesidad de evaluar cómo distintas configuraciones de vegetación y pavimentos reflectantes pueden modificar la temperatura del aire a escala peatonal. De ahí que el objetivo general de esta investigación sea simular el albedo de diferentes superficies urbanas bajo el sombreado de árboles con distintos valores de LAI, para analizar su efecto de enfriamiento en distintas temporadas del año. La hipótesis que guía este trabajo sostiene que la combinación de pavimentos de alto albedo con arbolado de mayor densidad foliar producirá reducciones significativas en la temperatura del aire, mejorando el confort térmico urbano en comparación con los escenarios base.

### **1.3. Justificación**

Las personas responden particularmente a las condiciones ambientales exteriores y son sensibles al estado microclimático de su entorno (Tumini, 2012). El efecto de sobrecalentamiento por UHI impacta en el entorno térmico de una ciudad, aumenta las cargas de refrigeración de los edificios y reduce el confort térmico de los espacios abiertos. Además, durante el verano, la combinación de calentamiento global y UHI aumenta la mortalidad relacionada con el calor (Lai et al., 2019).

Es importante explorar la esencia de la UHI con puntos de vista sobre sus causas e impactos y estudiar las estrategias de mitigación de manera sostenible (Aflaki et al., 2016). Las estrategias relacionadas con el componente de construcción incluyen la implementación de pavimentos fríos y techos verdes, diseño de sombreado para edificios y espacios abiertos, controlando el albedo con una superficie reflectante para áreas no sombreadas (Wonorahardjo et al., 2020). Este sombreado directo tiene efectos importantes sobre el confort térmico humano, ya que es el intercambio de radiación con el entorno circundante el que más influye en el confort térmico percibido por una persona (Speak et al., 2020). Una persona a la sombra debe sentir menos calor que una que está expuesta a la incidencia directa del Sol, y una persona que se encuentra en una superficie más caliente debe sentir más calor que una que está parada sobre una superficie más fría (Armson et al., 2012).

La vegetación puede ser una solución basada en la naturaleza para la mitigación del efecto UHI, en conjunto con varios materiales artificiales, pero su desempeño solo se compara comúnmente con el concreto o el asfalto (Tan et al., 2021).

La presente investigación se desarrolló en la ciudad de Ensenada Baja California ( $31^{\circ} 52'$  de latitud norte y a  $116^{\circ} 37'$  de longitud oeste), en un clima que se clasifica como BSk por el sistema Köppen-Geiger, y se interpreta como clima mediterráneo seco (ClimateData, 2021). Por su ubicación costera, Ensenada está influenciada por la brisa marina, factor que incide en la selección del área de estudio. Este fenómeno genera velocidades de viento variables a lo largo del día y la noche. La brisa se puede caracterizar por generar dos tipos diferentes de circulación durante las 24 horas de un día: la brisa diurna y la nocturna. Existen factores que afectan el inicio, fuerza y dirección de las brisas. Por ejemplo, las variaciones estacionales y la topografía de un lugar determinado (Carrascal-Sierra, 2015). Como también han indicado estudios previos, los lugares cercanos al mar son mucho más fríos que los distritos dentro de los centros urbanos densamente poblados, el aumento de la altura de los edificios junto con las altas densidades de superficie actúan como barreras contra el viento, inhibiendo así la penetración de la brisa marina a nivel de la calle (Tsoka et al., 2017).

Esta ciudad no es la excepción y presenta problemáticas asociadas al desarrollo de diferentes microclimas debido a la geometría urbana, los materiales utilizados y la vegetación. Según la especialista en climatología del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), la doctora María Tereza Cavazos Pérez, explicó que el aumento de la temperatura promedio representa también un posible aumento en las temperaturas de los extremos correspondientes a los periodos de calor y frío, debido a que la distribución de temperatura cambia (CICESE, 2018).

De acuerdo con Otazo et al. (2012), en el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California (PEACC-BC) se muestran proyecciones de cambios de temperatura en la ciudad de Ensenada hasta el 2100, con respecto al período de 1961-1990. Se analizan cambios bajo dos escenarios de incremento de gases de efecto de invernadero (GEI): B1 (bajas emisiones) y A2 (altas emisiones). La temperatura mínima media, en ambos escenarios en 2020, presentó mayores incrementos que en

otros años. En los meses de febrero y mayo se presentarían incrementos entre 1.1 °C y 1.3 °C. Para el 2050, el incremento máximo en la temperatura mínima media sería de 1.8 °C con el escenario A2 en el mes de febrero. Para el 2080, las estaciones de primavera, verano y otoño serían las más sensibles al incremento térmico, sobre todo con el escenario A2; el valor máximo de incremento se tendría en el mes de agosto con 2.7 °C.

El presente estudio pretende desarrollar información relevante para atender la problemática antes mencionada y lograr contribuir a la búsqueda del desarrollo sostenible de la agenda 2030, precisamente con el objetivo 3 (Salud y bienestar) y 13 (Acción por el clima). Los hallazgos pueden ser utilizados para generar pautas de diseño para la selección de materiales y vegetación en el entorno construido en la ciudad de Ensenada y en otros lugares con características similares.

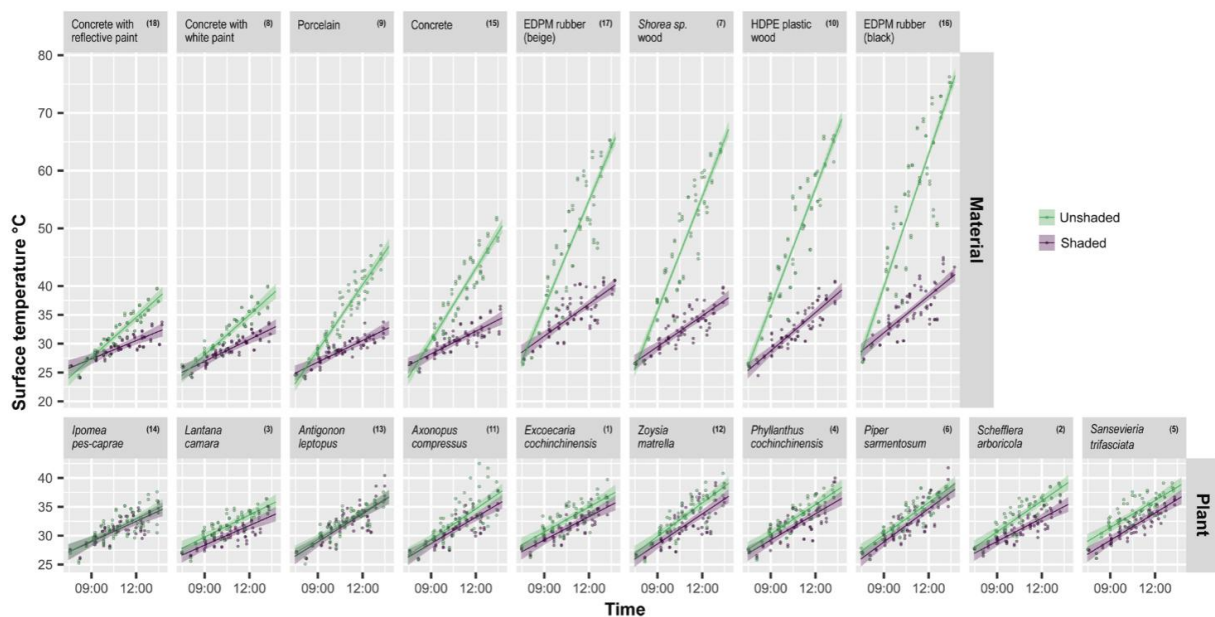
#### **1.4. Antecedentes**

Diversos estudios internacionales han evidenciado la importancia de integrar vegetación y materiales reflectantes como estrategias de mitigación de la isla de calor. En climas mediterráneos, investigaciones en Tesalónica y Bolzano reportaron reducciones de entre 2 °C y 4 °C en la temperatura del aire al combinar árboles y superficies de alto albedo, mientras que, en contextos tropicales como Singapur y Mumbai, la vegetación densa mostró un mayor potencial de enfriamiento gracias a la evapotranspiración. En contraste, en ciudades de climas cálidos, como el Cairo, se ha comprobado que los techos y pavimentos fríos disminuyen la temperatura superficial y del aire. Estos antecedentes confirman que la eficacia de cada estrategia depende de las condiciones locales, lo que valida la pertinencia del estudio en la ciudad de Ensenada. A continuación, se presentan con mayor detalle algunos de los estudios que constituyen la base comparativa y metodológica de esta investigación.

En un estudio realizado en la azotea de un edificio de la Universidad de Singapur, se seleccionaron 18 tipos de superficies, 10 plantas y ocho materiales artificiales. Para registrar los perfiles de calentamiento de los tipos de superficies, se llevó a cabo el experimento en parcelas de 1.7 m x 1.7 m, divididas en la azotea. Diez parcelas se expusieron al Sol (sin sombra), y las otras diez parcelas se cubrieron cada una con

una "carpa" de una película opaca reflectante a aproximadamente un metro del suelo, completamente sombreada. Las superficies de las plantas sin sombra, excepto el concreto cubierto con pintura blanca o pintura blanca reflectante infrarroja, estaban significativamente más frías que todos los materiales artificiales por al menos ~ 11 °C. Como se muestra en la Figura 1, los resultados ilustran que reemplazar materiales artificiales sin sombra con plantas, particularmente aquellos con altas tasas de evapotranspiración, y sombrear materiales artificiales, especialmente aquellos con un albedo bajo, son estrategias efectivas para reducir las temperaturas de la superficie y mitigar el efecto UHI (Tan et al., 2021).

**Figura 1.**  
 Temperaturas superficiales de los materiales y plantas sombreados y sin sombra.

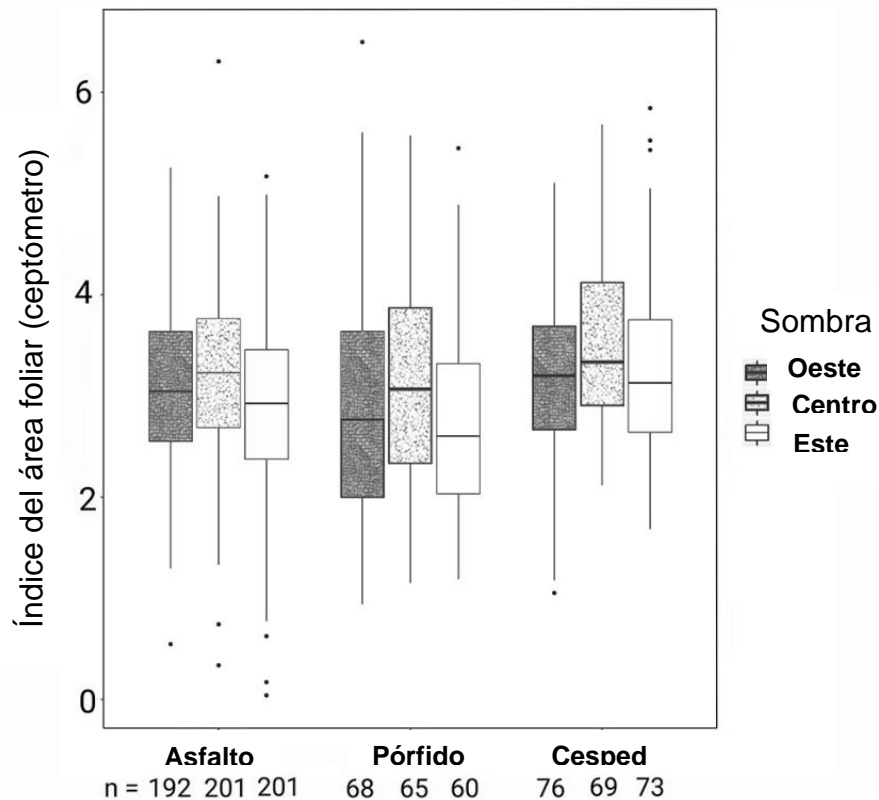


Nota. Temperaturas superficiales para materiales y plantas con y sin sombra. Los puntos representan las temperaturas observadas y las líneas continuas, los efectos predichos. Las bandas muestran intervalos de confianza del 95 %. [Figura], Tan et al. (2021).

En otro estudio realizado en Bolzano, Italia, se utilizó una cámara térmica para registrar las temperaturas de tres superficies urbanas comunes (asfalto, pódido y césped) a la sombra de 332 copas de árboles individuales de 85 especies diferentes, durante el período de temperatura máxima de días de verano. Comparando con la temperatura del suelo adyacente sin sombra, se hicieron estimaciones del grado de enfriamiento de la superficie. Este estudio ha mostrado las reducciones significativas de temperatura en el borde occidental de la sombra de un solo árbol y confirma el papel

de los árboles en la interceptación de la radiación solar y la prevención de la acumulación de calor sensible en las ciudades (Figura 2). Los árboles coníferos a menudo tienen copas densas, lo que proporciona un LAI alto. Sin embargo, la estrechez de las coronas limita la duración de la sombra en la superficie. Se recomienda una cuidadosa selección de especies, basada en características clave como la densidad de las hojas y el ancho de la copa (Speak et al., 2020).

**Figura 2.**  
 Índice de área foliar (método del ceptómetro) dentro de la sombra del árbol por superficie.



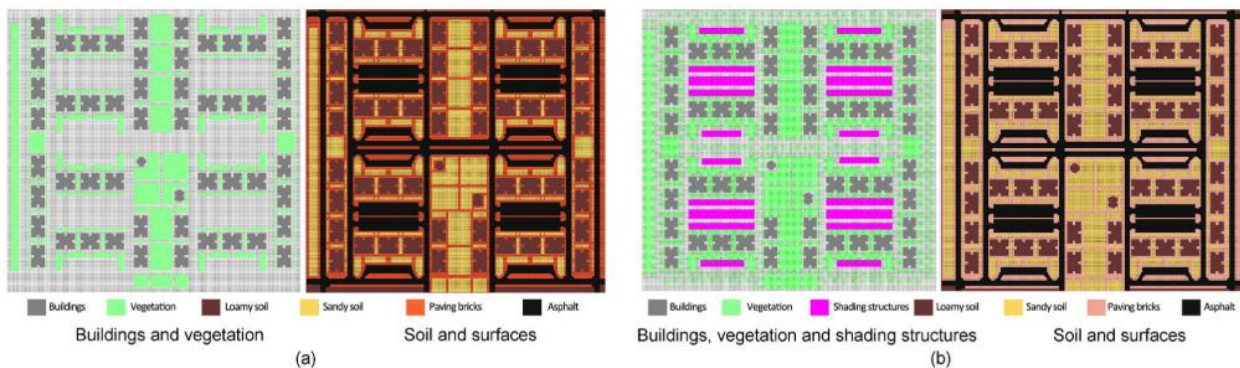
Nota. Índice de área foliar (método del ceptómetro) en las tres ubicaciones dentro de la sombra del árbol para cada tipo de superficie. [Figura], Speak et al., (2020).

En el estudio de Fahmy et al. (2018), realizado en el Cairo, Egipto, el caso de estudio es un sector de una comunidad residencial urbana, donde fueron simulados escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) diferentes y fue analizado el microclima a través de sus construcciones, vegetación, distintos tipos de superficies, y estructuras de sombra, como se muestra en la Figura 3.

Cabe resaltar que hubo diferencias de temperatura de hasta 1.4 °C solo por el albedo que presentaban las superficies. Los resultados de esta investigación han demostrado

que las estrategias de mitigación de UHI. Las líneas de árboles y los techos verdes que se definen dentro del caso de estudio fueron eficientes para reducir las temperaturas del aire y radiantes y mejorar el rendimiento microclimático del sitio en el momento actual. La preferencia por las áreas o barrios residenciales se atribuye a su potencial por ser una referencia adecuada para responder al clima local después de la acumulación histórica a largo plazo, razón por la que merecen un estudio e implementación exhaustivos para el diseño urbano contemporáneo (Yin et al., 2019). Muchos investigadores han estudiado durante las últimas décadas los impactos de las formas construidas como el cañón de la calle y el patio en las características del microclima local para diferentes climas en el mundo (Xie et al., 2020).

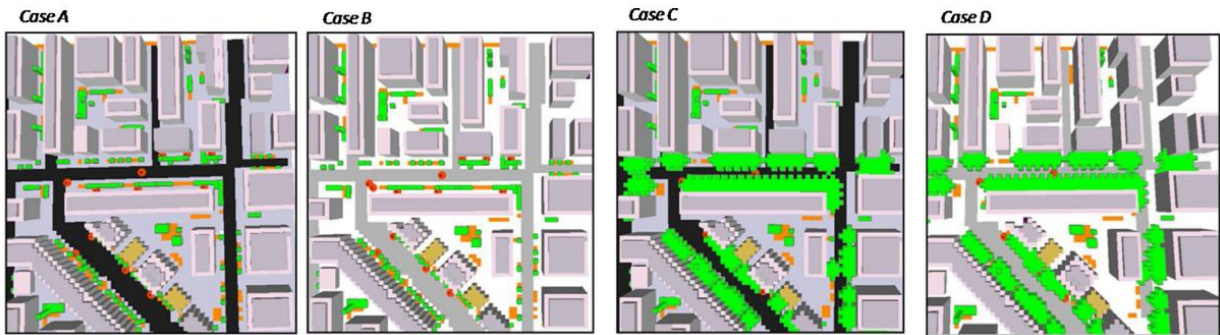
Figura 3.  
Modelo de ENVI-met para simulación



Nota. 2D modelo (a) BC y (b) AC [Figura], Fahmy et al. (2018).

Tsoka et al. (2017) desarrollaron un estudio en la ciudad de Thessaloniki, Grecia, en un distrito urbano. El presente estudio investigó el impacto térmico de tres métodos de enfriamiento, para ello, se aplicó el modelo de microclima en el programa informático ENVI-met y se realizaron cuatro simulaciones para un día típico de verano: Caso A: situación actual, Caso B: sustitución total de pavimentos de hormigón y calles asfaltadas con los correspondientes materiales fríos de alto albedo y emisividad, Caso C: aumento del número de árboles altos y densos dentro de los cañones principales, además del aumento del ancho de la corona y Caso D: combinación de las estrategias anteriores (Figura 4).

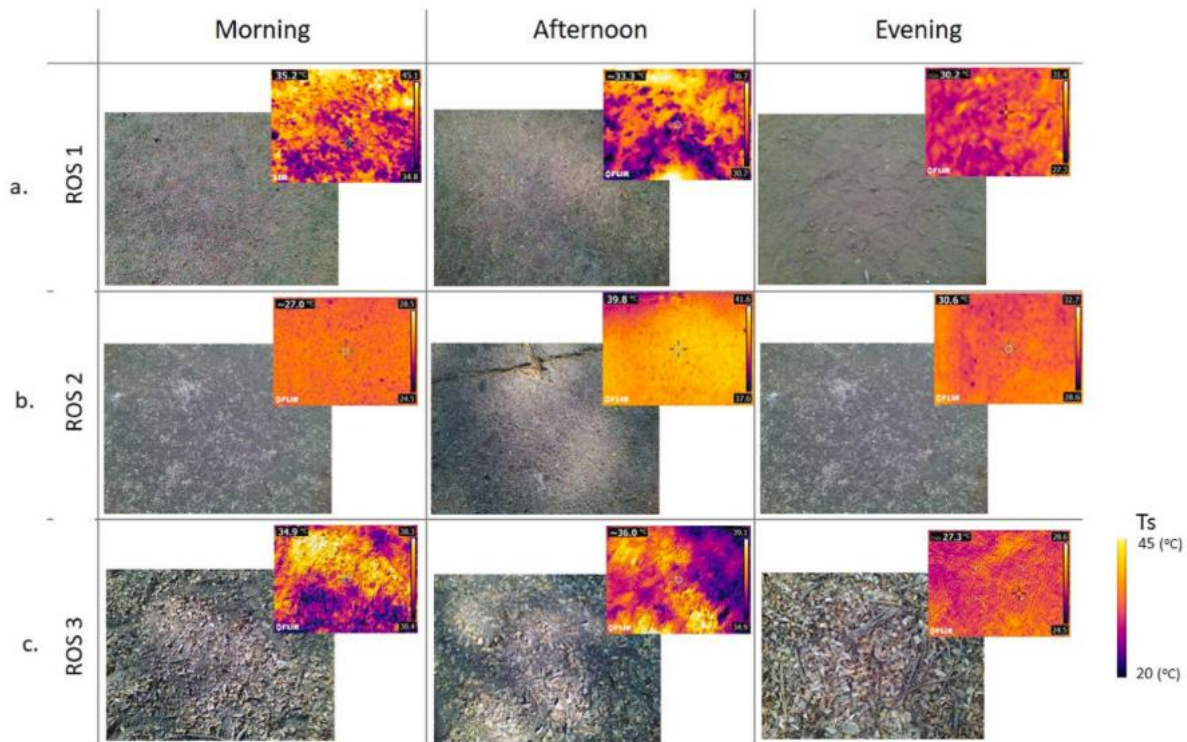
Figura 4.  
Modelos en ENVI-met de los casos de estudio



Nota. Vista 3D de los archivos de entrada de área de la situación actual y los diferentes escenarios de intervención: Caso A: condiciones actuales; Caso B: aplicación de materiales fríos; Caso C: vegetación adicional; Caso D: aplicación combinada de materiales fríos y árboles adicionales. [Figura], Tsoka et al. (2017).

Los resultados obtenidos indican que el aumento de la reflectancia solar del asfalto y de los pavimentos de hormigón en 0.28 y 0.4 respectivamente, puede conducir a importantes reducciones de temperatura de la superficie correspondientes que alcancen 9.0 °C y 10.5 °C durante el mediodía. Para todos los cañones, se encontró que la aplicación simultánea de materiales de alto albedo y la adición de árboles han llevado a cambios importantes en la temperatura de la superficie de los pavimentos y a mayores reducciones de temperatura del aire (en comparación con las reducciones logradas después de la aplicación única de revestimientos fríos o árboles adicionales). Mehrotra et al. (2021) realizaron un estudio en Mumbai, India, donde a través de ENVI-met se simulaban tres espacios abiertos de la ciudad donde los materiales de la superficie del terreno fueron tierra/barro, hormigón, adoquines y asfalto. El estudio muestra cómo las áreas edificadas con vegetación y un tratamiento superficial adecuado pueden regular el perfil térmico de los espacios abiertos, lo que a su vez reduce la formación de islas de calor urbano. La variación significativa en el rendimiento térmico se efectúa por la forma construida, tratamiento superficial y cobertura arbórea. La temperatura superficial más alta se observó por la tarde en una superficie de hormigón, sin sombreado (Figura 5).

Figura 5.  
Temperatura superficial de distintos recubrimientos durante la mañana, la tarde y la noche

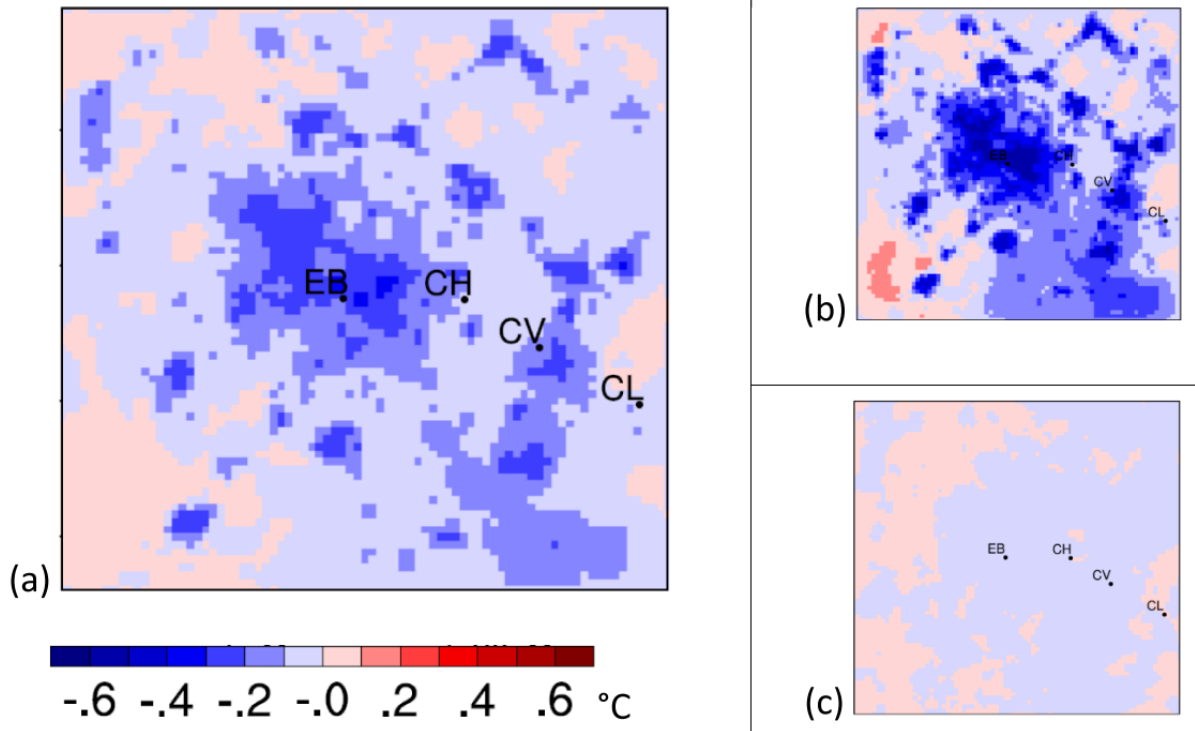


Nota. Imágenes FLIR de tres sitios que muestran la temperatura de la superficie con el variado tratamiento de superficie a) cubierta de barro, b) pavimento de hormigón de cemento y c) hojas, tomadas en tres momentos del día, es decir, en la mañana, en la tarde y en la noche. [Figura], Mehrotra et al. (2021).

En la investigación elaborada por Macintyre et al. (2019), en Ucrania, se evaluó el efecto potencial de los techos reflectantes fríos para reducir las temperaturas ambientales locales y el impacto posterior en la mortalidad relacionada con el calor. Los resultados mostraron que, durante una temporada de verano, la intensidad de UHI ponderada por la población (la diferencia entre la temperatura urbana y rural simulada) fue de 1.1 °C en promedio, pero de 1.8 °C cuando se incluyen solo las horas nocturnas. En el documento se describe como la UHI contribuye hasta el 40 % de la mortalidad relacionada con el calor durante el período de verano y que los techos fríos implementados en toda la ciudad podrían compensar potencialmente el 18 % de la mortalidad relacionada con el calor estacional asociada con la UHI (que corresponde al 7 % de la mortalidad total relacionada con el calor). El modelo que utilizaron sugiere que los techos fríos podrían reducir la temperatura del aire a 2 m durante el día en el centro de la ciudad en 0.5 °C en promedio, y hasta un máximo de 3.0 °C (Figura 6).

Figura 6.

Impacto de los techos fríos en términos de reducción. (a) Promedio para todo el período; (b) promedio diurno (08:00 h – 20:00 h); (c) promedio nocturno (20:00 h – 08:00 h).



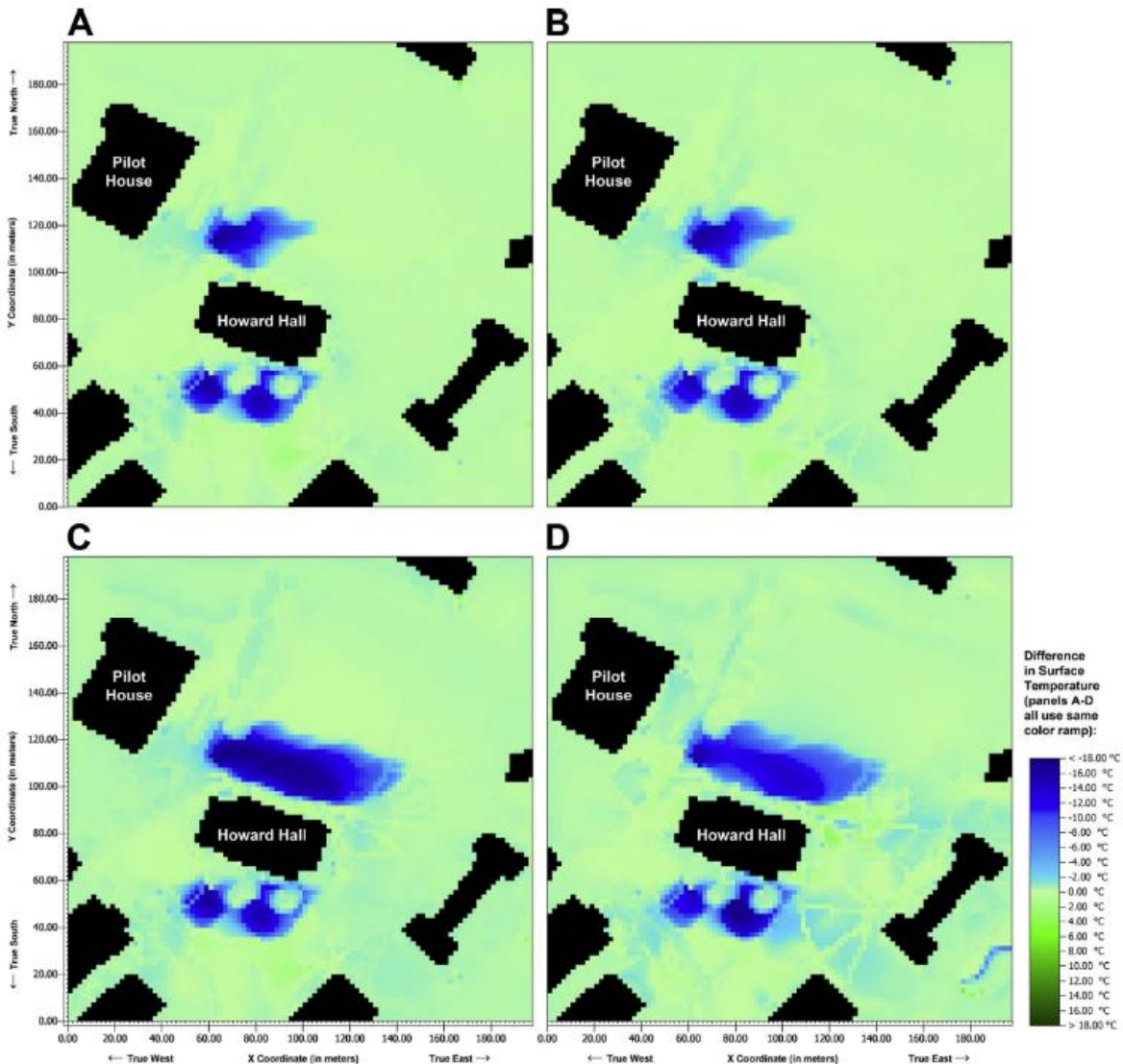
Nota. Impacto de los techos fríos en junio-julio-agosto de 2006 en términos de reducción de temperatura de 2 m. (a) Promedio de todo el período; (b) Promedio diurno (8:00-20:00); (c) Promedio nocturno (20:00-8:00). El centro de la ciudad en esta figura es de  $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  diurno,  $-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  nocturno). Las letras se refieren a las estaciones de observación. [Figura], Macintyre y Heaviside, (2019).

En la Universidad de Portland en Oregón (EE. UU.), se eliminaron cuatro árboles de sombreado (*Sequoiadendron giganteum*) del campus para un proyecto de construcción. La pérdida de estos árboles brindó una oportunidad para que Eckmann et al. (2018), midieran cómo estos árboles influyen en los microclimas con el objetivo de cuantificar su papel en la mitigación de los efectos de la UHI y, por lo tanto, promover la preservación de estos. El estudio aplicó un modelo de ENVI-met para aislar los efectos de las secuias en los microclimas y validó los resultados haciendo mediciones de campo antes y después de que la Universidad eliminara las cuatro secuias.

Los resultados muestran simulaciones de modelos de procesos metabólicos de las plantas y sus influencias en las temperaturas del aire, las temperaturas de la superficie, los vientos y las concentraciones de dióxido de carbono, con estadísticas de validación

que clasifican el rendimiento del modelo. Las aplicaciones incluyen nuevos métodos para ejecutar y validar modelos de microclima, lo que podría llevar a mejores decisiones sobre qué tipos de árboles plantar y dónde, y una mayor protección de los árboles, lo que puede reducir el efecto de la UHI y sus influencias perjudiciales en la demanda de energía, el confort y la salud humana (Figura 7).

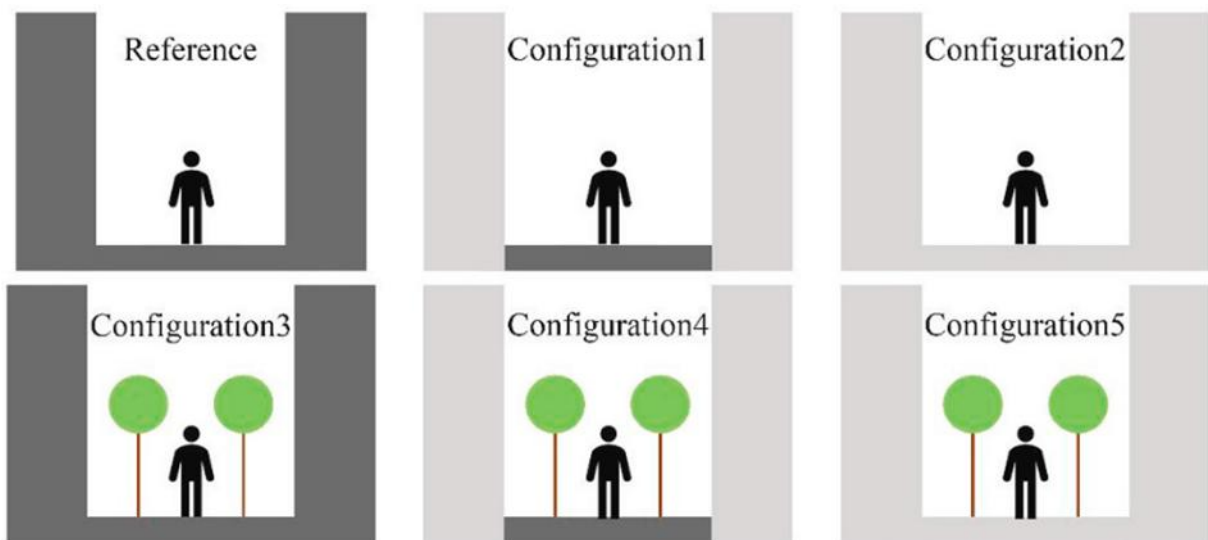
**Figura 7.**  
 Comparación de escenarios del efecto de las sequoias.



Nota. El efecto de las sequoias 1, 2, 7 y 8 sobre la temperatura superficial para el 6 de julio [vientos de entrada promedio de 2,1 m/s desde  $340^\circ$ ] (A); el efecto de las sequoias 1, 2, 7 y 8 para el 14 de julio [vientos de entrada promedio de 2,6 m/s desde  $330^\circ$ ] (B); el efecto de las sequoias 1 a 8 para el 6 de julio [vientos de entrada promedio de 2,1 m/s desde  $340^\circ$ ] (C); el efecto de las sequoias 1 a 8 para un día como el 6 de julio pero con vientos de entrada promedio de 3,6 m/s desde  $290^\circ$  (D), en todos los casos a las 16:00 hora local. [Figura], Eckmann et al., (2018).

Pigliatile et al. (2020), estudiaron diferentes configuraciones del mismo cañón urbano para evaluar la eficacia de los materiales fríos y los árboles para mejorar el confort térmico humano. Los resultados mostraron que las capas frías en el entorno construido del cañón conducen a una reducción de la temperatura del aire de hasta 1.92 K, pero empeoran ligeramente el confort humano en términos de una temperatura superficial calculada más cálida en 0.27 K. El efecto indirecto de los árboles, que excluyen el sombreado, es insignificante para el confort térmico humano (Figura 8).

Figura 8.  
Escenarios con distintas configuraciones de vegetación y materiales fríos en un cañón urbano

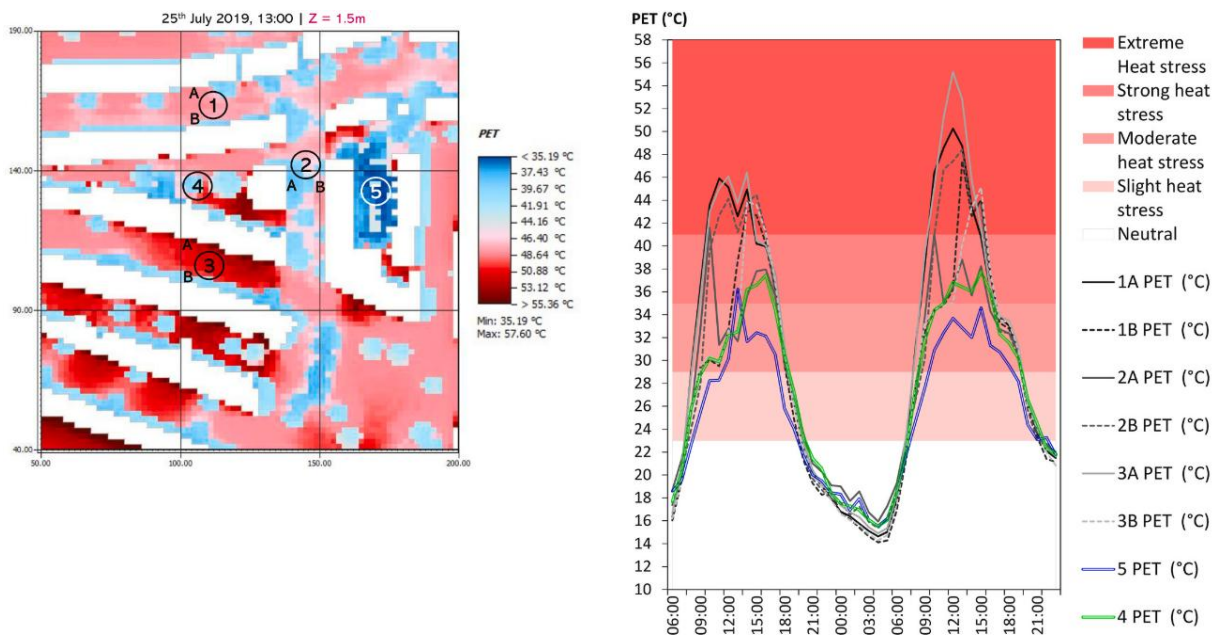


Nota. Esquema de las seis configuraciones analizadas, caracterizadas por diferentes albedos de las facetas urbanas y la presencia o ausencia de árboles. Nótese que nuestro peatón no está a la sombra, ya que se supone que no se encuentra directamente debajo de un árbol, a pesar de la representación bidimensional de la figura. [Figura], Pigliatile et al., (2020).

Salvati et al. (2022), llevaron a cabo mediciones de campo en cañones urbanos de una típica área residencial en Londres. Las mediciones se utilizaron para evaluar la precisión de las salidas de radiación del algoritmo de ENVI met "Radiación de onda corta reflejada en el hemisferio inferior" (IVS) (versión 4.4.6), con el fin de obtener un modelo de referencia validado. A partir de la línea de base, se simuló diferentes escenarios con distribución variable de la reflectancia de los materiales de la carretera y las fachadas utilizando el software. Los resultados se utilizaron para estudiar el impacto del albedo en el microclima a nivel de calle y el confort térmico. En este caso de estudio, la eficacia de esta estrategia que consiste en aumentar el albedo del cañón urbano y reducir la temperatura del aire urbano se reduce drásticamente en los

cañones más profundos, donde, en cambio, la reflectividad de la fachada tiene más potencial para aumentar el albedo del cañón urbano. Los resultados mostraron que aumentar la reflectancia solar de las carreteras tiene el mayor potencial, que aumentar el albedo del cañón urbano en el cañón típico y que ninguno de los escenarios de reflectividad analizados tenía el mismo potencial de mitigación que las zonas con vegetación y árboles, donde el confort térmico es mejor en días extremadamente calurosos (Figura 9).

**Figura 9.**  
**Cálculo del confort térmico (PET) en cañones urbanos de un área residencial**



Nota. Variabilidad diaria de UCA para diferentes condiciones de cielo y escenario reflectante en dos geometrías de cañón con relación de aspecto de 0,75 (izquierda) y 1,5 (derecha). [Figura], Salvati et al., (2022).

En la literatura internacional se han documentado diversas estrategias para mitigar la isla de calor urbana, con resultados variables según la región y el tipo de clima. En ciudades de clima mediterráneo, como Tesalónica (Grecia) y Bolzano (Italia), se ha comprobado que la combinación de vegetación y pavimentos de alto albedo puede reducir la temperatura del aire entre 2 °C y 4 °C, destacando la importancia de integrar ambas medidas de manera simultánea (Tsoka et al., 2017; Speak et al., 2020). En contextos de clima tropical húmedo, como Singapur y Mumbai, la vegetación densa muestra un mayor potencial de enfriamiento que los materiales reflectantes, debido al

efecto adicional de la evapotranspiración, alcanzando reducciones de más de 10 °C en temperatura superficial (Tan et al., 2021; Mehrotra et al., 2021). Por su parte, en ciudades de clima continental o árido, como El Cairo o Ucrania, los techos y pavimentos fríos han demostrado mayor eficacia, con disminuciones promedio de 1 a 3 °C en la temperatura del aire, y con máximos de hasta 9 °C en superficie (Macintyre & Heaviside, 2019).

La Tabla 1 sintetiza los principales estudios citados, agrupando los hallazgos según clima, metodología y estrategias evaluadas. Los antecedentes muestran que tanto la vegetación como los materiales de alto albedo tienen efectos comprobados en la reducción de la UHI, aunque su desempeño varía según el contexto climático y urbano.

*Tabla 1.  
Hallazgos de estudios y estrategias evaluadas*

<b>Autor (año)</b>	<b>Ciudad / Clima</b>	<b>Método</b>	<b>Estrategia</b>	<b>Resultados</b>
Tsoka et al. (2017)	Tesalónica, Grecia / Mediterráneo	ENVI-met	Albedo y árboles	Reducción Tair 2–4 °C
Speak et al. (2020)	Bolzano, Italia / Mediterráneo	Medición en campo	Árboles con sombra	Reducción Tair hasta 2.5 °C
Tan et al. (2021)	Singapur / Tropical	Medición en campo	Vegetación y superficies	Reducción de temperatura superficial en ~11 °C
Mehrotra et al. (2021)	Mumbai / Tropical húmedo	ENVI-met	Diferentes superficies	Mayor enfriamiento con vegetación densa
Macintyre & Heaviside (2019)	Ucrania / Continental	ENVI-met	Techos fríos	Reducción UHI promedio 1.1 °C; máx. 3 °C
Eckmann et al. (2018)	Oregón, EE.UU. / Templado	ENVI-met	Pérdida de árboles	Incremento local de Tair° tras tala

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

---

## 2.1. Marco Teórico

De acuerdo con Daros (2002), en esta sección del documento se busca: (a) teóricamente, la búsqueda de la verdad, entender el fenómeno; (b) tecnológicamente, ser eficiente y producir material original. En la presente sección fueron revisadas distintas las consideraciones teóricas en las que se sustenta el proyecto de investigación, como se muestra en la Figura 10. Este apartado permite profundizar en los conceptos relevantes sobre la problemática, que gira en torno al fenómeno de la UHI y las estrategias de mitigación del calor urbano. Fueron 6 temáticas principales las que fueron analizadas: 1) El origen de la isla de calor urbana, 2) Efectos producidos por el microclima urbano, 3) Confort térmicos en los espacios urbanos, 4) Estrategias de mitigación de la UHI, 5) Enfriamiento por medio de vegetación y 6) Enfriamiento por medio de superficies con alto albedo.

Figura 10.  
Consideraciones teóricas retomadas en la investigación.



La Tabla 2 integra los principales ejes temáticos vinculados al fenómeno de la isla de calor urbana, organizados en torno a cuatro dimensiones fundamentales: la urbanización y su impacto en el microclima, el efecto del albedo en la acumulación de calor, la relevancia de la vegetación en los procesos de evapotranspiración y el confort térmico como indicador del bienestar ciudadano. Cada uno de estos aspectos se articula con problemas específicos, conceptos centrales y teorías que explican su dinámica, además de normas técnicas y ambientales que orientan su análisis y aplicación práctica. De esta manera, el cuadro sintetiza cómo factores físicos, materiales y ambientales se relacionan con los procesos urbanos, al tiempo que establece un marco de referencia normativo y científico que sustenta la necesidad de implementar estrategias de mitigación y adaptación orientadas a mejorar la habitabilidad de las ciudades.

*Tabla 2.*  
*Tabla-resumen del marco teórico de la investigación*

<b>Tema</b>	<b>Problema</b>	<b>Conceptos</b>	<b>Teorías</b>	<b>Normas</b>
Isla de calor urbana	Este fenómeno implica un impacto significativo en el confort al aire libre en las zonas urbanas, empeorando el bienestar de los ciudadanos, especialmente durante el verano (Rosso et al., 2019)	Urbanización, Microclima.	a) Origen de la isla de calor urbana (Howard, 1820) b) Estrategias de mitigación del calor (Nuruzzaman, 2015) c) Zonas climáticas locales (LCZ) (Stewart & Oke, 2012)	Cool Policies for Cool Cities: Best Practices for Mitigating Urban Heat Islands in North American Cities Virginia (Hewitt, Mackres, & Shickman, 2014)
Albedo	Las áreas urbanas son abundantes en materiales que poseen su albedo más bajo, típicamente en el rango de 0.1 a 0.2. Significa que se refleja menos radiación entrante y da como resultado una elevación del calor sensible en las ciudades (Speak et al., 2020).	Capacidad calorífica, Radiación.	a) El uso de materiales de alto albedo reduce la cantidad de radiación solar absorbida (Taha, 1997). b) Las ciudades pueden mitigar las islas de calor aumentando el albedo de los materiales para pavimentación (Taha, 1997).	ASTM E1918 ASTM C1549 ASTM E1980-01
Continúa				

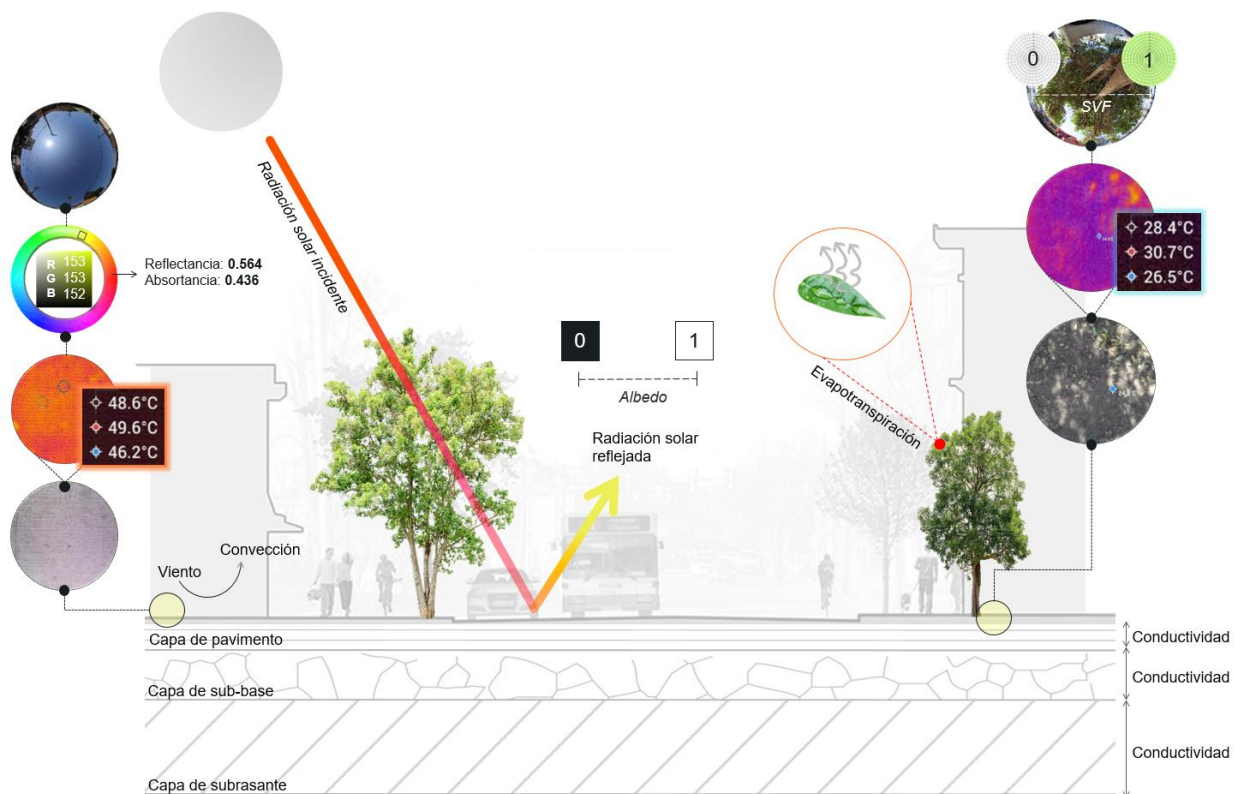
Tema	Problema	Conceptos	Teorías	Normas
Vegetación	La pérdida de vegetación reduce el albedo, disminuyendo la reflexión de la radiación de onda corta y, lo que es más importante, reduce la evapotranspiración, disminuyendo el enfriamiento debido a la transferencia de calor latente (Armson et al., 2012).	Evapotranspiración, Índice del área foliar.	a) La sombra que proporciona la plantación de árboles es una medida de adaptación para garantizar la habitabilidad de las ciudades (Speak et al., 2020).  c) Entre las propiedades físicas involucradas, se ha visto que el índice de área foliar tiene el mayor efecto sobre el confort térmico (Hami et al., 2019).	NOM-059-ECOL-2001, Ley General de Asentamientos Humanos, Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.
Confort térmico	La mortalidad y la morbilidad relacionada con el estrés por calor (Park et al., 2014). El confort térmico es un proceso intensivo en energía que representa hasta el 60-70 % del consumo total de energía (Manzano-Agugliaro et al., 2015)	Estrés, Condición de diseño al aire libre, Temperatura media radiante	a) El intercambio de radiación con el entorno circundante influye en el confort térmico percibido por una persona (Speak et al., 2020).  La radiación juega el papel más importante en el confort térmico (Taleghani, 2018)	ANSI/ASHRAE Standard 55-2017, ISO 7730

### 2.1.1. Origen de la Isla de Calor Urbana (UHI)

La urbanización ha cambiado significativamente la superficie de la tierra de entornos naturales y seminaturales a entornos urbanos impermeables, lo que ha llevado a temperaturas más altas en las áreas urbanas en comparación con las áreas rurales circundantes, lo que resulta en el conocido fenómeno de isla de calor urbano (UHI) (Yu et al., 2021). En la Figura 11, se aprecia la diferencia de temperatura que se relacionan con la configuración y construcción de las ciudades, al utilizar materiales como el concreto en las superficies, la escasez de áreas verdes y pocos cuerpos de agua, que favorecen que la radiación solar se disperse lentamente. Los materiales que se usan en las construcciones urbanas, son generalmente oscuros, lo que les permite absorber más energía, la cual se dispersa de manera lenta en forma de calor (García, 2018).

Según Nuruzzaman (2015), las causas de la isla de calor urbana son: 1) La baja cantidad de evapotranspiración debido a la menor cantidad de vegetación, 2) absorción de la radiación solar por bajo albedo, 3) obstáculo al flujo de aire debido a una mayor rugosidad, 4) gran cantidad de liberación de calor antropogénico. Es decir, este fenómeno se debe a las modificaciones antropogénicas del balance energético y de radiación superficial que acompañan al desarrollo urbano (Badaro-Saliba et al., 2021).

Figura 11.  
Balance energético en superficies urbanas



### 2.1.1.1. Posicionamiento histórico de la UHI

Desde hace más de doscientos años, se tiene conocimiento de un fenómeno propio de las ciudades: las islas de calor (García, 2018). Luke Howard (1833) fue el primero en proporcionar evidencia de que las temperaturas del aire suelen ser más altas en una ciudad que en el campo circundante. Mientras tanto, este hecho se ha demostrado sin lugar a dudas y las características de este efecto de UHI se han documentado en muchas aldeas, pueblos y ciudades (Oke, 1982). Según Oke (1973), hace casi medio

siglo, fue “uno de los efectos climáticos más ampliamente documentados de la modificación del ambiente atmosférico por parte del hombre”. Akbari et al. (2001) realizaron un análisis de las tendencias de temperatura durante 100 años en varias grandes ciudades de E.U.A. Indican que, desde 1940, las temperaturas en las áreas urbanas aumentaron alrededor de 0.5–3.08 °C.













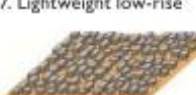




Peng et al. (2022) mencionan que la UHI se puede investigar en dos capas diferentes: isla de calor urbana de dosel (CUHI, por sus siglas en inglés) e isla de calor urbana de superficie (SUHI, por sus siglas en inglés). CUHI se investiga principalmente utilizando la temperatura del aire (AT) de las observaciones meteorológicas locales o mediciones in situ, mientras que SUHI se investiga principalmente utilizando la temperatura de la superficie terrestre (LST, por sus siglas en inglés).

#### *2.1.1.2. Zonas climáticas locales (LZC)*

La isla de calor urbana se ve afectada por factores naturales (tiempo sinóptico, clima, hora del día, período del año, topografía) y factores de forma y función de la ciudad (tamaño de la ciudad, morfología urbana, cobertura del suelo, flujos de calor antropogénicos) (Oke, 1982).

Stewart y Oke (2012) propusieron el esquema de zonas climáticas locales (LCZ, por sus siglas en inglés) para distinguir la respuesta térmica dentro de diferentes paisajes y sistemas urbanos. Definen las zonas climáticas locales como regiones de cobertura superficial, estructura, material y actividad humana uniformes que se extienden desde cientos de metros hasta varios kilómetros en escala horizontal (Figura 12). Cada LCZ tiene un régimen de temperatura característico a la altura de la pantalla que es más evidente sobre superficies secas, en noches tranquilas y despejadas y en áreas de relieve simple (Badaro-Saliba et al., 2021).

Figura 12.  
Zonas climáticas locales

Built types	Definition	Land cover types	Definition
 <p>1. Compact high-rise</p>	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>A. Dense trees</p>	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>2. Compact midrise</p>	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>B. Scattered trees</p>	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>3. Compact low-rise</p>	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>C. Bush, scrub</p>	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
 <p>4. Open high-rise</p>	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>D. Low plants</p>	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
 <p>5. Open midrise</p>	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>E. Bare rock or paved</p>	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
 <p>6. Open low-rise</p>	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	 <p>F. Bare soil or sand</p>	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
 <p>7. Lightweight low-rise</p>	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	 <p>G. Water</p>	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
 <p>8. Large low-rise</p>	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	<b>VARIABLE LAND COVER PROPERTIES</b>	
 <p>9. Sparsely built</p>	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	<p>b. bare trees</p>	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
 <p>10. Heavy industry</p>	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	<p>s. snow cover</p>	Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
		<p>d. dry ground</p>	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		<p>w. wet ground</p>	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

Nota. Definiciones abreviadas de las zonas climáticas locales. Las ZCL 1 a 9 corresponden a las zonas climáticas urbanas de Oke (2004). [Tabla], Stewart & Oke, (2012).

Originalmente, el esquema de clasificación LCZ se diseñó para cuantificar las UHI y abarca 17 clases, de las cuales 10 clases fueron los tipos construidos y siete clases se incluyeron en los tipos de cobertura del suelo, respectivamente. Hay una serie de métodos utilizados para clasificar las LCZ, como la medición en sitio; Métodos basados en imágenes de teledetección (RS, por sus siglas en inglés) y métodos orientados a Sistema de información geográfica (SIG), respectivamente (Choudhury et al., 2021).

### 2.1.1.3. Geometría urbana

Los espacios abiertos urbanos se caracterizan por diversas geometrías. El efecto principal de la geometría urbana en el entorno térmico urbano es modificar el intercambio de calor radiativo y convectivo dentro de los espacios abiertos urbanos (Lai et al., 2019). La configuración geométrica tridimensional (3D) juega un papel importante en la gestión del calor de radiación de onda larga y el entorno del viento. La radiación de onda larga saliente depende del diseño urbano, debido al hecho de que solo una pequeña parte del cielo se ve desde la superficie del suelo causada por calles estrechas y edificios altos que crean profundos cañones (Wang et al., 2016). Así, la  $T_{mrt}$  (Temperatura media radiante) es muy sensible al entorno urbano y la elección del diseño urbano impacta significativamente en esta variable que es la más importante para evaluar la sensación térmica en exteriores independientemente del índice de confort utilizado (Ouali et al., 2020).

La geometría urbana es un factor de los patrones de diseño, que puede afectar de manera negativa las condiciones microclimáticas. Está conformada por:

*a) Orientación de la calle:* es un parámetro que determina el acceso solar y la velocidad del viento en cañones urbanos. Por lo tanto es significativo en cuanto al nivel de confort térmico en aceras.

*b) Forma urbana:* se divide en micro escala (forma y tipo general de la ciudad) y macro escala (características a nivel distrito o barrio). Según Erell, el diseño de entornos urbanos con conciencia climática y la aplicación adecuada de los componentes bioclimáticos en las etapas de planificación, son factores determinantes para disminuir el desarrollo no sostenible de las formas micro urbanas (Erell, 2008).

#### *2.1.1.4. Ecología Urbana*

Las decisiones humanas sobre cómo gestionar la extensión, la composición y los patrones espaciales de las cubiertas de suelo urbano ayudan a dar forma a la estructura y función emergente de los ecosistemas urbanizados (Byrne et al., 2008). Las ciudades se consideran entornos hostiles para la vegetación debido al alto nivel de superficies impermeables, el nivel reducido de humedad del suelo, la falta de nutrientes, volumen de raíces, y la presencia de contaminantes del aire / agua (Jamei et al., 2016). Sin embargo, los espacios verdes urbanos proporcionan áreas dentro el entorno construido donde tales procesos puede tener lugar. Estos servicios ecosistémicos proporcionados por el espacio verde urbano a menudo se pasan por alto y son infravalorados (Gill et al., 2007).

Según Nuruzzaman (2015), la vegetación contribuye a reducir la UHI mediante su evapotranspiración y la absorción de CO<sub>2</sub>. Si se trata de árboles de sombra, además pueden proporcionar protección a las casas y peatones de la luz solar directa manteniéndolos relativamente frescos. Santamouris et al. (2018), mencionan que, acompañada una baja resistencia estomática con un alto albedo del follaje, la vegetación puede proporcionar el mejor rendimiento en términos de protección contra la radiación solar. Akbari et al. (2001) establecen que el costo y mantenimiento de un árbol de sombreado puede oscilar entre \$10 y \$500 dls, mientras que los ahorros asociados con los beneficios pueden ser de hasta \$200 dls en toda su vida.

### **2.1.2. Efectos producidos por el microclima en el entorno urbano**

#### *2.1.2.1. Energía en los espacios urbanos*

Los residentes de zonas urbanas sufren significativamente los efectos del sobrecalentamiento. Los edificios utilizan más sistemas de refrigeración para compensar, lo que aumenta la demanda de energía y los niveles de contaminación urbana (Ghenai et al., 2023). La temperatura de la superficie terrestre (LST) y el gasto de energía de los hogares son dos fenómenos de importancia social crítica (Mashhoodi, 2020). El confort térmico exterior de los humanos se trata principalmente de termofisiología y balance de energía térmica exterior. Además, el estrés por calor puede conducir al consumo excesivo de energía de los edificios. Debido a que los

edificios con aire acondicionado en el entorno construido también se ven afectados por los microclimas exteriores, así que construir un entorno exterior más eficiente puede reducir efectivamente el consumo de energía interior (Ma et al., 2019). Es necesario entender las condiciones específicas de la geometría urbana, microclima y la vulnerabilidad social para evaluar los impactos del UHI en la economía y la salud de su población (Litardo et al., 2020).

#### *2.1.2.2. Calidad ambiental de la ciudad*

Las ciudades se transforman por ocupaciones naturales y artificiales, en un constante proceso de reconfiguración espacial. Desde el decenio de 1950, las ciudades han experimentado un crecimiento significativo y una mayor densidad de población debido a factores como las oportunidades de empleo y la mejora de las condiciones de vida (Barros et al., 2023). Se han creado diferentes formas urbanas en las ciudades, y cada una de estas formas tiene diferentes efectos en el microclima del sitio (Hami et al., 2019). La calidad ambiental de los espacios urbanos puede tener efectos positivos o negativos en la calidad de vida y la salud física de los humanos que residen en ellos (Perini et al., 2018).

Las modificaciones en la temperatura de la superficie global observadas durante 1900-2020 y previstas para 2021-2100, se relaciona con modificaciones en las condiciones e impactos del clima. El clima ya ha cambiado y cambiará a lo largo de la vida de tres generaciones representativas (nacidos en 1950, 1980 y 2020) (IPCC, 2023).

#### **2.1.3. Confort térmico en los espacios urbanos**

Entre otras cosas, UHI conduce a consecuencias negativas sobre el bienestar humano, una de las cuales es el malestar térmico. El confort térmico humano al aire libre en las ciudades no solo depende de la temperatura del aire, sino también del efecto combinado de la temperatura del aire, la velocidad del viento, la humedad del aire y la radiación (Gatto et al., 2021). La evaluación del confort térmico en espacios urbanos requiere índices que integran variables climáticas y fisiológicas. Entre los más destacados en la literatura se encuentran el PET (Temperatura Fisiológicamente Equivalente), el PMV (Voto Medio Predicho) y el UTCI (Índice Universal del Clima

Térmico), cada uno con enfoques metodológicos y aplicaciones específicas. La Tabla 3 compara estas herramientas, destacando sus ventajas y limitaciones.

Tabla 3. Ventajas y limitaciones de distintos índices de confort térmico

<b>Índice</b>	<b>Variables</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>	<b>Aplicación</b>
<b>PET</b> ( <i>Temperatura Fisiológicamente Equivalente</i> )	Actividad metabólica, Temperatura del aire (°C), Temperatura media radiante (°C), Humedad Relativa (%), Velocidad del viento (m/s).	Escala en °C (fácil interpretación). Evalúa estrés térmico integral.	No considera ráfagas de viento extremas. Requiere datos detallados de radiación.	Estudios de percepción térmica en espacios abiertos (plazas, calles).
<b>PMV</b> ( <i>Voto Medio Predicho</i> )	Ropa (Clo), Actividad metabólica, Temperatura del aire (°C), Humedad Relativa (%), Velocidad del viento (m/s).	Validado internacionalmente (ISO 7730). Preciso en interiores.	Poco adaptable a condiciones exteriores variables (ej.: radiación solar directa).	Edificios y zonas semi-cubiertas (atrios, corredores).
<b>UTCI</b> ( <i>Índice Universal del Clima Térmico</i> )	Temperatura del aire (°C), Temperatura media radiante (°C), Humedad Relativa (%), Velocidad del viento (m/s), Adaptación fisiológica humana.	Evalúa estrés térmico en salud pública. Incluye efectos fisiológicos complejos.	Complejidad de cálculo. Su precisión disminuye si se usan datos interpolados o de estaciones lejanas.	Políticas urbanas, olas de calor, estudios epidemiológicos.

Nota. Adaptado de Matzarakis y Fröhlich (2018), ANSI/ASHRAE (2017), y Bröde et al. (2012).

### 2.1.3.1. Temperatura Fisiológicamente Efectiva (PET)

El índice PET se presentó en 1999 como un punto de referencia mundial para la evaluación del estrés térmico. Podría considerarse como la temperatura ambiente en la que el cuerpo humano experimenta un grado de estrés térmico igual al experimentado al aire libre (Sharafkhani et al., 2018). Está basado en las sensaciones de confort o incomfortabilidad producidas en las personas (Alamán, 1968), y se obtiene

a partir de los datos diarios de la temperatura máxima y mínima, de la humedad, del viento, de la insolación y de la nubosidad, permitiendo obtener una imagen de las variaciones espaciales de la sensación térmica en la región. Se trata de uno de los índices térmicos más usados en la actualidad (Royé et al., 2011). Es preferible a otros índices térmicos debido a su unidad ( $^{\circ}\text{C}$ ), que hace que los resultados sean más comprensibles para los urbanistas no tan familiarizados con la terminología biometeorológica humana moderna (Teshnehdel et al., 2020).

Matzarakisa & Fröhlich (2018), describen en su estudio los rangos de PET para diferentes grados de percepción térmica por parte del ser humano y estrés fisiológico, producción de calor interno: 80 W, resistencia a la transferencia de calor de la ropa: 0.9 clo. Mencionan que los parámetros de entrada meteorológicos deben medirse o transferirse a la altura promedio del centro de gravedad de una persona de pie de 1.10 m sobre el nivel del suelo (Tabla 4).

*Tabla 4.*  
*Rangos de Temperatura Fisiológicamente Equivalente (PET)*

PET	Percepción térmica	Grado de estrés psicológico
4 ° C	Muy Frío	Estrés extremo por frío
8 ° C	Frío	Estrés fuerte por frío
13 ° C	Fresco	Estrés moderado por frío
18 ° C	Levemente fresco	Estrés ligero por frío
23 ° C	Confortable	No hay estrés térmico
29 ° C	Levemente cálido	Estrés ligero por calor
35 ° C	Cálido	Estrés moderado por calor
41 ° C	Caliente	Estrés fuerte por calor
	Muy caliente	Estrés extremo por calor

Nota. Traducción de "Influence of urban green on human thermal bioclimate - Application of thermal indices and micro-scale models" por Matzarakisa & Fröhlich, (2018), Acta Horticulturae, 1215 (1–9).

### 2.1.3.2. Voto Medio Predicho (PMV)

El modelo PMV es una de las medidas más utilizadas para evaluar las condiciones de confort térmico en edificios, que fue introducido por Fanger a fines de la década de 1960 (Omidvar et al., 2020), desarrollada originalmente, a través de experimentos llevados a cabo en un clima controlado, para predecir el confort térmico interior. La formulación PMV fue luego modificada por Jendritzky y Nübler (1981) para ser aplicada para la evaluación del confort térmico exterior, agregando la radiación exterior compleja (Rui et al., 2019). El PMV determina el nivel de tensión térmica y le asigna un valor de confort en función de la transferencia de calor en equilibrio entre el cuerpo humano y el entorno. Su cálculo considera seis variables: el metabolismo, el aislamiento proporcionado por la vestimenta, la temperatura del aire interior, la temperatura radiante media, así como la velocidad y la humedad del aire en el interior. Es un índice que predice el valor medio de los votos de sensación térmica de un grupo de personas en una escala de sensación expresada de -3 a +3 (Figura 13), correspondiendo cada valor a una categoría (Chávez et al., 2002).

*Figura 13.*  
*Escala de sensación térmica del índice PMV*

+3	Caliente
+2	Cálido
+1	Ligeramente cálido
0	Neutral
-1	Ligeramente fresco
-2	Fresco
-3	Frío

Nota. Traducción de "ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy" por ANSI/ASHRAE (2017), ASHRAE Inc., 66.

### 2.1.3.3. Índice Universal del Clima Térmico (UTCI)

En 2011, la Sociedad Internacional de Biometeorología (ISB, por sus siglas en inglés) anunció un nuevo índice para ambientes térmicos al aire libre llamado Índice de Clima

Térmico Universal. Fue desarrollado bajo la ISB Comisión 6 por la Cooperación Europea en Ciencia y Tecnología (COST, por sus siglas en inglés), acción 730 bajo el programa de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) (Comisión de Climatología) (Park et al., 2014). El índice propone un sistema en el que es necesario garantizar una representación precisa de la respuesta del cuerpo humano de un individuo no aclimatado frente a diversas condiciones climáticas. En el caso de los espacios exteriores, dichas condiciones pueden variar considerablemente, abarcando situaciones de calor o frío extremos, vientos intensos, niveles de humedad muy altos o bajos, e incluso una radiación solar excesiva, entre otros factores (Tumini, 2012).

Wu et al. (2016), describen en su estudio la escala de evaluación UTCI (Tabla 5) proporcionada por la Comisión de Fisiología Térmica de la Unión Internacional de Ciencias Fisiológicas.

*Tabla 5.  
Rango UTCI y nivel de estrés térmico correspondiente.*

Rango de UTCI (° C)	Categoría de estrés	Medidas de protección
+9 a +26	No estrés térmico	La termorregulación fisiológica es suficiente para mantener el confort térmico.
+26 a +32	Moderado estrés por calor	Es necesario beber > 0,35 L / h de líquidos.
+32 a +38	Fuerte estrés por calor	Es necesario beber > 0,35 L / h de líquidos. Se recomienda permanecer en lugares sombreados. Periódicamente, se recomienda una reducción de la actividad física.
+38 a +46	Muy fuerte estrés por calor	Periódicamente es necesario el uso temporal de habitaciones con aire acondicionado o permanecer o permanecer en lugares con sombra. Es necesario beber > 0,5 L / h. Reducir la actividad física
>46	Extremo estrés por calor	El enfriamiento corporal temporal es necesario periódicamente. Es necesario beber > 0,5 L / h. Evite la actividad física

Nota. Traducción de "The impact of greenspace on thermal comfort in a residential quarter of Beijing, China" por Wu et al., (2016), International Journal of Environmental Research and Public Health, 13 (12).

#### 2.1.3.4. Métodos de estudio de microclimas

##### a) Monitoreo (estudio en campo)

Lai et al. (2019) realizaron una revisión sobre las estrategias de mitigación para mejorar el entorno y el confort térmicos en los espacios exteriores urbanos. Para la

medición de campo, esta revisión define cuatro reglas de detección haciendo referencia a los criterios de evaluación científica establecidos por Stewart (2011): a) Medición de las variables del ambiente térmico debajo del nivel del techo en sitios contrastantes; b) Documentación clara del número, la ubicación y la medida variables; c) Descripción suficiente del sitio mediante un mapa del sitio, bosquejo o fotografías; d) Demostración de esfuerzo para controlar los efectos de confusión como el clima, el entorno local o el tiempo.

En los últimos años, el desarrollo de software de simulación ha llevado a un rápido crecimiento en el número de estudios basados en simulación en combinación con el trabajo de campo (Nasrollahi et al., 2020), para validar la precisión de los resultados de la simulación numérica (Zhao et al., 2018).

#### b) Simulación (Software)

En las últimas décadas, las herramientas de simulación para entornos exteriores han revolucionado el desarrollo de estos estudios. Estos programas de simulación evalúan el entorno térmico exterior utilizando varios índices (Nasrollahi et al., 2020). Especialmente las simulaciones con la dinámica de fluidos computacional (CFD) se utilizan con frecuencia para evaluar el microclima urbano. CFD puede recrear procesos de transferencia de calor y su interacción con obstáculos individuales como los edificios (Toparlar et al., 2017).

La investigación se centra principalmente en la simulación de la expansión urbana futura y los efectos ecológicos de tal expansión, ya que, la urbanización afecta el uso de la tierra en todo el mundo y crea grandes desafíos para los planificadores y los encargados de formular políticas a la hora de hacer las ciudades más sostenibles (Rimal et al., 2018). En los años posteriores, de que se hiciera evidente la importancia de usar datos de microclima como condición de límite de construcción en simulaciones de energía, se usa generalmente ENVI-met (Arapakis, 2019).

El software ENVI-met para la simulación de escenarios, fue creado por Michael Bruse en la Universidad Ruhr de Bochum. El lanzamiento oficial del primer modelo data de 1998 (Tsoka et al., 2017). ENVI-met es un software de simulación microclimática basado en CFD (Arapakis, 2019), que es apto para simular interacciones a microescala

entre superficies urbanas, vegetación y atmósfera (Bruse & Flear, 1998). Los datos de configuración constituyen parámetros de entrada que definen las condiciones de borde en la simulación, e incluyen aspectos como los parámetros meteorológicos, los relacionados con el modelo geométrico y aquellos vinculados al diseño. Estos parámetros sirven para generar módulos (construcción, vegetación y del suelo), que posteriormente proporcionan información de una evaluación analítica (Tabla 6).

*Tabla 6.*  
*Datos utilizados en ENVI-met*

<b>Parámetros de entrada</b>	<b>Modelo de cálculo</b>	<b>Resultados de salida</b>
Parámetros meteorológicos	Módulo de Vegetación	Parámetros básicos del entorno
Parámetros del modelo geométrico	Módulo de suelo	Índice de evaluación
Parámetros de diseño	Módulo de construcción	Proceso Visual Conclusión de la evaluación analítica

Nota. Traducción de "Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data" por Salata et al.,(2016), Sustainable Cities and Society, 26 (318–343).

#### **2.1.4. Estrategias de mitigación de la UHI**

Las opciones de adaptación que hoy son factibles y efectivas se verán limitadas y perderán eficacia con el aumento continuo del calentamiento global. La viabilidad y el éxito de estas medidas aumentan significativamente mediante la implementación de soluciones integradas y multisectoriales, las cuales permiten diferenciar las respuestas en función de la exposición y la vulnerabilidad específica de cada territorio al riesgo climático (IPCC, 2023). Para identificar estrategias de mitigación robustas contra la Isla de Calor Urbana (UHI), una línea de investigación consolidada ha establecido correlaciones cuantitativas entre la temperatura del aire y diversas características morfológicas urbanas. Parámetros como la fracción de superficie impermeable, la densidad de construcción y la relación de aspecto del cañón de la calle (H/W) han demostrado ser predictores clave de la intensidad de la UHI, ya que regulan el balance de radiación y el almacenamiento de calor en el entorno construido (Oke, 1982; Li et al., 2019).

Estos hallazgos han arrojado un conjunto de medidas de mitigación específicas para aliviar el estrés térmico en los puntos críticos identificados. Entre las más estudiadas

se encuentran el uso de materiales de alto albedo en pavimentos y cubiertas, la implementación de envolventes de edificios frescos y la instalación de techos verdes, cuya eficacia ha sido ampliamente validada mediante estudios numéricos y de simulación (Zhou et al., 2024). El enfriamiento por vegetación, o evapotranspiración, actúa como un aire acondicionado natural al consumir energía latente, mientras que las superficies de alto albedo reflejan la radiación solar, reduciendo directamente la ganancia de calor por almacenamiento. La efectividad de estas estrategias aplicadas de forma aislada puede ser limitada, por ello, la combinación de infraestructura verde (proporciona enfriamiento evaporativo y sombreado) con superficies de alto albedo (minimizan la absorción de radiación), ha demostrado un potencial de mitigación significativamente mayor y más resiliente que la aplicación de cualquiera de estas soluciones de manera individual (Bartesaghi et al., 2018). Así, la transición hacia ciudades más habitables requiere no solo de tecnologías específicas, sino de una planificación urbana estratégica que internalice el confort térmico como un componente fundamental de la sostenibilidad.

### ***2.1.5. Enfriamiento por medio de vegetación***

#### ***2.1.5.1. Árboles de sombra***

En estudios anteriores se ha confirmado que los árboles tienen un desempeño térmico significativo e identifican parámetros para evaluar sus efectos de enfriamiento. Por ejemplo Ahmadi et al. (2019), menciona que en su caso de estudio un aumento de 0.1 unidades en SVF (Factor de vista de cielo) condujo a un aumento de 17.9 °C y 16.7 °C en la temperatura radiante media dentro de las calles, es decir, entre mayor SVF, mayor temperatura. En los resultados del estudio de Zhao et al. (2018), se muestra que plantar un árbol en medio del patio delantero sur del edificio puede producir aproximadamente 5.3 °C de beneficio medio de refrigeración del MRT para el vecindario. El impacto de los árboles en la reducción de las islas de calor urbanas se produce no solo a la altura de los árboles, sino también a niveles urbanos más altos, que pueden utilizarse para aprovechar la eficiencia energética en edificios de gran altura y áreas urbanas densas (Wang & Akbari, 2016). Algunos de los factores que complican el examen del impacto de los árboles en el balance energético urbano

incluyen: la gran variabilidad de las superficies urbanas y las condiciones de forzamiento externo, la gran diversidad y variedad de características funcionales que exhiben los árboles urbanos, y la amplia gama de longitudes escalas involucradas (Moody et al., 2021).

El potencial de enfriamiento de los árboles varía según sus características, que son el índice de área foliar, la altura del árbol, la altura del tronco, la altura de la copa y el ancho de la copa (Hami et al., 2019). Al debilitar la luz radiante del sol y su potencial de enfriamiento a través de la evapotranspiración, los árboles ofrecen confort térmico. También reducen la temperatura de la superficie al proporcionar sombra en las superficies y al intercambiar el flujo de aire cerca de la superficie de la tierra a través del flujo convectivo, reduciendo la temperatura y mejorando la ventilación del ambiente (Hami et al., 2019).

#### *2.1.5.2. Índice del Área Foliar (LAI)*

Hirose (2005) describe el antecedente de un artículo de 1953 sobre el factor luz en las comunidades vegetales y su importancia para la producción de materia. Este artículo es conocido como el primero que presentó un modelo matemático de la fotosíntesis del dosel. Se cuantificó la atenuación de la luz a través del dosel y se modeló la actividad fotosintética de hojas expuestas a distintos niveles de radiación bajo un clima determinado.

El índice del Área Foliar (LAI, por sus siglas en inglés) tiene su planteamiento por Watson (1947) y se ha utilizado para agregar características a nivel de hojas en el dosel de la vegetación. El LAI, es definido como la mitad del área foliar verde total por unidad de superficie horizontal del suelo, es un parámetro biofísico clave en los procesos de la superficie terrestre y los modelos del sistema terrestre (Li et al., 2018). Las fracciones de la radiación solar incidente reflejada y transmitida por un rodal denso de vegetación dependen de dos factores principales: la fracción interceptada por el follaje y las propiedades de dispersión del follaje. La fracción interceptada depende, a su vez, del área de follaje especificada como un índice de área foliar y sobre la distribución espacial del follaje con respecto a la dirección de la radiación (Katz, 1975).

Según lo descrito por Nafarrate-Hecht (2017), existe la manera directa e indirecta para estimar el LAI. La forma directa o también conocida como destructiva, consiste en salir a campo y emplear algún método de colecta/cosecha de tejido foliar para posteriormente la obtención del área foliar específica y la multiplicación por el material foliar colectado en trampas de hojarasca. La indirecta, también conocida como óptica, va desde medir la transmitancia de la luz, hasta calcular la cobertura del dosel y la fracción de espacios existentes entre las hojas (fotografías hemisféricas). El concepto está relacionado a la densidad del área foliar (LAD, por sus siglas en inglés), es decir, el área foliar total por unidad de volumen y que sirve para monitorear la salud y el almacenamiento de carbono de los bosques, así como para comprender y modelar los procesos ecofisiológicos de los árboles (Soma et al., 2021).

Yahia & Johansson (2014) mencionan en su investigación, que si se conoce la densidad del área foliar de las diferentes capas horizontales de un árbol, el LAI se puede calcular con la siguiente fórmula (ec.1), donde n es el número de capas y dz es el espesor de la capa (m):

$$LAI = \sum_{i=1}^n LAD_i \times dz$$

Ec. 1

### **2.1.6. Enfriamiento por medio de superficies con alto albedo**

El término albedo proviene del latín “albus”, que significa luz blanca, y se refiere a la propiedad de iluminación del suelo y su atmósfera. La determinación del albedo es importante para evaluar la insolación total, además de ser uno de los parámetros más relevantes en la aplicación de modelos de balance radiativo Tierra-Atmósfera (Vera, 2005). La distribución de la temperatura del aire en las ciudades está fuertemente correlacionada con el balance de energía de radiación urbana, directamente afectado por el albedo de las superficies verticales y horizontales. Los materiales de bajo albedo pueden aumentar la radiación solar absorbida por las envolventes de los edificios y las estructuras urbanas, provocando temperaturas superficiales altas y una emisión de radiación de onda larga de gran intensidad (Tsoka et al., 2017). El aumento del albedo de las ciudades contribuye en gran medida a mitigar la isla de calor urbano y las

temperaturas ambientales extremas. Se han desarrollado materiales avanzados que presentan una reflectividad muy alta en el visible o el infrarrojo, o en todo el espectro de la radiación solar junto con un alto valor de emisividad (Santamouris et al., 2017).

Hay dos categorías de efectos relacionados con el clima y con el albedo de los pavimentos. El primero es un forzamiento radiativo directo (RF, por sus siglas en inglés) que resulta de la reflectancia de la energía desde la superficie y hacia afuera de la atmósfera. El segundo efecto es el cambio en la demanda de energía del edificio (BED, por sus siglas en inglés) y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a la generación de energía (Akbari et al., 2009; Xu et al., 2020). La mayoría de los diseños de pavimentos innovadores, que se han implementado en todo el mundo, tienen como objetivo principal reducir la temperatura de la superficie del pavimento. Esto se ha logrado mediante el uso de superficies de pavimento con alto albedo para mejorar la reflectividad, el uso de materiales de superficie de pavimento que retienen el agua para aumentar el enfriamiento por evaporación y la conversión del calor del pavimento en energía eléctrica sostenible (Nwakaire et al. 2020). Fahmy et al. (2018) mencionaron una reducción significativa en la temperatura de la superficie y el flujo de calor sensible mediante el uso de materiales con un albedo de 0.5 y 0.7. Taha identificó que el aumento del albedo y la vegetación tienen un impacto en la reducción de la temperatura de la superficie y la temperatura del aire cerca de la superficie. A partir de este estudio, se puede concluir que modificando el albedo de la superficie (0.25 a 0.40), la temperatura del aire puede reducirse hasta 4 °C (Taha, 1997).

#### *2.1.6.1. Transferencia de calor*

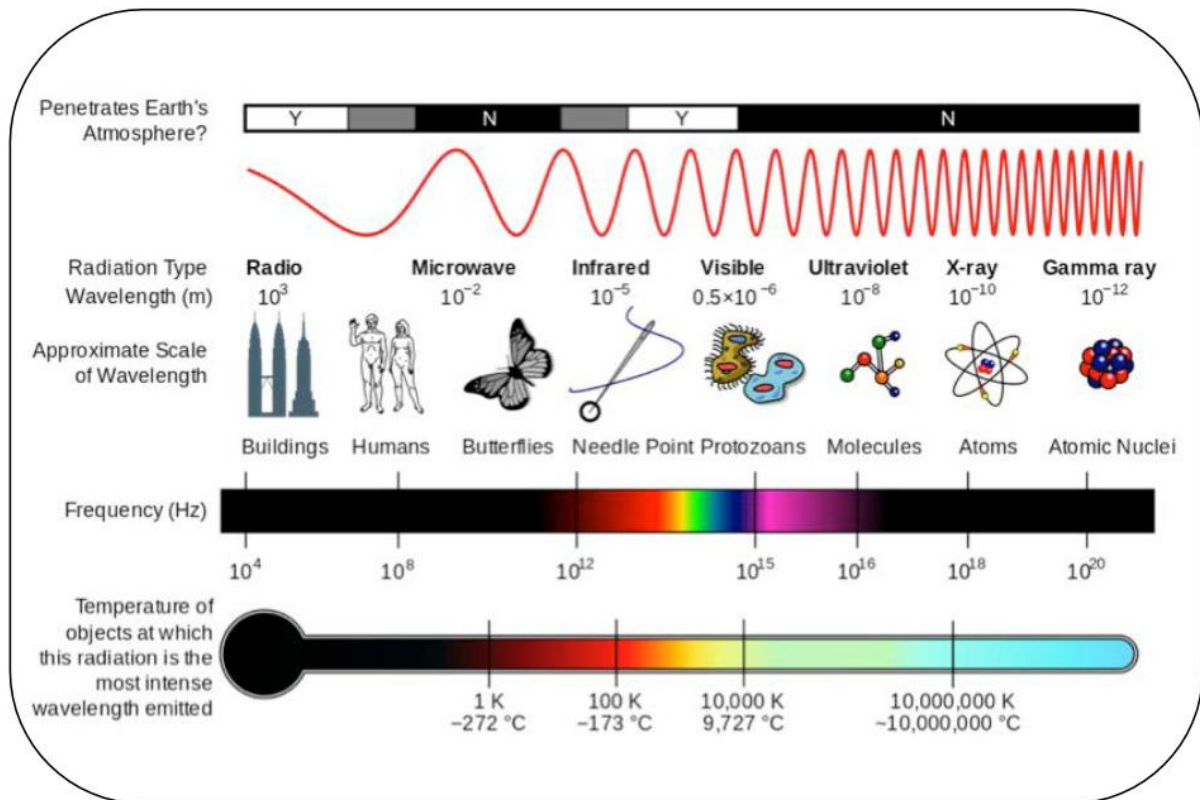
La transferencia de calor se centra en el estudio de sistemas que no se encuentran en equilibrio térmico y, en consecuencia, presentan fenómenos de desequilibrio. En este sentido, las leyes de la termodinámica proporcionan el marco fundamental para esta disciplina. De acuerdo con la primera ley, la tasa de energía transferida hacia un sistema debe ser equivalente a la tasa de incremento de energía en dicho sistema. En la segunda ley se requiere que el calor se transfiera en la dirección de la temperatura decreciente (Yunus, 2007). Los mecanismos de transferencia básicos actúan de forma

combinada, no sólo para dar la temperatura final del recinto que estamos estudiando, sino en combinación con otros elementos como la humedad del aire, para dar el grado de comodidad o confort del ser humano en el espacio considerado (Clocchiatti y Catelan, 2018).

En física, la transferencia de calor se define como el proceso mediante el cual se produce un intercambio de energía térmica entre distintos cuerpos. Este se puede transferir de tres maneras, ya sea por convección, que consiste en un modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el fluido adyacente que se encuentra en movimiento; por radiación, que es la energía emitida por la materia en forma de fotones u ondas electromagnéticas; y por último la conducción donde la transferencia de energía sucede entre sólidos (Barrera-Ríos et al., 2021).

De los tres mecanismos mencionados, la radiación resulta especialmente relevante para el estudio del balance energético terrestre, ya que constituye el principal medio por el cual el Sol transfiere energía hacia la superficie del planeta. Como se muestra en la Figura 14, la radiación solar se compone de un conjunto de ondas electromagnéticas, entre las que se incluyen los Rayos Cósmicos (producidos durante la desintegración del material atómico), los Rayos X, la Radiación gamma, la luz Ultravioleta, la Radiación Visible, los Infrarrojos y las Ondas de Radio. Todas las ondas electromagnéticas viajan en el vacío a la misma velocidad, 299.792 km/s, y sus distintas longitudes de onda son clave para definir su nivel de energía, si son visibles para el ojo humano y su capacidad de penetración. Los colores que percibimos visualmente son, en esencia, el resultado de longitudes de onda diversas. El rango completo de estas longitudes recibe el nombre de espectro electromagnético, y cuando se trata específicamente de las que provienen del Sol, se denomina espectro solar. La luz visible abarca las longitudes de onda que se sitúan entre los 400 y los 780 nanómetros. Cabe destacar que, de toda la energía radiante solar, únicamente alcanza la superficie terrestre la radiación con una longitud de onda superior a los 280 nm. Así pues, la radiación solar que llega a la tierra comprende la ultravioleta con 290-400 nm (7 %), luz visible con 400-780 nm (43 %), infrarrojo con 780-3000 nm (49 %) y el resto (1 %) (Gallardo et al., 2000; CESAR, 2018; Agencia Estatal de Meteorología, 2019).

Figura 14.  
Resumen de las propiedades del espectro electromagnético



Nota. Propiedades del espectro electromagnético. (Créditos: Wikimedia Commons). [Figura], CESAR, (2018).

El tipo de radiación electromagnética para el estudio de la transferencia de calor a nivel microclima es la radiación térmica emitida como resultado de las transiciones energéticas de las moléculas, los átomos y los electrones de una sustancia. La temperatura es una medida de la intensidad de estas actividades en el nivel microscópico y la rapidez de la emisión de radiación térmica se incrementa al aumentar la temperatura (Yunus, 2007).

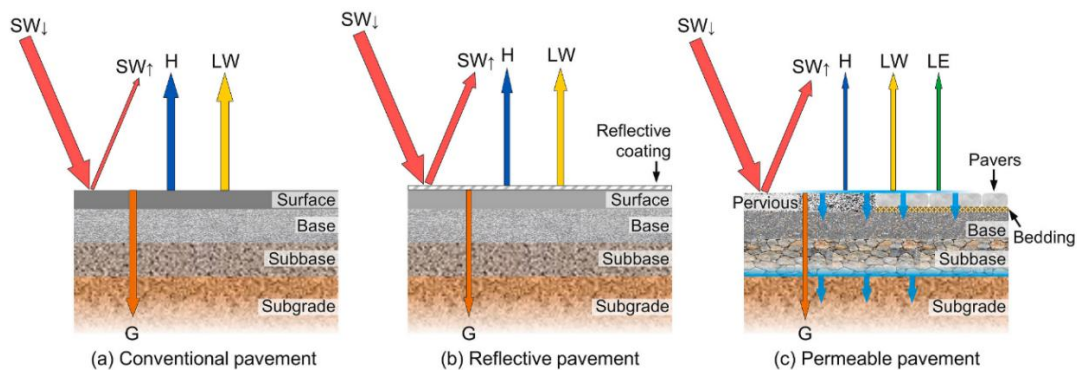
### 2.1.6.2. Tecnologías de enfriamiento

Hasta la fecha, se han desarrollado diferentes técnicas para lograr temperaturas superficiales más bajas, que incluyen modificaciones en los coeficientes de reflexión/albedo solar y de absorptividad, es decir, pavimentos reflectantes y

termocrómicos (Tsoka et al., 2018). Los revestimientos reflectantes generalmente son fáciles de aplicar a superficies pavimentadas existentes y en la mayoría de los casos, utilizan pigmentos y materiales de colores claros (como nanopartículas) para aumentar el albedo (Schneider et al., 2023). En un estudio realizado por Santamouris et al. (2017), son analizadas las distintas aplicaciones de materiales fríos. Aquí concluye que los pavimentos frescos parecen presentar un mayor potencial de mitigación que los techos frescos. Los pavimentos fríos se ubican a nivel del suelo y disminuyen la temperatura ambiente a ese nivel a través de procesos de convección.

En una revisión sistemática, Santamouris (2014) ha propuesto una relación casi lineal entre la caída de temperatura promedio y máxima y el aumento correspondiente del albedo. Wang et al. (2021) mencionan que, en particular, los pavimentos escalonados densos convencionales con un albedo relativamente bajo (como el asfalto) absorben una gran cantidad de radiación solar incidente y pueden ser más cálidos que la vegetación natural durante el día y la noche (Figura 15).

Figura 15.  
Estructura de los pavimentos



Nota. Estructuras típicas de (a) pavimento convencional, (b) pavimento reflectante y (c) pavimento permeable (hormigón permeable o adoquines, con la infiltración mostrada en azul claro). Las flechas con letras en cada subgráfica muestran el balance energético simplificado para cada tipo de pavimento:  $SW_{\downarrow} - SW_{\uparrow} + LW = G + H + LE$ , donde  $SW_{\downarrow}$ ,  $SW_{\uparrow}$ ,  $LW$ ,  $G$ ,  $H$  y  $LE$  representan la radiación de onda corta descendente (radiación solar), la radiación de onda corta ascendente (reflejada), la radiación neta de onda larga, la conducción de calor, el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente, respectivamente., [Figura], Wang et al., (2021).

Como mencionan en su estudio Tsoka et al. (2018), se debe tener en cuenta que cubrir tanto las fachadas de los edificios como las superficies del suelo con materiales de alto albedo a veces puede tener el efecto opuesto, lo que resulta en un aumento de la

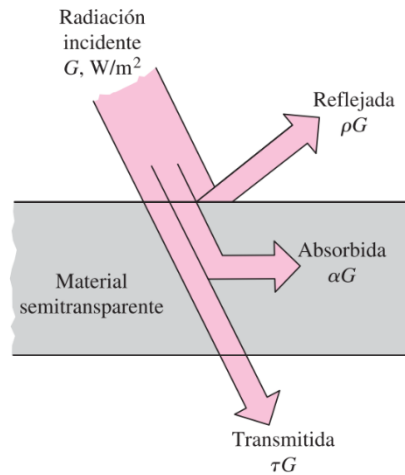
temperatura del aire ambiental debido al importante aumento de los reflejos de onda corta dentro de los cañones de las calles. La aplicación de materiales de alto albedo influye considerablemente en el equilibrio radiativo de las superficies del suelo y, en consecuencia, en el intercambio radiativo de los peatones con el entorno circundante. Finalmente, considerando que el valor del albedo está determinado por las propiedades ópticas de la capa superficial externa de los materiales, pueden ocurrir cambios significativos con el tiempo debido al proceso de envejecimiento y la meteorización.

### *2.1.6.3. Propiedades de los materiales*

Las superficies se ven afectadas por las características térmicas de los materiales. El albedo, emisividad y propiedades térmicas (densidad, calor específico y conductividad térmica) tienen un impacto importante en la temperatura de su superficie. Las propiedades térmicas y radiativas de los materiales son la conductividad térmica, calor específico, rugosidad del momento, rugosidad térmica, albedo y emisividad. El albedo es una fracción adimensional que se mide en una escala de 0 a 1. Un albedo de 0 significa que una superficie perfectamente negra no tiene poder de reflexión (no refleja nada, absorbe todo), y un albedo de 1 indica la reflexión perfecta de una zona perfectamente blanca (refleja el 100 %) (Ghenai et al., 2023; Yaghoobian et al., 2010).

Lo que nos rodea emite radiación en forma constante, por lo que la emisividad se refiere a las características de emisión de esos cuerpos, lo que implica que todo cuerpo, recibe constantemente la radiación proveniente de todas direcciones, en un intervalo de longitudes de onda. El flujo de radiación que incide sobre una superficie se llama irradiación ( $G$ ). Cuando la radiación incide sobre una superficie, parte de ella es absorbida, parte de ella es reflejada y la parte restante, si la hay, es transmitida (Figura 16). La fracción de irradiación absorbida ( $G_{abs}$ ) por la superficie se llama absorptividad ( $\alpha$ ) y se calcula mediante la ec. 2; la fracción reflejada ( $G_{ref}$ ) por la superficie recibe el nombre de reflectividad ( $\rho$ ) y que se calcula mediante la ec. 3; y la fracción transmitida ( $G_{tr}$ ) es la transmisividad ( $T$ ) y se calcula mediante la ec. 4 (Failache, 2010; Yunus, 2007).

Figura 16.  
Absorción, reflexión y transmisión de la radiación incidente por un material



Nota. Absorción, reflexión y transmisión de la radiación incidente por un material semitransparente. [Figura], Yunus A., (2007).

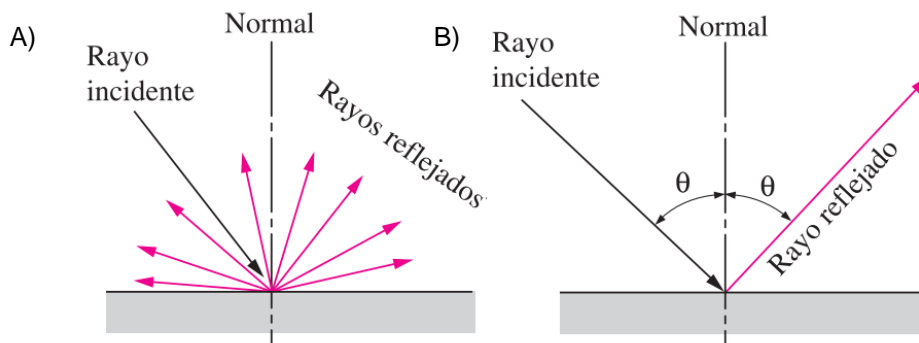
$$\text{Ec. 2. } \alpha = \frac{G_{abs}}{G}, 0 \leq \alpha \leq 1$$

$$\text{Ec. 3. } \rho = \frac{G_{ref}}{G}, 0 \leq \rho \leq 1$$

$$\text{Ec. 4. } T = \frac{G_{tr}}{G}, 0 \leq T \leq 1$$

Como se muestra en la Figura 17, la reflexión de luz puede categorizarse a grandes rasgos en dos tipos de reflexión. La reflexión especular se define como la luz reflejada a partir de una superficie lisa en un ángulo determinado, mientras que la reflexión difusa se produce en las superficies rugosas que tienden a reflejar la luz en todas las direcciones (Seyndic, 2017; EVIDENT, n.d.).

Figura 17.  
Tipos de reflexión de la luz: A) Difusa y B) Especular



Nota. Diferentes tipos de reflexión desde una superficie: a) real o irregular, b) difusa [Figura], Yunus, (2007).

El Índice de Reflectancia Solar (SRI, por sus siglas en inglés) se refiere a la determinación de la reflectancia solar, la emitancia térmica y la temperatura relativa de las superficies con respecto a una temperatura de referencia de un patrón blanco y negro, este indicador es de utilidad para la selección de los materiales apropiados para mejorar la eficiencia energética en la edificación y el entorno urbano. El SRI es inicialmente influenciado por dos factores: la composición del material y la textura superficial (Alchapar et al., 2013).

## **2.2. Pregunta de investigación e hipótesis**

### **2.2.1. Pregunta de investigación**

¿Qué combinación del parámetro de vegetación LAI y la propiedad superficial de albedo resulta más eficaz para mitigar la isla de calor urbana en climas mediterráneos durante las temporadas de verano e invierno a nivel microclima urbano?

### **2.2.2. Hipótesis**

La combinación entre un material de construcción de alto albedo en la superficie urbana y árboles de sombreado con un LAI entre 3 y 6  $m^2/m^2$ , traerán consigo un efecto de enfriamiento que, a su vez, mejorará el confort térmico del área de estudio.

Tales resultados demostraran lo siguiente:

- a) Existe una relación proporcional entre el LAI y el factor de sombra de un árbol, ya que cuanto más elevado es el índice LAI, mayor será el factor de sombra.
- b) El parámetro LAI es un indicador para evaluar la capacidad de mejora de las condiciones de confort térmico a partir del enfriamiento por sombreado de las superficies.
- c) Superficies con albedo mayor al de los materiales convencionales (0.1-0.2) traerán un mayor efecto de enfriamiento dentro del área de sombreado de un árbol.

## **2.3. Objetivos de investigación**

### **2.3.1. Objetivo general**

Estimar el Índice de Área Foliar LAI y el albedo de la superficie urbana que genera mayor efecto de enfriamiento en el microclima mediterráneo del área de estudio.

### **2.3.2. Objetivos específicos**

1. Analizar la relación entre el LAI y la reducción de la temperatura del aire a escala peatonal, como indicador del desempeño térmico del entorno exterior, en función del factor de sombreado de los árboles en un microclima mediterráneo.
2. Analizar la relación entre el albedo de las superficies y el desempeño térmico exterior en el microclima mediterráneo del área de estudio.
3. Comparar los efectos de enfriamiento a partir de las combinaciones de LAI de la vegetación y albedo de los materiales propuestos.

## CAPÍTULO 3. MÉTODO

---

### 3.1. Diseño de la investigación

La presente sección fue precisada a partir de la revisión de la literatura descrita en el apartado anterior. En este capítulo, el alcance de la investigación, de acuerdo con Hernández Sampieri y Mendoza Torres (2018), es determinado por dos factores: la situación del conocimiento previo sobre el problema de investigación evidenciado en la revisión de la literatura, y el propósito y perspectiva que se pretende otorgar al estudio. Es necesario que el alcance inicial sea definido, ya que constituye el punto de partida en la práctica de la investigación, mientras que el alcance final es establecido como el límite hasta donde se aspira llegar.

Para realizar la presente investigación de tipo cuantitativo, cuasi-experimental, fue planificado un proceso metodológico de seis etapas asociadas a cumplir los objetivos antes planteados. Las etapas son: la revisión de la literatura, selección del área de estudio, selección de vegetación, selección de materiales, diseño del experimento y el plan de análisis de resultados (Tabla 7).

Tabla 7.  
Proceso metodológico de la investigación

Etapa	Pasos	Herramientas	Objetivo
I. <i>Revisión de la literatura</i>	a) Identificación de palabras clave. b) Búsqueda en base de datos. c) Selección de artículos. d) Clasificación de la información. e) Planteamiento de la investigación. f) Análisis de hallazgos. g) Indicar variables y constantes de estudio.	a) Recursos bibliográficos digitales de información científica y tecnológica. b) Gestionar referencias bibliográficas en "Aplicación Mendeley".	1) Analizar la relación entre el LAI y el factor sombra de los árboles de sombreado según las características microclimáticas del área de estudio. 2) Identificar que superficies traerán un mayor efecto de enfriamiento en el área de estudio y cuáles son sus características.
Continua			

	<b>Etapa</b>	<b>Pasos</b>	<b>Herramientas</b>	<b>Objetivo</b>
II.	<i>Selección del área de estudio</i>	a) Revisión de indicadores para determinar zonas climáticas locales. b) Determinar zonas críticas. c) Marcar cañones urbanos dentro de la zona. d) Selección de unidad de análisis.	a) Mapas satelitales. b) Indicadores de las Zonas climáticas locales: tamaño del sitio y relación de aspecto, tipo de diseño, tamaño del edificio y orientación del edificio.	1) Analizar la relación entre el LAI y el factor sombra de los árboles de sombreado según las características microclimáticas del área de estudio. 2) Identificar superficies que traerán un mayor efecto de enfriamiento en el área de estudio.
III.	<i>Selección de la vegetación</i>	a) Revisión de características de la vegetación en casos análogos. b) Determinar valores a utilizar del caso de estudio. c) Análisis de propuestas de especies. d) Selección de especies.	a) Casos análogos. b) Tabla de análisis comparativo. c) Entrevista con especialista. d) Índice del área foliar (LAI).	1) Analizar la relación entre el LAI y el factor sombra de los árboles de sombreado según las características microclimáticas del área de estudio.
IV.	<i>Selección de materiales</i>	a) Revisión de características térmicas en casos análogos. b) Determinar valores óptimos para el caso de estudio. c) Análisis térmico de propuestas de materiales. d) Selección de los materiales superficiales.	a) Casos análogos. b) Tabla de análisis comparativo. c) Entrevista con especialista. d) Albedo	2) Identificar que superficies traerán un mayor efecto de enfriamiento en el área de estudio y cuáles son sus características.

Continúa

	<b>Etapas</b>	<b>Pasos</b>	<b>Herramientas</b>	<b>Objetivo</b>
V.	<i>Diseño del experimento</i>	a) Estudio de la unidad de análisis. b) Definir objetivos del experimento. c) Estudio de las variables consideradas en la temporada de verano e invierno. d) Selección de equipo para obtención de datos. e) Diseño de prototipo de escenarios. f) Selección de método de análisis. g) Simulación en software de los escenarios.	a) Casos análogos. b) Tabla de análisis comparativo. c) Campaña de monitoreo. d) Archivo climático de Ensenada B.C. e) ENVI-met.	3) Comparar los efectos de enfriamiento con la demanda de energía y el confort térmico a partir de las combinaciones de LAI de la vegetación y albedo de los materiales propuestos.
VI.	<i>Plan de análisis de resultados</i>	a) Obtener un modelo estadístico-descriptivo b) Comparación entre escenarios c) Análisis de parámetros climatológicos	a) Software ENVI-met.	3) Comparar el desempeño térmico a partir de las combinaciones de LAI de la vegetación y albedo de los materiales propuestos.

### 3.2. Objeto de estudio

Como se muestra en la Tabla 8, el objeto del presente estudio son las superficies urbanas donde se busca un efecto de enfriamiento causado por la vegetación y los materiales superficiales.

Tabla 8.  
Objeto de estudio

Título de la investigación	Objeto de estudio	Método	Pregunta de investigación
Alto albedo y vegetación como estrategias de mitigación de la isla de calor en superficies urbanas de un clima mediterráneo	Superficies urbanas	Cuantitativo	¿Qué combinación del parámetro de vegetación LAI y la propiedad superficial de albedo resulta más eficaz para mitigar la isla de calor urbana en climas mediterráneos durante las temporadas de verano e invierno a nivel microclima urbano?

### 3.3. Variables de estudio

En los diseños cuasiexperimentales se manipulan al menos, una variable independiente para observar su efecto sobre una o más variables dependientes, a diferencia de los experimentos puros por el grado de seguridad que pueda tenerse sobre la equivalencia inicial de los grupos (Hernández-Sampieri y Mendoza-Torres 2018). Como se muestra en la Tabla 9, el desempeño térmico depende de los escenarios de simulación propuestos con distinto índice de área foliar y albedo en los materiales que presentan los pavimentos.

Tabla 9.  
Variables dependientes e independientes utilizadas en la investigación

Variables dependientes	Variables independientes
Desempeño térmico	a) Albedo de los pavimentos b) Índice del área foliar de la vegetación

Según Bauce et al. (2018), en la definición de operacional, lo que se trata es de facilitar el proceso de medición u observación, además de hacer precisa dicha medición, lo

cual es necesario para llevar al término deseado la investigación. Por esta razón en la Tabla 10 se muestra la operalización de variables realizada para el presente caso de estudio. La variable "desempeño térmico" (dependiente) tiene la dimensión de sensación térmica y condiciones físicas ambientales, mientras que sus indicadores son la temperatura del aire (°C), temperatura superficial (°C), temperatura media radiante (°C), humedad Relativa (%), velocidad del viento (m/s). La variable "albedo" (independiente) tiene la dimensión de materiales superficiales y balance de energía superficial, mientras que sus indicadores son la temperatura superficial (°C), temperatura media radiante (°C), emisividad y absorptividad. La variable "LAI" (independiente) tiene la dimensión de características de la vegetación, mientras que sus indicadores son la corona, altura, estructura, tipo de hoja, LAD (densidad del área foliar). Todas las variables tienen una escala de medición de intervalo.

Tabla 10.  
Operalización de variables

	Variables	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
<b>Dependiente</b>	<i>Desempeño térmico</i>	Sensación térmica,	Temperatura del aire (°C), Temperatura superficial (°C), Temperatura media radiante (°C), Humedad Relativa (%), Velocidad del viento (m/s).	Intervalo
		Condiciones físicas ambientales		
<b>Independiente</b>	<i>Albedo</i>	Material de superficies	Emisividad, Absortividad, Temperatura superficial (°C), Temperatura media radiante (°C)	Intervalo
		Balance de energía superficial		
<b>Independiente</b>	<i>LAI (Índice del área foliar)</i>	Características de la vegetación	Corona, Altura, Estructura, Tipo de hoja, LAD (Densidad del área foliar).	Intervalo

### 3.4. Área de estudio

Para la presente investigación, fue seleccionada como el espacio de estudio la ciudad de Ensenada B.C., México, ubicada a 31° 52' de latitud norte y a 116° 37' de longitud oeste. El clima de la ciudad de Ensenada se clasifica como BSKs (Mediterráneo frío semiárido) por el sistema Köppen-Geiger, mientras que con el sistema de clasificación climática de Köppen (García, 2004), el clima de la ciudad de Ensenada es BS0 ks (e), que se interpreta como seco, extremoso, no es tipo ganges, con presencia de canícula. Por otra parte INEGI (2010), lo clasifica como seco mediterráneo templado.

#### 3.4.1. Unidad de análisis

La unidad de análisis fue a nivel de cañón urbano, a partir del estudio de mapas en el centro de población, de la clasificación de Zonas climáticas locales (LCZ, por sus siglas en inglés), la temperatura superficial de la ciudad y el índice de vegetación normalizada, de tal manera que se identificaron los sitios de mayor interés para este estudio, destacando que fueron sitios considerados seguros y accesibles para ingresar con el equipo (Figura 18).

Su selección corresponde a un sector urbano de la ciudad de Ensenada, B.C., delimitado con base en criterios físicos, demográficos y biológicos. Desde el punto de vista físico, el área presenta una morfología urbana representativa del patrón de crecimiento reciente de la ciudad, con calles de trazado regular, edificaciones de baja a media altura y un predominio de superficies pavimentadas que intensifican el efecto de isla de calor. En cuanto a lo demográfico, se trata de una zona con densidad poblacional media, donde el confort térmico tiene relevancia directa para la habitabilidad y la salud de los residentes. En el aspecto biológico, el arbolado existente corresponde principalmente a especies urbanas de uso común en la región, lo cual permite simular escenarios realistas de cobertura vegetal y sus variaciones en el LAI.

Adicionalmente, la selección del sitio respondió a consideraciones prácticas: se trata de un espacio seguro y accesible, lo que permitió realizar visitas de campo, levantamiento fotográfico y validación de datos sin contratiempos. Estas condiciones garantizan tanto la viabilidad metodológica como la pertinencia de los resultados

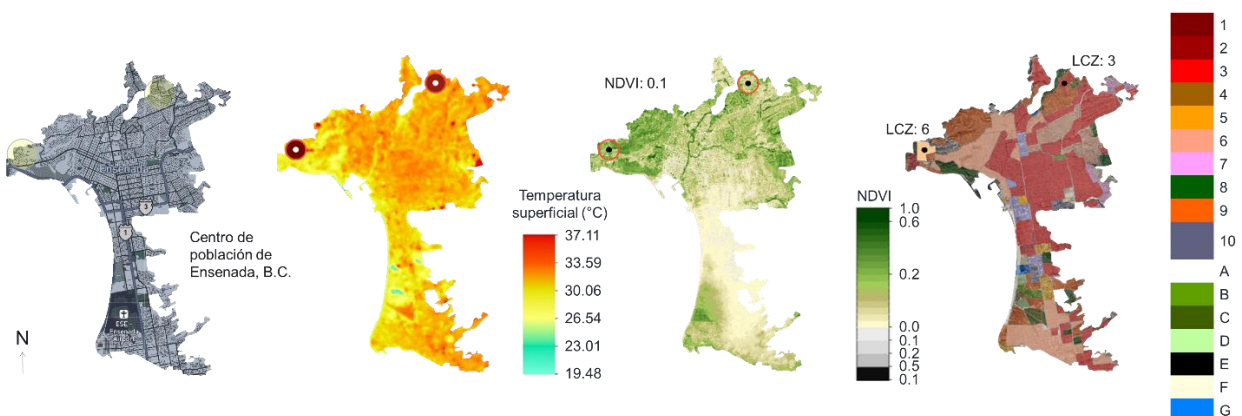
obtenidos para su extrapolación a otras áreas de características similares en Ensenada.

La intensidad de UHI depende además de varias propiedades del entorno construido, incluida la geometría 3D, los materiales de la superficie y las funciones urbanas que contribuyen al calor antropogénico (Kotharkar et al., 2020).

Se aplicó el método de clasificación de LCZ en la ciudad de Ensenada a través de la metodología de base de datos urbana mundial y herramientas del portal de acceso (WUDAPT, por sus siglas en inglés) "LCZ Generator", una aplicación web para crear mapas de LCZ propuesta por Demuzere et al. (2021). Existen varios enfoques para desarrollar mapas LCZ. El actual estudio utiliza WUDAPT, donde se crea un mapa LCZ utilizando datos satelitales abiertos y un software gratuito. El método tiene tres pasos: (i) preprocesamiento de datos, (ii) digitalización y evaluación de áreas de entrenamiento de muestra usando Google Earth, y (iii) clasificación LCZ con SAGA GIS (McRae et al., 2020). La ciudad de Ensenada, B.C., presenta un predominio dentro de la mancha urbana, la LCZ #3 "compacto de poca altura" y LCZ #6 "abierto de poca altura".

*Figura 18.*

*Selección de unidad de análisis a través de mapa del centro de población, temperatura superficial, índice de vegetación normalizada y LCZ de la ciudad de Ensenada, Baja California.*

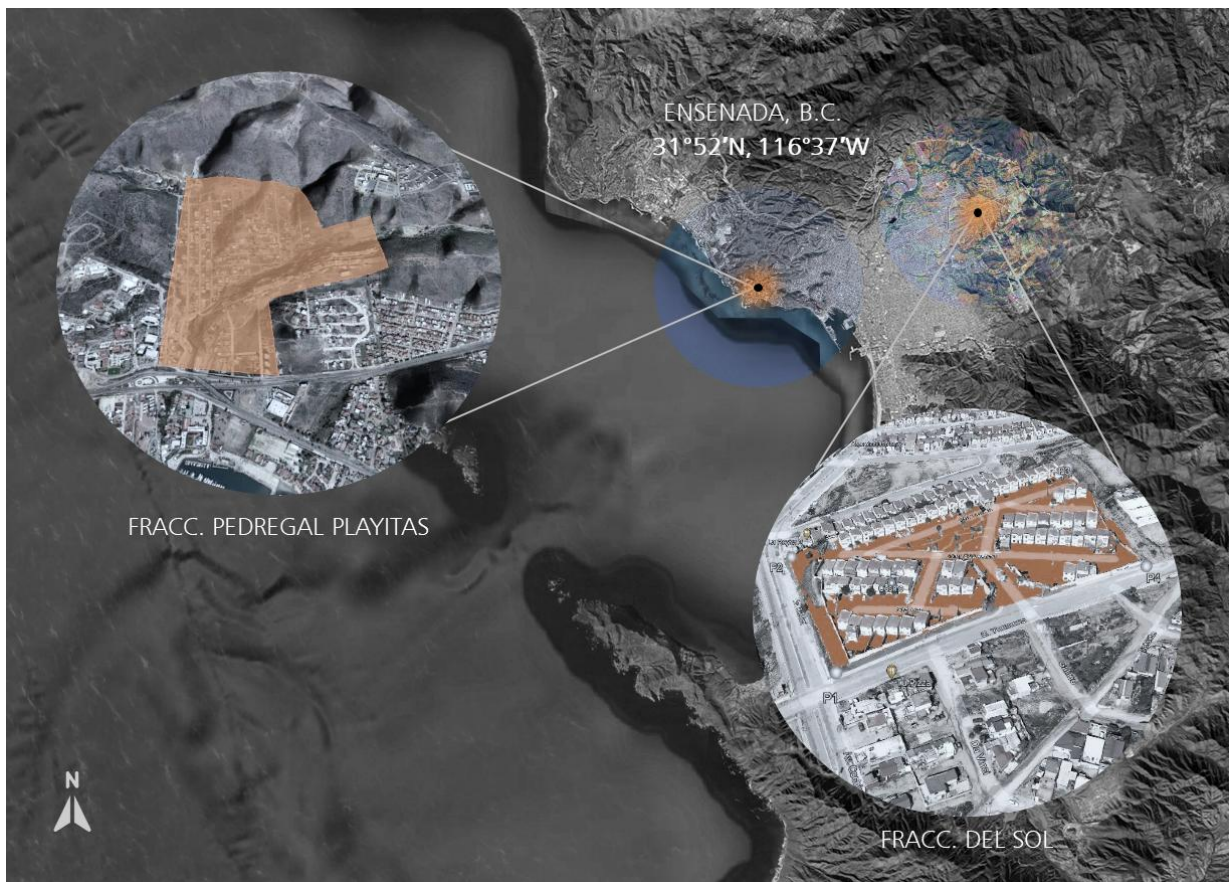


Nota. Imagen elaborada a partir de imagen LANDSAT 8, sensor OLI/TIRS en EOSDA LandViewer, SENTINEL-2 y GoogleEarth.

Como se menciona en el presente apartado, para el proceso de selección de las unidades de análisis fue necesario revisar el predominio de las LCZ para la caracterización del espacio urbano en la ciudad Ensenada y la LST por medio de

LANDSAT 8, sensor OLI/TIRS, para determinar la intensidad de la UHI a partir de la temperatura superficial y el índice de vegetación normalizada del área de estudio. Adicionalmente, con el objetivo de aportar información georreferenciada a nivel de desagregación territorial, se consultó el CONEVAL, donde se estima el Grado de Rezago Social (GRS) a nivel Área Geoestadística Básica (AGEB). De esta manera se genera una clasificación de cinco GRS: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. A través el presente análisis, se eligieron dos áreas residenciales que contaron con todos los requisitos establecidos (Figura 19).

*Figura 19.*  
*Áreas residenciales correspondientes a la unidad de análisis*



Nota. Google (2023), [Imagen satelital]. Google Earth

La primera área residencial corresponde a Villas del Cedro, Fraccionamiento del Sol, en Ensenada, B.C., con coordenadas geográficas: latitud 31°54'15.7" N, longitud 116°34'58.5" W. Cuenta con una superficie total de 16,948.63 m<sup>2</sup>, corresponde a una LCZ #3, caracterizada por edificaciones pequeñas y compactas de hasta 10 m de altura, con calles estrechas y una fracción de superficie construida relativamente alta

(40–70%). Presenta un factor de vista de cielo bajo (0.2–0.6) debido a la cercanía de las edificaciones, con superficies predominantemente impermeables (20–50%) y limitada cobertura permeable (<30%). Los materiales predominantes son pesados (concreto, ladrillo, teja), lo que contribuye a un entorno térmicamente demandante, aunque con calor antropogénico moderado (<75 W m<sup>-2</sup>).

En contraste, la segunda área residencial del Fraccionamiento Pedregal Playitas en Ensenada, B.C., se ubica en las coordenadas geográficas: latitud 31°52'22" N, longitud 116°39'42" W. Cuenta con una superficie total de 513,619.10 m<sup>2</sup>, pero únicamente se analizó la sección que se encuentra con calles pavimentadas y casas proyectadas con el mismo prototipo (26,671.07 m<sup>2</sup>). Se clasifica como LCZ #6, con edificaciones de 1 a 3 niveles más separadas, lo que permite un mayor factor de vista de cielo (0.6–0.9). La fracción construida es menor (20–40%) y se observa un mayor porcentaje de superficies permeables (30–60%), acompañadas de arbolado disperso y mayor cobertura vegetal. Esto le confiere condiciones microclimáticas más favorables, con calor antropogénico reducido y menor presión en cuanto a calefacción o refrigeración de espacios (Tabla 11).

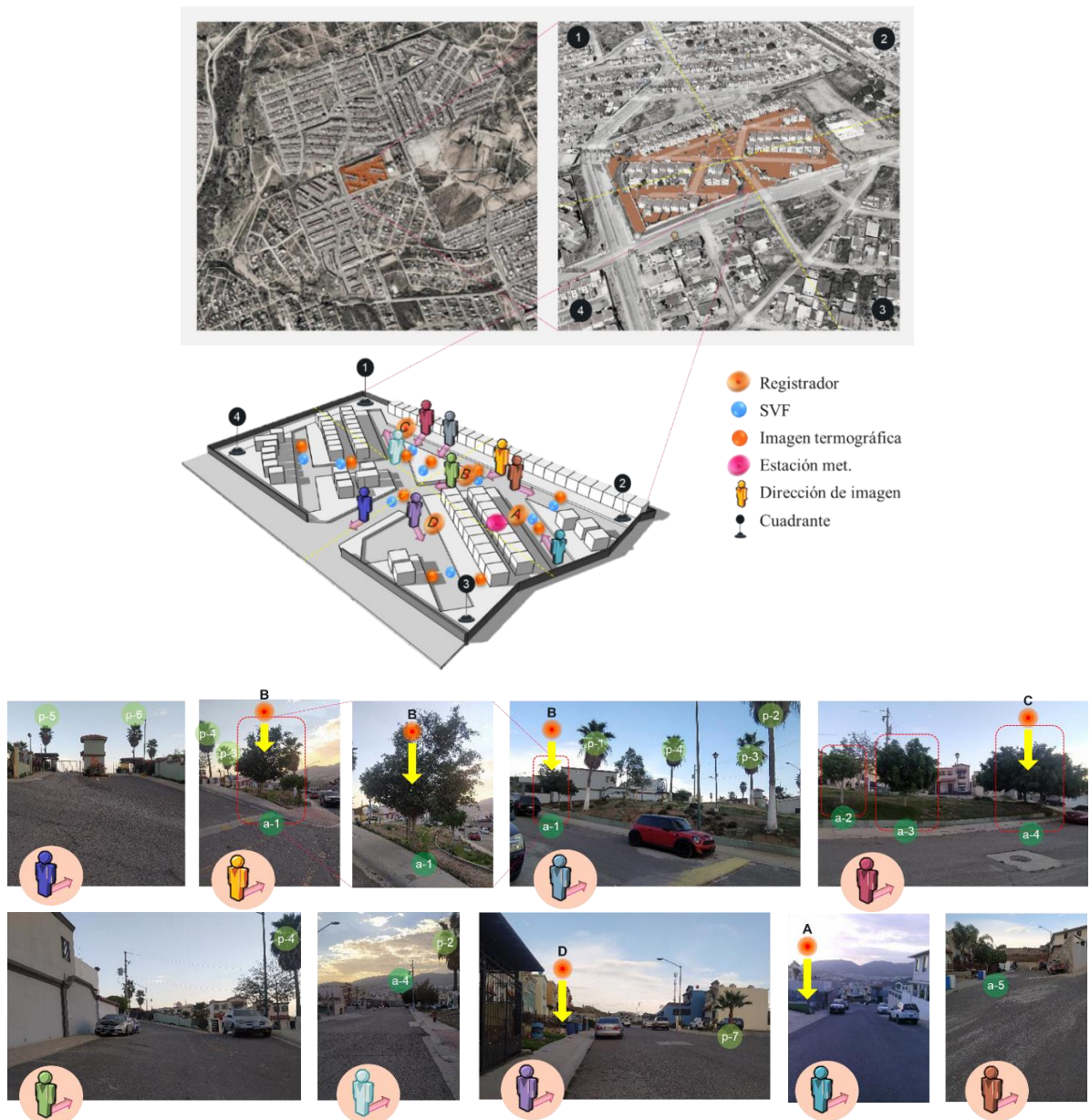
Tabla 11. Características del sitio, según los parámetros de las Zonas climáticas locales

Característica	Fracc. del Sol	Fracc. Pedregal Playitas
<i>Factor de vista de cielo</i>	0.2 – 0.6	0.6 – 0.9
<i>Relación de aspecto de cañón</i>	0.75 – 1.50	0.3 – 0.75
<i>Altura media de los edificios</i>	3 – 10 m	3 – 10 m
<i>Rugosidad del terreno</i>	6	5 – 6
<i>Fracción de sup. construida</i>	40 – 70 %	20 – 40 %
<i>Fracción de sup. impermeable</i>	20 – 50 %	20 – 50 %
<i>Fracción de sup. permeable</i>	< 30%	30 – 60 %
<i>Admitancia superficial</i>	1.000 – 2.200 J m <sup>-2</sup> s <sup>1/2</sup> K <sup>-1</sup>	1.000 – 2.200 J m <sup>-2</sup> s <sup>1/2</sup> K <sup>-1</sup>
<i>Albedo de superficie</i>	0.10 – 0.20	0.12 – 0.25
<i>Calor antropogénico</i>	< 75 W m <sup>-2</sup>	< 25 W m <sup>-2</sup>

Nota. Datos de muestra para zonas climáticas locales, [Apéndice], Stewart y Oke (2012).

El Fraccionamiento del Sol, se caracteriza por un prototipo de vivienda de interés social de dos niveles, con estacionamiento para dos automóviles y construidas en concreto armado sobre un terreno de 107.20 m<sup>2</sup>. En el sitio se instalaron cuatro registradores fijos y una estación meteorológica, complementada con registros fotográficos de temperatura superficial en diez puntos y análisis del Sky View Factor (SVF) mediante imágenes hemisféricas obtenidas con lente ojo de pez en nueve puntos (Fig. 20).

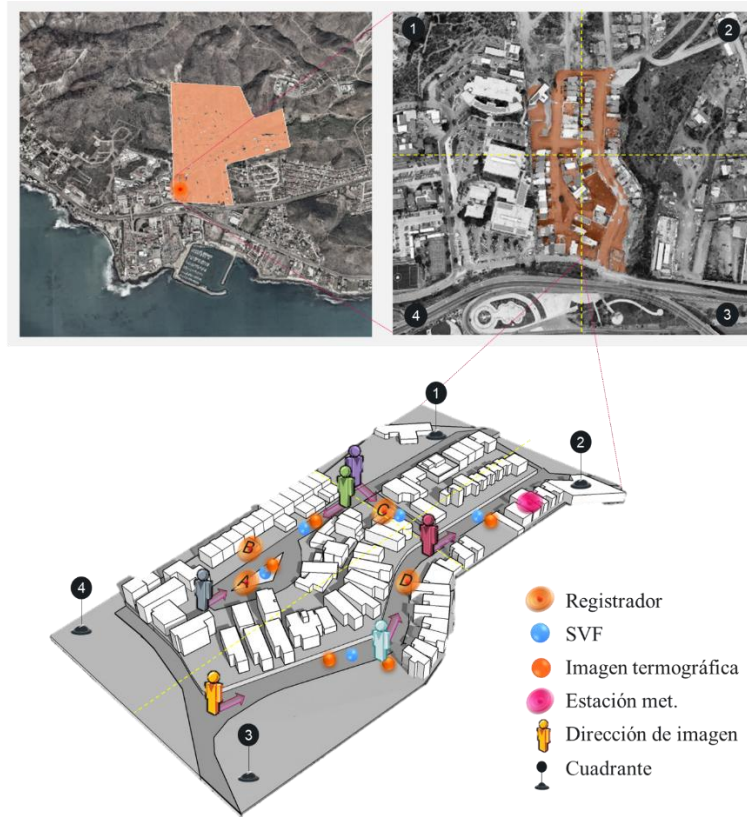
Figura 20.  
Distribución de equipo y caracterización de unidad de análisis para el Fracc. del Sol



La vegetación observada en el Fraccionamiento del Sol estuvo compuesta principalmente por ejemplares de *Ficus benjamina* y palmas *Washingtonia robusta*. Al ser una LCZ #3, según Stewart y Oke (2012), corresponde a edificios pequeños y dispuestos densamente a lo largo de calles estrechas, a menudo sin una alineación perceptible. Vista del cielo desde el nivel de la calle significativamente reducida y materiales de construcción pesados (piedra, hormigón, ladrillo, teja) con techos y paredes gruesos. La cobertura del suelo mayormente pavimentada; pocos o ningún árbol. Demanda moderada de calefacción/refrigeración de espacios. Flujo de tráfico bajo-moderado y el espacio cumple la función de área residencial (vivienda de una sola unidad, terraza de alta densidad/vivienda en hilera) y comerciales (pequeñas tiendas minoristas).

El Fraccionamiento Pedregal Playitas, clasificado como LCZ #6 según Stewart y Oke (2012), se caracteriza por edificaciones pequeñas de 1 a 3 niveles, dispuestas en patrón de cuadrícula y separadas por calles anchas que permiten una mayor apertura visual. La vista del cielo desde el nivel de la calle es solo ligeramente reducida, y los materiales de construcción empleados varían entre madera, ladrillo, piedra y teja. A diferencia de zonas más densas, esta unidad residencial presenta una cobertura vegetal significativa, con arbolado disperso, cactáceas y palmas (*Washingtonia robusta*), lo que contribuye a una baja demanda de calefacción y refrigeración en los espacios interiores, además de un flujo vehicular reducido. Como se detalla en la Figura 21, la caracterización del sitio incluyó el levantamiento de fotografías termográficas en 6 puntos para registrar la temperatura superficial, así como la obtención de imágenes hemisféricas con lente ojo de pescado en 5 puntos para el cálculo del Sky View Factor (SVF). Asimismo, se instalaron 4 registradores fijos y una estación meteorológica para el monitoreo continuo de las condiciones microclimáticas. Los datos recabados en los diferentes cañones urbanos del fraccionamiento, permitieron complementar el análisis mediante el cálculo de índices RGB a partir de las imágenes, lo que facilitó la estimación de absortancia y reflectancia de pavimentos, concretos, recubrimientos vegetales y superficies de terracería. Por último, se efectuó una comparación estacional de los registros en verano e invierno, identificándose variaciones relevantes en los distintos puntos de monitoreo.

**Figura 21.**  
**Distribución de equipo y caracterización de unidad de análisis para Fracc. Pedregal Playitas**



Para una descripción detallada de la distribución de los equipos, el procedimiento de levantamiento en campo, se recomienda consultar el Apéndice 1 (página 166). Dicho apartado incluye información complementaria sobre la caracterización de superficies y la vegetación registrada en el área de estudio.

### **3.5. Diseño del experimento**

El presente experimento consta de 6 etapas: 1) la selección del caso de estudio, 2) trabajo de campo y medición, 3) selección de vegetación y materiales, 4) diseño de escenarios, 5) simulación en ENVI-met y 6) análisis de resultados.

Primero se realizó la selección del caso de estudio, delimitando un sector representativo de la ciudad de Ensenada con base en criterios urbanos y climáticos. Posteriormente se efectuó el trabajo de campo, que incluyó visitas, registros fotográficos y mediciones ambientales necesarias para la modelación. La tercera etapa correspondió a la selección de vegetación y materiales, definiendo especies arbóreas comunes en la zona y pavimentos con distintos valores de albedo. Con esta información se procedió al diseño de escenarios, que consideraron diferentes configuraciones de arbolado y pavimentos. Posteriormente, se realizaron las simulaciones en ENVI-met, aplicando parámetros climáticos de verano e invierno. Y por último, se llevó a cabo el análisis de resultados, comparando las variaciones de temperatura del aire a escala peatonal entre los escenarios modelados.

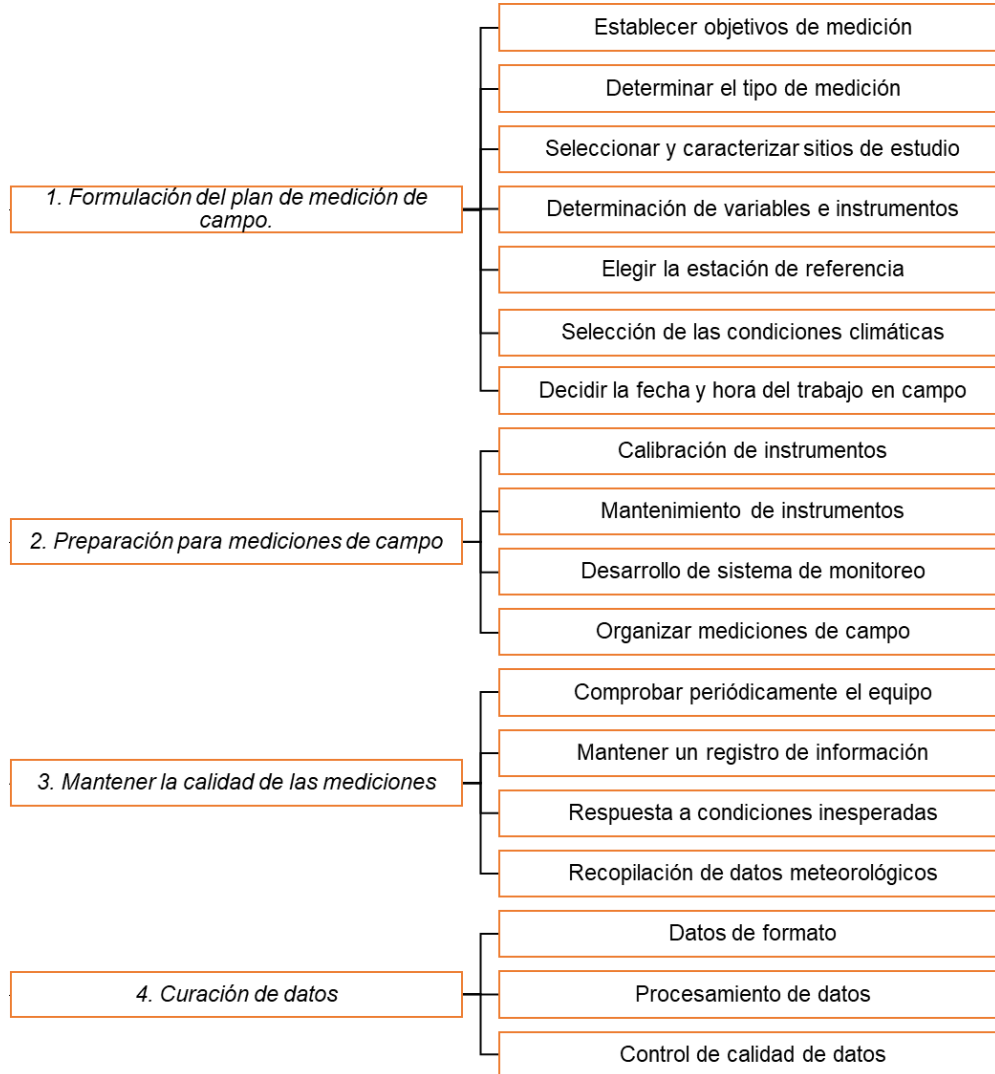
### **3.6. Trabajo de campo y medición**

La metodología planteada para realizar el trabajo de campo fue propuesta en base a la revisión sistemática de Liu et al. (2022), en la cual se estudian las directrices disponibles para las mediciones de campo y los últimos 5 años de la literatura asociada, como la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación (directriz N° 8 de la Organización Meteorológica Mundial); las normas de la Organización Internacional de Normalización "ISO" por sus siglas en inglés; y la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado "ASHRAE" por sus siglas en inglés, donde adoptaron con frecuencia estudios biometeorológicos humanos. Incluyen ISO 7726-1998 Ergonomía del entorno térmico: instrumentos para medir cantidades físicas, ISO 7730-2005 Ergonomía del entorno térmico: determinación analítica e interpretación del confort térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y el confort térmico local.

Para la caracterización del Fracc. del Sol y Fracc. Pedregal Playitas fue indispensable comparar las condiciones térmicas del sitio con diferentes características, cobertura del suelo, condiciones de sombra y elementos del paisaje; y colocar el instrumental alrededor de cuatro cuadrantes, siguiendo las indicaciones de la guía de instrumentos meteorológicos y métodos de observación de WMO (2008). En ambos fraccionamientos fueron colocados de forma fija registradores a 2.0 m de altura (nivel peatonal) y estaciones meteorológicas de 7.0 m de altura (posición sin obstrucciones de edificaciones); y fueron tomadas fotografías con una cámara termográfica a 1.0 m de altura y el SVF a partir de fotografías con una cámara fotográfica a 1.50 m de altura, desde las 14:30 a las 15:00 h, durante el periodo de verano e invierno, como es señalado en la sección anterior.

Como se muestra en la Figura 22, la metodología propuesta se estructura en una secuencia de cuatro pasos que permiten garantizar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos. En primer lugar, se establece un plan de medición de campo, en el cual se definen los objetivos, las variables de interés, los instrumentos a utilizar y la temporalidad de las mediciones. Posteriormente, se realiza la preparación para las mediciones, lo que implica la calibración de equipos, la selección de los sitios de muestreo y la verificación de las condiciones logísticas necesarias para llevar a cabo el trabajo en campo. El tercer paso consiste en mantener la calidad de la medición, asegurando la correcta aplicación de los protocolos, la uniformidad en la recolección de datos y la identificación de posibles fuentes de error que pudieran afectar los resultados. Finalmente, se procede a la selección de los datos, etapa en la que se organiza, depura y clasifica la información recopilada para garantizar que solo se incluyan aquellos registros que cumplen con los criterios de calidad previamente establecidos. Esta secuencia metodológica no solo proporciona un marco sistemático para el desarrollo de las mediciones, sino que además facilita la trazabilidad y la replicabilidad del proceso, aspectos fundamentales en el ámbito académico y científico.

Figura 22.  
Flujo de trabajo de medición de campo



Nota. Elaboración a partir de Liu et al. (2022)

### 3.6.1. Formulación de plan de medición de campo

El objetivo principal del trabajo de campo es recuperar información sobre las variables físicas del ambiente térmico (Temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) para posteriormente servir en la caracterización del microclima en la simulación de escenarios. Para ello, fue necesario elegir un enfoque estacionario de medición, donde se observa el microclima urbano en intervalos de tiempo regulares y así poder evaluar las características temporales de diferentes elementos.

### 3.6.1.1. Determinación de instrumentos

Para la obtención de datos meteorológicos del área de estudio, se realizó una campaña de monitoreo. Como se muestra en la Tabla 12, se utilizó instrumentación mencionada en la literatura, como Data loggers, Marca HOBO U12-006 y MX1104, para registrar temperatura del aire (Ta) y humedad relativa (HR) en sitio; Estación meteorológica marca AcuRite® Atlas™ modelo 06059 para registrar Ta, HR y la velocidad del viento (Vv); para medir la temperatura superficial, fue utilizada una cámara térmica compacta FLIR C5, que almacena directamente sus imágenes en la nube de FLIR Ignite™; y para analizar el almacenamiento térmico y la ventilación del espacio de la calle en el cañon urbano, fue utilizado el Factor de cielo visible (SVF, por sus siglas en ingles), a partir de la utilización de una Cámara Canon EOS 6D y un lente Canon EF 8-15mm f/4L Fisheye USM.

Tabla 12.  
Especificaciones del equipo

Modelo	Parámetro	Rangos de operación	Resolución	Precisión
Data Loggers, Marca HOBO MX1104	Temperatura del aire (Ta), Humedad Relativa (HR)	-20°C a 70°C; 0% a 100%	0.002 °C a 25 °C; 0.01%	±0.35 °C de 0 °C a 50 °C; ±5% de 10% a 90%.
Data Loggers, Marca HOBO U12-012	Temperatura del aire (Ta), Humedad Relativa (HR)	-20°C a 70 °C; 5% a 95%	0.0 °C; 0.05%	±0.35 °C de 0 °C a 50 °C; ±2.5% de 10% a 90%.
Estación meteorológica marca AcuRite® Atlas™ modelo 06059	Temperatura del aire (Ta), Humedad Relativa (HR), Velocidad del viento (Vv)	-40°C a 70°C; 1% a 99%; 0-160 mph (0- 257 km/h)		± 1 °F; ± 2% RH; ± 1mph ≤10 mph ± 10% > 10 mph
Cámara térmica compacta FLIR C5	Temperatura superficial (Ts)	Espectral: 8 a 14 μm; temperatura del objeto: de -20°C a 400 °C; temperatura operativa: de - 10 a 50 °C		Temperatura ambiente, de 15 a 35 °C; temperatura del objeto superior a 0 °C, de 0 a 100 °C: ±3 °C, de 100 a 400 °C: ±3 %
Cámara Canon EOS 6D	Factor de cielo visible (SVF)		Sensor de formato completo de 20,2 megapíxeles	Sensibilidad ISO máxima 25.6 (ampliable a 102.4 ISO)

Continúa

Modelo	Parámetro	Rangos de operación	Resolución	Precisión
Lente Canon EF 8-15mm f/4L Fisheye USM	Factor de cielo visible (SVF)	Apertura: f/4L		Distancia Focal: 8 – 15 mm; Distancia focal más cercana: 0.15 m / 6.2 in.

### 3.6.1.2. Selección de las condiciones climáticas

Después de un análisis climático a partir de un archivo del “Departamento de Energía de Estados Unidos” (EPW), extraído del software Meeonorm 7, se establecieron las fechas de la campaña de monitoreo en sitio. Cabe mencionar que el día 26 de agosto es el día típico de verano, con una temperatura del aire máxima de 30.8 °C y una mínima de 22.6 °C; y una humedad relativa máxima de 84% y mínima de 53%. Por otro lado, el día típico de invierno es el 18 de enero con una temperatura del aire máxima de 21.0 °C y una mínima de 9.7 °C; y una humedad relativa máxima de 76% y mínima de 37% (Tabla 13.). Por esta razón, se estipuló el monitoreo del 14 de agosto al 16 de octubre del 2023 y del 1 de enero al 30 de febrero del 2024, correspondiendo a mes del período cálido y al frío, respectivamente, con el objetivo de llevar un registro y detectar un día con las condiciones climáticas similares a las del día típico de verano e invierno, que sirvan para utilizar en la simulación de escenarios.

Tabla 13.

Temperatura del aire y humedad relativa del día típico de verano e invierno

Hora	Temperatura (°C)		Humedad Relativa (%)	
	18 enero	26 agosto	18 enero	26 agosto
1	11.9	24.6	64	71
2	11.3	23.8	69	74
3	10.6	23.4	70	75
4	10.3	22.9	72	76
5	9.9	22.6	76	80
6	9.7	22.6	75	84
7	9.7	23.8	72	77
8	11.1	25.2	71	73
9	13.4	26.6	65	72
10	15.8	27.8	54	64
11	18.1	28.9	45	57
12	19.7	29.8	40	54
13	20.5	30.4	41	53

Continúa

Temperatura (°C)			Humedad Relativa (%)	
14	21	30.7	38	53
15	21	30.8	37	55
16	20.2	30.5	39	56
17	18.8	29.9	42	57
18	17.4	28.9	53	59
19	16.7	27.9	54	62
20	16	27.3	55	69
21	15.3	26.6	58	71
22	14.6	26	61	73
23	13.9	25.4	64	83
24	13.2	24.8	69	89

Nota. Elaborada a partir de datos de archivo EPW

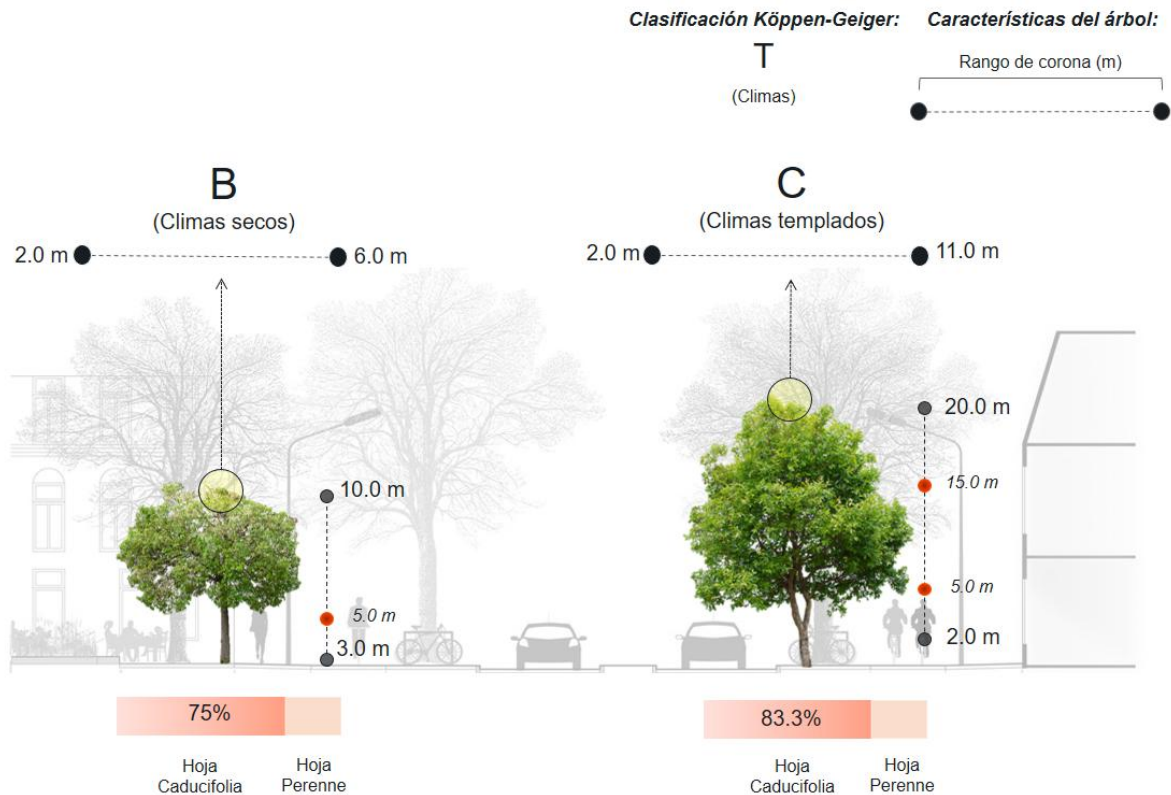
### **3.6.2. Selección de la vegetación y materiales**

Las diferentes estrategias de vegetación, según la literatura, incluyen árboles, césped, arbustos o combinaciones. Sin embargo, el uso de árboles es la estrategia más común en los artículos revisados, con un 79,2 % del total. Para tomar decisiones informadas sobre la gestión de los árboles, es necesario comprender mejor el potencial de enfriamiento de los árboles urbanos y sus características estructurales específicas según el clima, como en el presente caso. Este conocimiento puede ayudar a determinar dónde y cómo plantar árboles para garantizar los máximos beneficios de enfriamiento para los residentes urbanos (Helletsgruber et al., 2020).

La Figura 23 detalla las especificaciones encontradas en la literatura de la estructura arbórea para dos zonas climáticas. Para el clima B (seco), el rango de altura de los árboles es de 3.0 m a 10.0 m. El ancho de sus copas presenta valores específicos dentro de un rango que abarca desde los 2.0 m hasta los 6.0 m. En cuanto a la composición, la comunidad de árboles incluye una mezcla de especies de hoja caducifolia (75%) y perenne (25%). Para el clima C (templado), los árboles son de mayor tamaño, con un rango de altura que va desde los 2.0 m hasta los 20 m. El ancho de las copas es también significativamente mayor, con valores entre los 2.0 m a los 11.0 m. Al igual que en la zona seca, en esta zona templada coexisten especies de hoja caducifolia (83.3 %) y perenne (16.7%). Estos parámetros son esenciales para configurar con precisión modelos de microclima en herramientas de simulación, ya que

la altura, el diámetro de copa y el tipo de follaje son determinantes en la sombra, la evapotranspiración y la interacción con el viento.

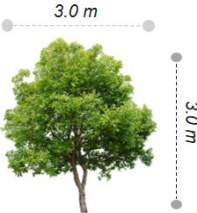

Figura 23.  
Características de los árboles de sombreado según el clima



Nota. Elaborada a partir de la información de Forouzandeh, (2021), Fischer et al. (2022), Gatto et al. (2021), Detommaso et al. (2021), Mostofi et al. (2021) y Arghavani et al. (2020).

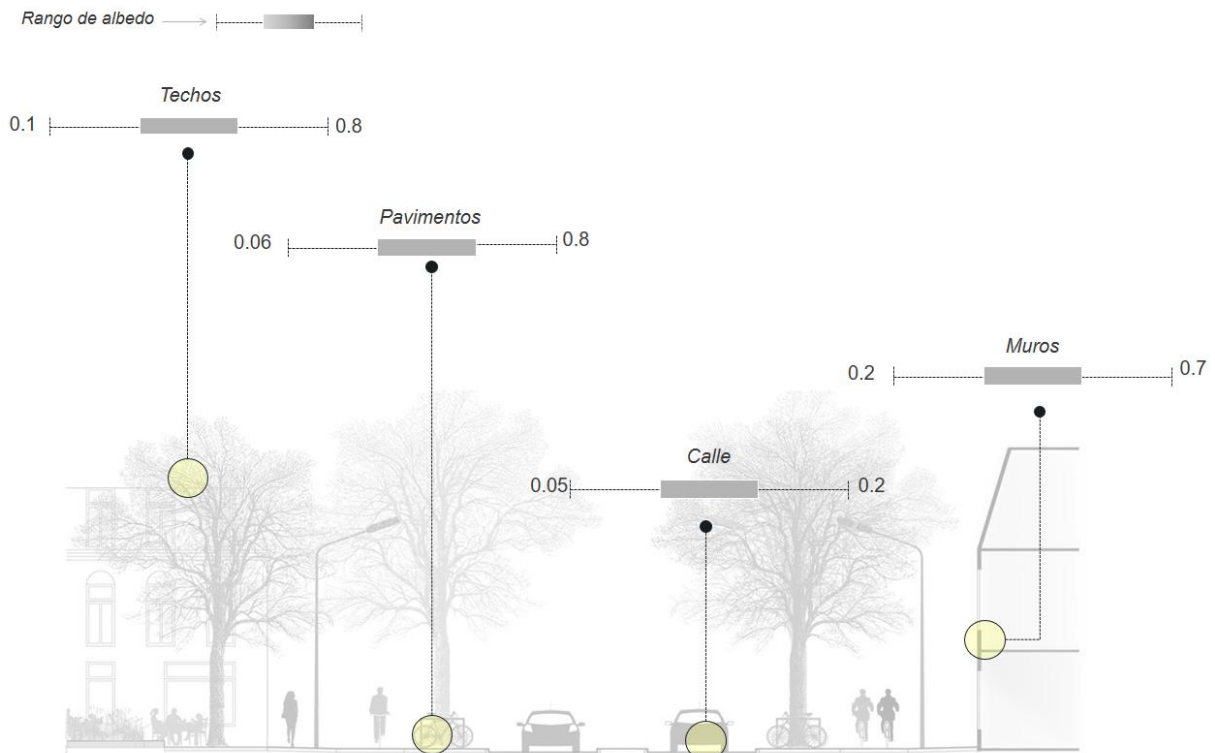
Además de la revisión de la literatura, para la elección de la vegetación de la presente investigación se revisó en el Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población (PDUCP) de Ensenada, apartado 5.4.3 Vegetación terrestre. Tal apartado expone que en el área de estudio existen especies vegetales que se encuentran bajo algún estatus de protección, así como especies endémicas –que solo existen en la localidad o la región de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2001 (NOM-059-ECOL-2001). Por esta razón, además de sus características estructurales (Tabla 14), fue seleccionado como árbol de sombreado *Cupressus forbesii* (Ciprés) (Santos et al., 2019).

**Tabla 14.**  
*Características de la vegetación utilizada en los escenarios de simulación*

Especie	Fructificación	Dosel	Tipo de hoja	Altura (m)	Ancho de la corona (m)
 <i>Cupressus forbesii (Cipres)</i>	 Otoño	Columnar o redondeado	Perenne	3.0	3.0

Con el objetivo traer un efecto de enfriamiento a las áreas de estudio, se revisó en la literatura los rangos de albedo simulados en las superficies para la selección de las características de los materiales. Como se muestra en la Figura 24, a nivel de techos el rango de albedo corresponde entre 0.1 a 0.8, en pavimentos de 0.6 a 0.8, en las calles de 0.05 a 0.2 y en muros de 0.2 a 0.7.

**Figura 24.**  
*Rangos de albedo de las superficies utilizadas en la literatura*



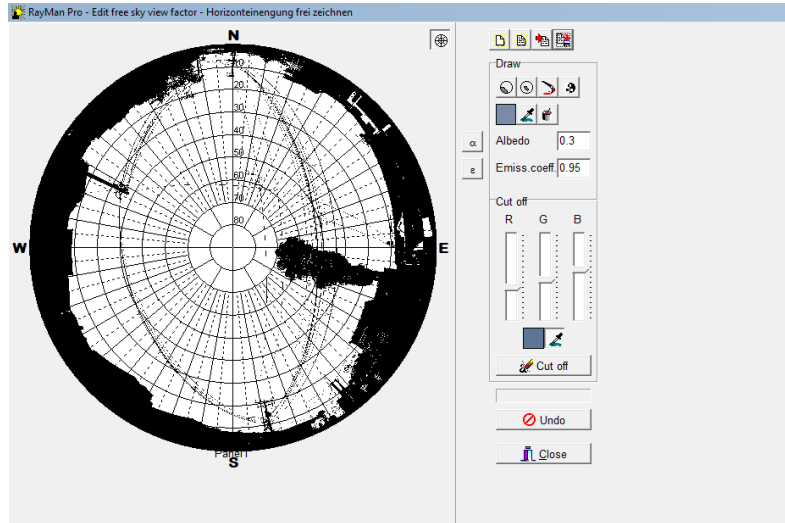
Nota. Elaborada a partir de la información de Forouzandeh, (2022), Fischer et al. (2022), Gatto et al. (2021), Detommaso et al. (2021), Mostofi N. et al. (2021) y Arghavani et al. (2020).

En la presente investigación se eligió estudiar los pavimentos de las calles, ya que esta superficie corresponde en su mayoría al 85% porcentaje del área impermeable en las áreas de estudio. Las características de los demás materiales se homologaron a las condiciones actuales. En cuanto a los valores de albedo seleccionados en esta superficie fueron de 0.3 (pavimentos actuales) y 0.5 (pavimento de alto albedo), para evaluar el potencial de los pavimentos fríos como una estrategia de mitigación, permitiendo cuantificar los beneficios térmicos de actualizar las normativas de pavimentación o de emprender programas de renovación de superficies, lo que proporciona a los tomadores de decisiones evidencia concreta para impulsar estrategias factibles y de alto impacto local. Lo anterior se definió en concordancia con rangos reportados y su SRI correspondiente, a fin de asegurar reproducibilidad y comparación entre estudios.

### **3.6.3. *Diseño de escenarios***

Para cuantificar el impacto de diferentes estrategias en la mejora de los parámetros microclimáticos locales, se diseñaron 6 escenarios y 1 caso base por unidad de análisis. El caso base (CB), presenta las condiciones actuales del respectivo fraccionamiento, en ambos casos se presentan calles de concreto y una mínima cantidad de vegetación, parámetros determinados a partir del trabajo de campo y el SVF, el cuál es calculado en el software RayMan, programa informático desarrollado sobre la base de los estándares de meteorología ambiental VDI 3787 y 3789 de la Asociación de Ingenieros Alemanes (Gál y Kántor, 2020). Para modelos numéricos hay diferentes formas de determinar el SVF. Una de las características principales de RayMan es la determinación de SVF en base a imágenes de ojo de pez (método correspondiente a el presente caso de estudio), distinguiendo entre el área cubierta por obstáculos y el área que muestra el cielo (Figura 25). Esto se puede hacer insertando una cuadrícula polar superpuesta y contando las células libres y cubiertas (Matzarakis et al., 2010). SVF varía de 0 a 1, que representa un cielo completamente cubierto por un terreno u otros obstáculos y un cielo libre, respectivamente (Sabrin et al., 2021).

Figura 25.  
 Software RayMan para cálculo de SVF a partir de imagen de ojo de pez



En el Fracc. del Sol, el escenario CB-A presenta un cambio en el pavimento convencional, es decir, de bajo albedo (0.3), por uno de mayor albedo (0.5), así como la eliminación de cualquier tipo de vegetación. El escenario CB-B presenta la eliminación de la vegetación existente, manteniendo las mismas características del caso base. El escenario CB-1-A es una combinación entre el cambio de pavimento de bajo albedo (0.3) por uno de mayor albedo (0.5) en las calles y una adición de 102 árboles *Cupressus forbesii* a cada 7.0 m, respetando las entradas para automóviles a su residencia. En el escenario CB-1-B se mantuvo un pavimento de bajo albedo (0.3) en las calles y añadió un total de 102 árboles *Cupressus forbesii* a cada 7.0 m, respetando las entradas para automóviles a su residencia. El escenario CB-2-A presenta una combinación entre el cambio de pavimento de bajo albedo (0.3) por uno de mayor albedo (0.5) en las calles y una adición de 204 árboles *Cupressus forbesii* a cada 7.0 m, respetando las entradas para automóviles a su residencia. Por último, en el escenario CB-2-B se mantuvo un pavimento de bajo albedo (0.3) en las calles y añadió un total de 204 árboles *Cupressus forbesii* a cada 7.0 m, respetando las entradas para automóviles a su residencia (Tabla 15).

Tabla 15.  
Características de escenarios de simulación en Fracc. del Sol

Escenarios		Especie vegetación	Núm.	LAI Configuración vegetación	Material	Albedo
<b>CB</b>	Caso base	Vegetación actual	n/a	n/a	Concreto	0.30
<b>CB-A</b>	Cambio de pavimento	Sin vegetación	n/a	n/a	Concreto	0.50 <sup>a</sup>
<b>CB-B</b>	- vegetación	Sin vegetación	n/a	n/a	Concreto	0.30
<b>CB-1-B</b>	+ vegetación	Cupressus forbesii	102	3.0 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	Concreto	0.30
<b>CB-1-A</b>	Cambio de pavimento y + vegetación	Cupressus forbesii	102	3.0 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	Concreto	0.50 <sup>a</sup>
<b>CB-2-B</b>	Adición de vegetación	Cupressus forbesii	204	6.0 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	Concreto	0.30
<b>CB-2-A</b>	Cambio de pavimento y +vegetación	Cupressus forbesii	204	6.0 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	Concreto	0.50 <sup>a</sup>

Fuente: <sup>a</sup> Tsoka et al. (2017)

Para el Fracc. Pedregal Playitas, el escenario CB-A presenta un cambio en el pavimento convencional, es decir, de bajo albedo (0.3), por uno de mayor albedo (0.5), así como la eliminación de cualquier tipo de vegetación. El escenario CB-B presenta la eliminación de la vegetación existente, manteniendo las mismas características del caso base. El escenario CB-1-A es una combinación entre el cambio de pavimento de bajo albedo (0.3) por uno de mayor albedo (0.5) en las calles y una adición de 142 árboles *Cupressus forbesii* a cada 7.0 m, respetando las entradas para automóviles a su residencia. En el escenario CB-1-B se mantuvo un pavimento de bajo albedo (0.3) en las calles y añadió un total de 142 árboles *Cupressus forbesii* a cada 7.0 m, respetando las entradas para automóviles a su residencia. El escenario CB-2-A presenta una combinación entre el cambio de pavimento de bajo albedo (0.3) por uno de mayor albedo (0.50) en las calles y una adición de 284 árboles *Cupressus forbesii* a cada 7.0 m, respetando las entradas para automóviles a su residencia. Por último, en el escenario CB-2-B se mantuvo un pavimento de bajo albedo (0.30) en las calles

y añadió un total de 284 árboles *Cupressus forbesii* a cada 7.0 m, respetando las entradas para automóviles a su residencia (Tabla 16).

Tabla 16.  
Características de escenarios de simulación en Fracc. Pedregal Playitas

Escenarios		Especie vegetación	Núm.	Altura corona	Ancho corona	Material	Albedo
<b>CB</b>	Caso base	Vegetación actual	n/a	n/a	n/a	Concreto	0.30
<b>CB-A</b>	Cambio de pavimento	Sin vegetación	n/a	n/a	n/a	Concreto	0.50 <sup>a</sup>
<b>CB-B</b>	- vegetación	Sin vegetación	n/a	n/a	n/a	Concreto	0.30
<b>CB-1-B</b>	+ vegetación	<i>Cupressus forbesii</i>	142	3 m	3 m	Concreto	0.30
<b>CB-1-A</b>	Cambio de pavimento y + vegetación	<i>Cupressus forbesii</i>	142	3 m	3 m	Concreto	0.50 <sup>a</sup>
<b>CB-2-B</b>	+ vegetación	<i>Cupressus forbesii</i>	284	3 m	3 m	Concreto	0.30
<b>CB-2-A</b>	Cambio de pavimento + vegetación	<i>Cupressus forbesii</i>	284	3 m	3 m	Concreto	0.50 <sup>a</sup>

Fuente: <sup>a</sup> Tsoka et al. (2017)

### 3.6.4. Simulación

En la presente investigación se utilizará el software ENVI-met versión 5.6.1, el cual trabaja a través de distintos módulos para simulación de escenarios. El proceso metodológico incluye la creación del proyecto de trabajo en el módulo *Manage projects and workspaces*; El modelado de los escenarios en *Spaces*; Introducción de parámetros climáticos y simulación de los escenarios en los módulos *ENVI-guide* y *ENVI-core*; La creación de especies de vegetación 3D en el módulo *Albero*; A partir de la obtención de datos microclimáticos de la simulación, se realizó un análisis del confort térmico en el módulo *Bio-met*; Finalmente la evaluación de los archivos mediante su visualización en mapas térmicos proporcionados por el módulo *Leonardo* (Figura 26).

Figura 26.  
Módulos de trabajo de ENVI-met



### 3.6.4.1. Modelo de simulación

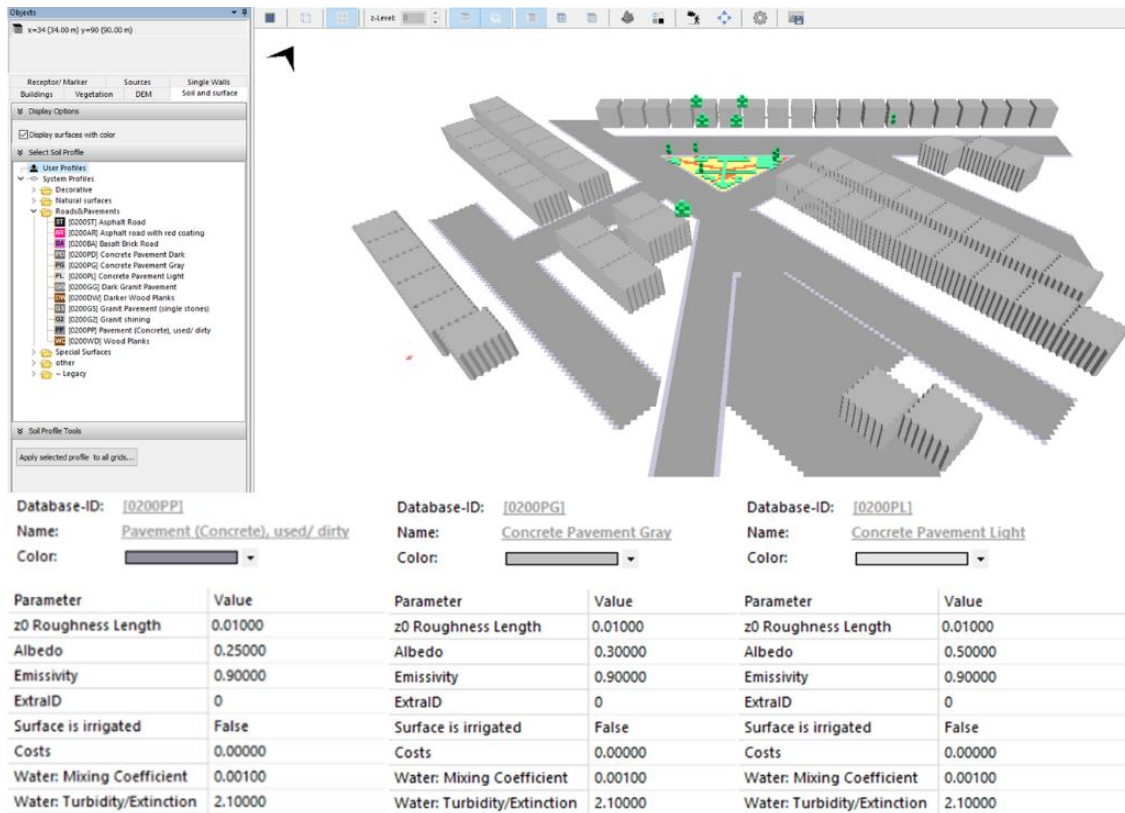
En el módulo *Manage Projects and Workspaces*, es decir administrar proyectos y espacios de trabajo, se creó la carpeta donde posteriormente, serían guardados los archivos de salida de la simulación. Esto incluye información sobre la atmósfera, receptores, superficies, vegetación, *Bio-met*, suelos, edificios, datos de entrada, acceso solar, sectores de viento, afluencia y objetos de ENVI. En el caso del presente trabajo, solo fue necesaria la información sobre la carpeta de atmósfera para analizar parámetros climáticos; *Bio-met* para analizar índices de confort térmico; y la carpeta de receptores para el análisis de puntos en específico del modelo de simulación.

El módulo *Spaces*, consistió en crear un modelo del fraccionamiento, para ello fue necesario en primera instancia, editar el área de trabajo, aquí se introdujeron datos

como la ciudad o coordenadas de la localización del modelo, las dimensiones de la retícula ( $x= 218$  m,  $y= 210$  m,  $z= 25$  m) y del tamaño de las celdas de la retícula ( $x=1$  m,  $y=1$  m,  $z=1$  m). Posterior a proporcionar los anteriores datos, se inició con el modelado escogiendo los materiales y vegetación pertinentes para la información a simular, así como la colocación de receptores en sitios específicos de recolección de datos. Las características de los pavimentos y distintas superficies fueron corroboradas en el módulo de *DB Manager*, donde se puede visualizar o modificar datos como el valor de albedo, emisividad, longitud de rugosidad y agua (coeficiente de mezcla y extinción de turbidez).

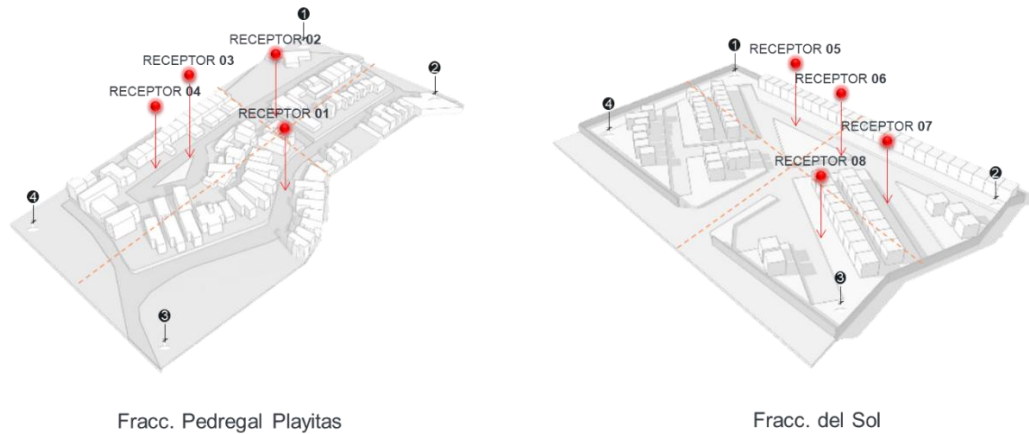
En este caso, se emplearon materiales disponibles en la base de datos del programa ENVI-met, seleccionados por su equivalencia con superficies urbanas comunes. Para las aceras se utilizó "Pavement (Concrete) used/dirty", con un valor de albedo de 0.25, que se asemeja al concreto envejecido o con suciedad acumulada, característico de banquetas en áreas urbanas consolidadas. Para los caminos se seleccionaron "Concrete pavement gray" y "Concrete pavement light", con valores de albedo de 0.30 y 0.50 respectivamente. El primero corresponde a un pavimento de concreto gris convencional, de uso frecuente en calles locales, mientras que el segundo es equivalente a superficies de pavimento frío, actualmente promovido como material de alta reflectancia para mitigar el calentamiento urbano. De esta manera, los materiales utilizados en las simulaciones reflejan condiciones realistas en el contexto de Ensenada y permiten extrapolar los resultados hacia estrategias factibles de implementación local (Figura 27).

**Figura 27.**  
 Modelado en Spaces de ENVI-met y especificaciones de los materiales



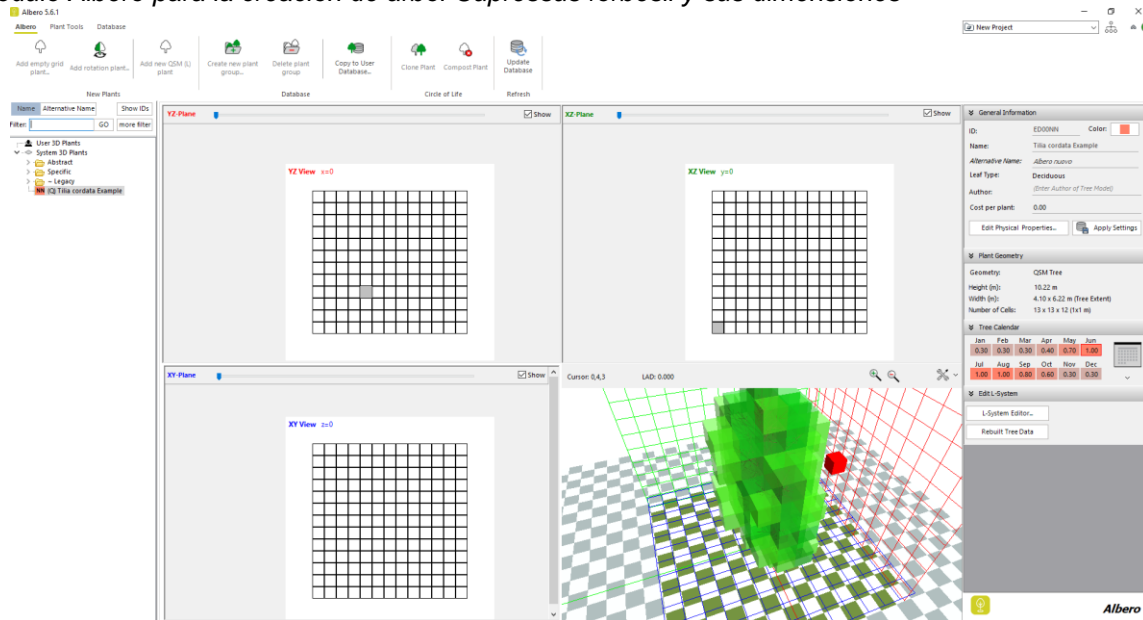
En los modelos de simulación fueron colocados receptores, que son puntos que contienen datos sobre el estado de esa área en el modelo, divididos en datos atmosféricos, de superficie/flujo y de suelo. Los archivos de datos del receptor se producen predeterminadamente cada 10 minutos y representan el estado general del receptor en el tiempo del modelo dado. Los datos de atmósfera y suelo se guardan como un archivo para cada salida individual que contiene la información para cada altura de celda. Para ambas unidades de análisis, fueron colocados cuatro receptores distribuidos en lugares estratégicos, donde se encontraban los puntos de monitoreo, para posteriormente realizar la validación del escenario CB (condiciones actuales) con lo monitoreado en campo, en cada fraccionamiento (Figura 28).

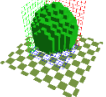
Figura 28.  
 Ubicación de receptores en modelos de simulación



El módulo *Albero*, sirvió para configurar vegetación, específicamente los árboles de sombreado "*Cupressus forbesii*" propuestos en los escenarios de simulación, con dimensiones de 3.0 m de ancho y alto. Una vez creados en el módulo, se actualizó la base de datos y fueron incorporados a *Spaces* (Figura 29).

Figura 29.  
 Módulo *Albero* para la creación de árbol *Cupressus forbesii* y sus dimensiones



Especie simulada	Tipo de hoja	Altura (m)	Diámetro del tronco (m)	Ancho de la corona (m)
 <i>Cupressus forbesii</i> (Cipres)	Perenne	3.0	N/A	3.0

### 3.6.4.2. Configuración de ENVI-met

Una vez modelado el escenario de simulación con todas las especificaciones, se procedió al módulo *ENVI-guide* donde fueron introducidos todos los parámetros de entrada antes de iniciar el proceso de simulación, como el día de inicio (18 de septiembre de 2023), duración total de 24 horas, hora de inicio (00:00 horas). Las condiciones meteorológicas fueron tomadas a través de los datos registrados en las mediciones de campo. Las condiciones de límite lateral fueron forzadas para la temperatura, humedad y viento; y cíclicas para la turbulencia (Tabla 17).

Tabla 17.  
Parámetros de entrada de ENVI-met

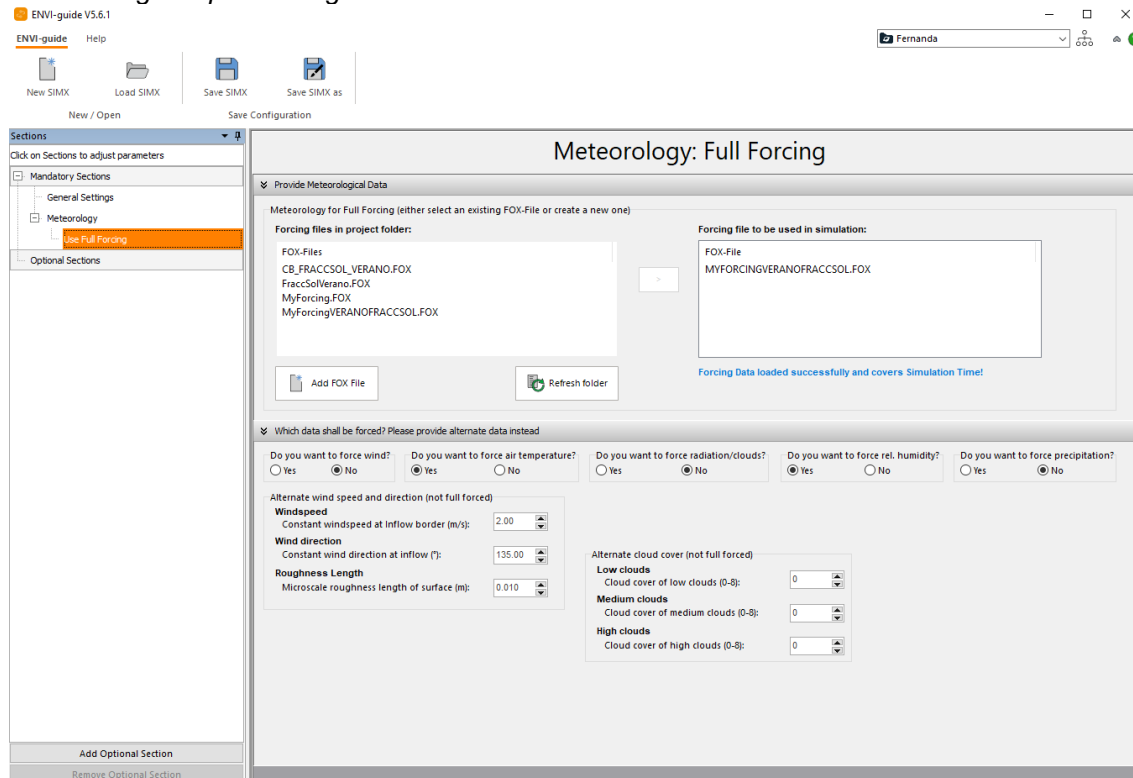
Parámetro	Definición	Valor de entrada
<b>Fracc. del Sol (24 horas)</b>		
<i>Localización</i>	Ensenada, Baja California, México	Latitud 31°54'15.7" N, Longitud 116°34'58.5" W
<i>Condiciones meteorológicas</i>	Temperatura de la atmosfera a 7m (°C)	19.4 (min.), 27.7 (max.)
	Humedad relativa en 7m (%)	49.0 (min.), 82.0 (max.)
	Velocidad del viento (m/s)	0.5 (min.), 3.5 (max.)
	Cobertura de nubes	0.00
<i>Información de edificios / carreteras</i>	Longitud de rugosidad en el punto de referencia (m)	0.010
	Ancho de la calle (m)	8.0
<i>Condiciones de límite lateral (LBC)</i>	LBC para temperatura, humedad y viento	Forzado
	LBC para turbulencia	Cíclico
<b>Fracc. Pedregal Playitas (24 horas)</b>		
<i>Localización</i>	Ensenada, Baja California, México	Latitud 31°52'22" N, Longitud 116°39'42" W
<i>Condiciones meteorológicas</i>	Temperatura de la atmosfera a 7m (°C)	17.2 (min.), 25.5 (max.)
	Humedad relativa en 7m (%)	64.1 (min.), 87.6 (max.)
	Velocidad del viento (m/s)	0.5 (min.), 3.5 (max.)
	Cobertura de nubes	0.00

Continúa

Parámetro	Definición	Valor de entrada
<i>Información de edificios / carreteras</i>	Longitud de rugosidad en el punto de referencia (m)	0.010
	Ancho de la calle (m)	8.0
<i>Condiciones de límite lateral (LBC)</i>	LBC para temperatura, humedad y viento	Forzado
	LBC para turbulencia	Cíclico

Como se menciona anteriormente, los datos climáticos fueron extraídos de los registros de la estación meteorológica colocada en campo. Estos datos fueron organizados en un archivo de extensión CVS para ser anexados directamente a la simulación de manera forzada. Una vez que fueron completadas las secciones obligatorias y de meteorología se procedió a situar donde guardar los datos de salida de la simulación (Figura 30).

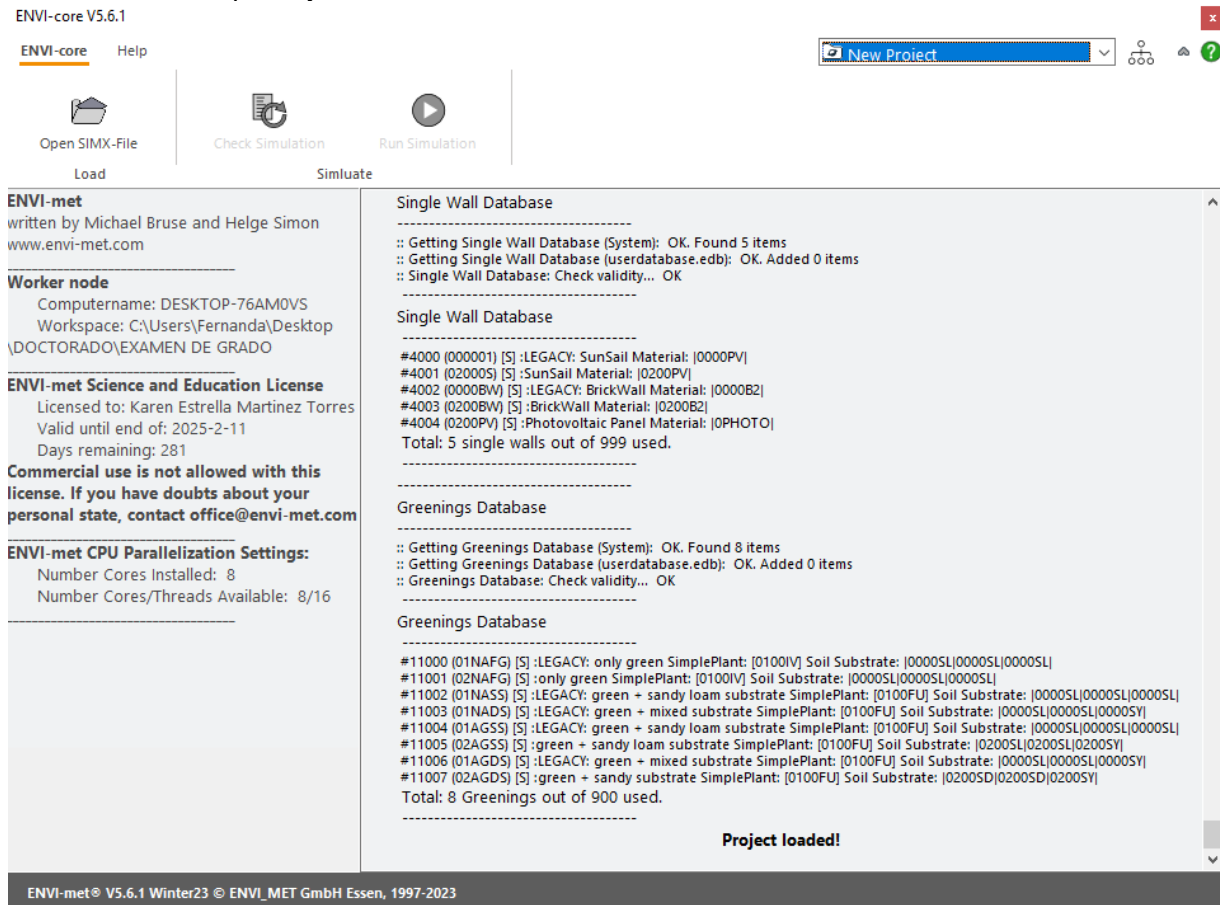
Figura 30.  
Módulo ENVI-guide para configuración de la simulación.



### 3.6.4.3. Ejecutar la simulación

Posterior a preparar las configuraciones de simulación con *ENVI-guide*, se procedió a iniciar la simulación dentro del módulo *ENVI-core*. Una vez seleccionado el archivo correspondiente, se verificó que la simulación no contaba con ningún tipo de problema en la plataforma para ejecutar la simulación del modelo. El tiempo de la simulación está sujeto a la capacidad de la computadora, las dimensiones del modelo y sus características. Una vez iniciado, empezará a guardar los datos de salida en la carpeta antes seleccionada (Figura 31).

Figura 31.  
Módulo *ENVI-core* para ejecutar la simulación

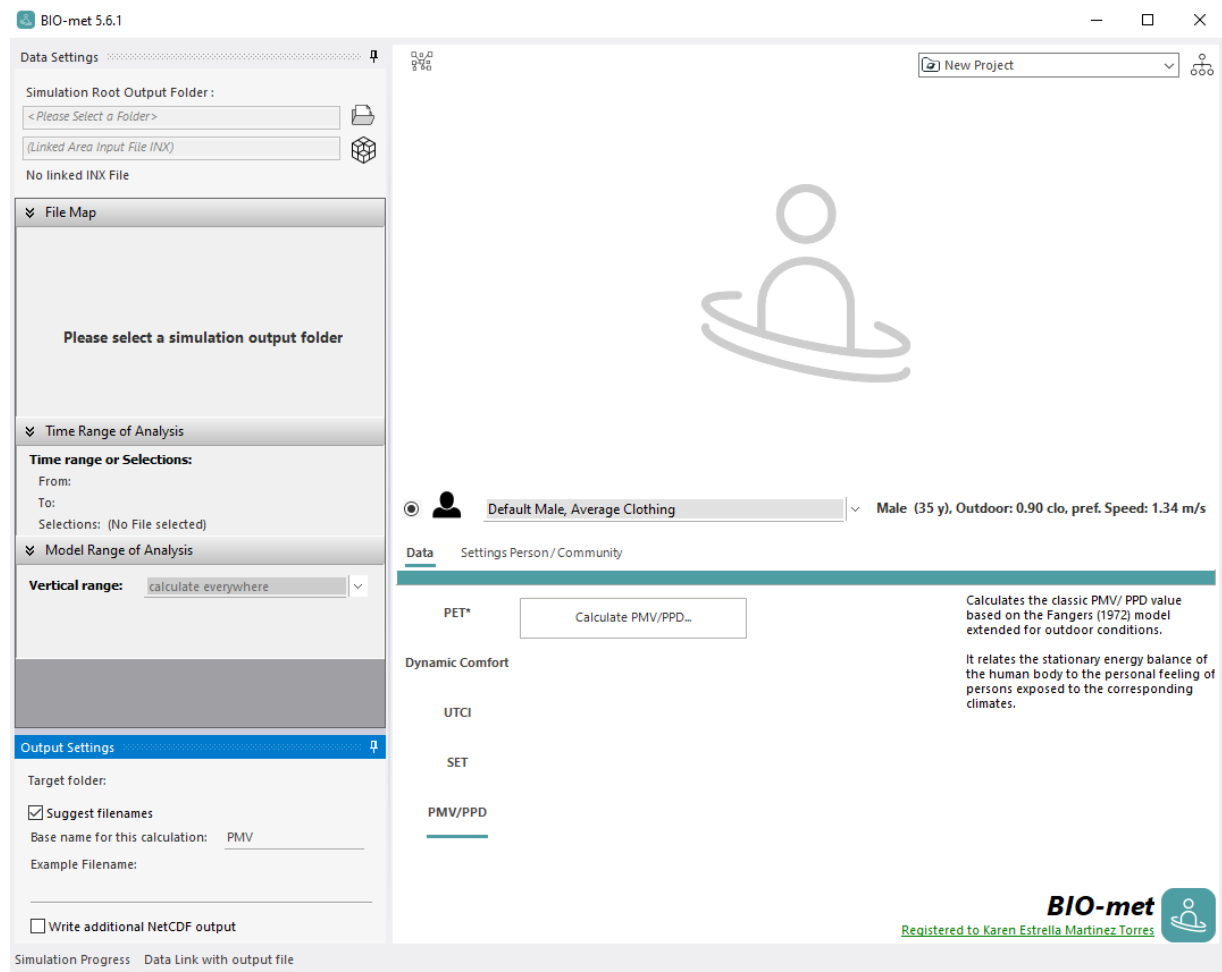


### 3.6.4.4. Análisis de resultados

Al finalizar la simulación se procedió al módulo post-procesador *BIO-met* para calcular índices de confort térmico humano a partir de archivos de salida del modelo. Aquí fue calculado el índice PET, el cual fue seleccionado para el análisis de la presente

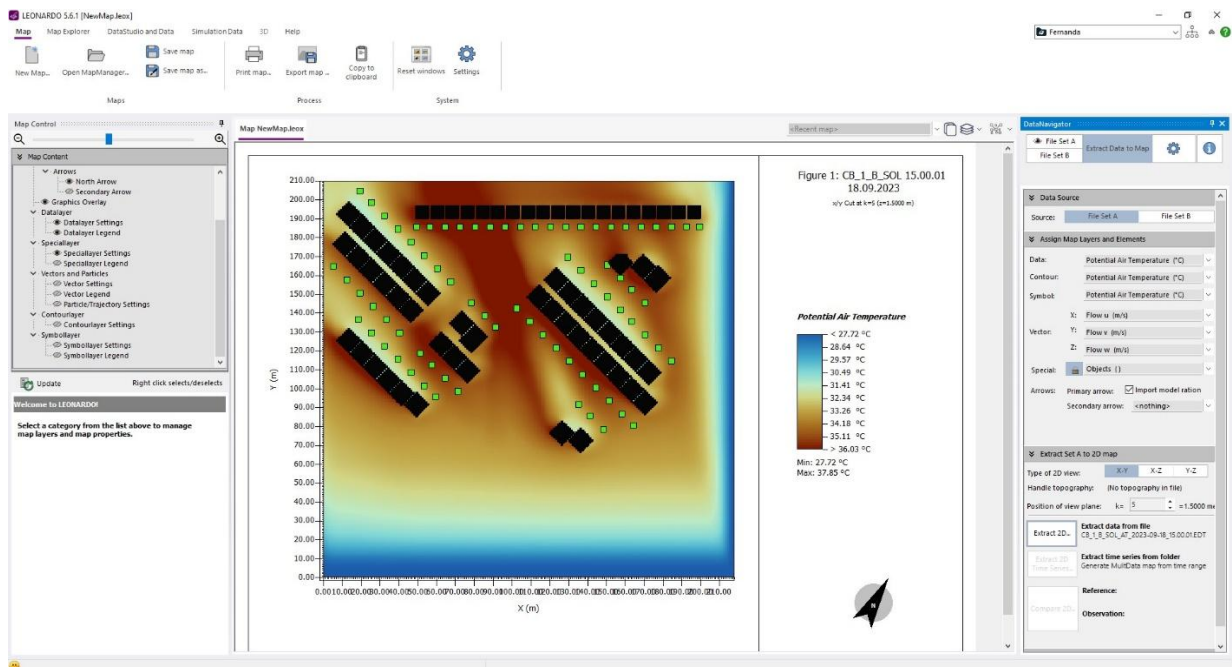
investigación. De forma predeterminada, la persona estándar ISO 7730, es decir un hombre de 35 años, con ropa de primavera/otoño (0.90 clo). Hay que tener en cuenta que la configuración individual no afecta a todos los índices de *BIO-met*. PET es el más avanzado de los indicadores implementados y reacciona en todas las configuraciones ajustables aquí. Los índices varían en su nivel de complejidad y por tanto en el tiempo de cálculo. Mientras que UTCI se basa en regresión y es rápido, PMV requiere la solución iterativa de una ecuación de balance de energía y PET requiere la solución de dos de ellas y, por lo tanto, requiere mucho más tiempo de cálculo. *BIO-met* admite el cálculo paralelo para acelerar las simulaciones (Figura 32).

Figura 32.  
Módulo *BIO-met* para calcular índices de confort térmico



Para la exploración de los resultados obtenidos en la presente investigación fueron utilizados modelos gráficos para el análisis de datos estadísticos, a través del módulo *Leonardo*. Aquí se pueden generar mapas térmicos, a partir de la selección de condiciones, como la variable climática, unidades, nivel de visualización (altura) y el horario. El módulo proporciona una amplia gama de diferentes herramientas de análisis de forma interactiva. Además, se puede acceder mediante scripts de Python. De esta manera fue posible proyectar el potencial de enfriamiento de los escenarios de simulación propuestos, haciendo una comparación con el caso base (condiciones actuales) (Figura 33).

*Figura 33.*  
*Módulo Leonardo para visualizar datos*



### 3.7. Validación del modelo de simulación

En estudios anteriores, se realizaron mediciones de campo para validar el modelo ENVI-met, comparando los valores simulados de un caso base con medidas tomadas en sitio (Abdi et al., 2020). Al igual que en los casos análogos revisados (Tabla 18), los datos registrados en la campaña de monitoreo sirvieron para validar el modelo propuesto. Para realizar esto es necesario calcular el error cuadrático medio (RMSE)

y error absoluto medio (MAE) de la *Tair* con cada uno de los receptores a 1.50 m, que de acuerdo a Zhao et al. (2018), suele encontrarse entre 1 y 2 °C.

*Tabla 18.*  
*Casos análogos*

<b>Autor/ año</b>	<b>Objeto</b>	<b>Variables</b>	<b>Métodos estadísticos</b>	<b>Instrumentos</b>
Salvati et al. (2021)	Albedo	Temperatura media radiante (MRT). Temperatura fisiológica efectiva (PET).	RMSE, MAE	Simulación (ENVI-met, Energyplus), Mediciones en campo.
Perera et al. (2021)	Índice del área foliar	Temperatura media del aire	RMSE, MAE	Simulación (ENVI-met) Mediciones en campo
Forouzandeh A. (2021)	Material superficial	Temperatura superficial	RMSE, MAE	Simulación (ENVI-met) Mediciones en campo

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

#### 4.1. Validación de escenarios base

Para analizar la validación del desempeño del modelo numérico en el Fracc. del Sol, se contrastó la curva de temperatura del aire a partir de los resultados de la simulación de ENVI-met de las 01:00 a las 23:00 h del 18 de septiembre del 2023, de los receptores 7 y 6 del CB; y de los datos registrados en el punto A y B en la campaña de monitoreo, a una escala peatonal de 1.50 m de altura. El RMSE y el MAE de la temperatura del aire del punto A con el receptor 7, fue de 1.2 y 1.0 respectivamente, mientras que el del punto B con el receptor 6 fue de 1.5 y 1.2 respectivamente. Tales resultados validan el modelo CB (Tabla 19).

Tabla 19.

Gráfico de ajuste de puntos monitoreados y el receptor simulado correspondiente el día 18 de septiembre del 2023 a escala peatonal (1.50 m) en el Fracc. del Sol.

Hora	Punto A Tair (°C)	CB Receptor 7 Tair (°C)	Punto B Tair (°C)	CB Receptor 6 Tair (°C)
01:00	19.8	19.2	19.8	19.0
02:00	20.0	19.1	20.0	18.8
03:00	19.8	18.9	19.8	18.6
04:00	19.7	18.7	19.7	18.5
05:00	19.8	18.7	19.7	18.5
06:00	19.7	18.8	19.6	18.6
07:00	19.7	19.7	19.7	19.5
08:00	20.7	21.9	21.6	21.8
09:00	22.6	24.7	22.4	25.1
10:00	27.4	27.8	26.4	28.6
11:00	28.7	30.0	28.1	30.9
12:00	29.2	31.0	30.2	32.7
13:00	29.1	31.5	30.5	33.5
14:00	29.8	32.0	32.0	34.2
15:00	31.5	32.0	32.7	34.2
16:00	31.1	30.1	31.2	32.3
17:00	29.8	27.9	29.6	29.6
18:00	26.1	25.8	26.5	26.8
19:00	23.1	23.1	23.0	23.7
20:00	20.8	21.4	20.7	21.9
21:00	19.6	20.1	19.5	20.4
22:00	18.7	19.3	18.7	19.5
23:00	17.9	18.6	18.2	18.8

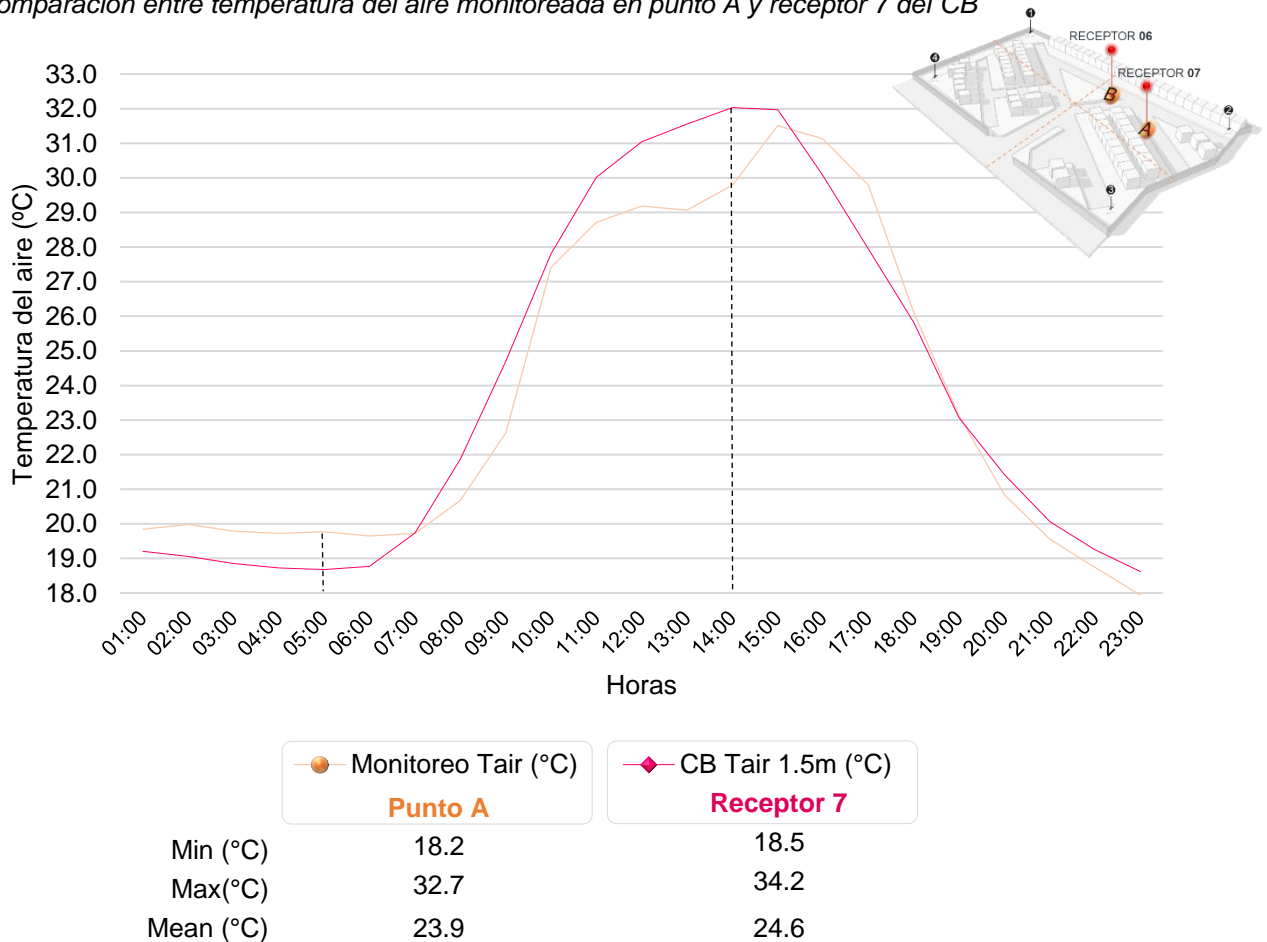
Monitoreo punto A - Receptor 7  
RMSE: **1.23**      MAE: **1.0**

Monitoreo punto B - Receptor 6  
RMSE: **1.55**      MAE: **1.29**

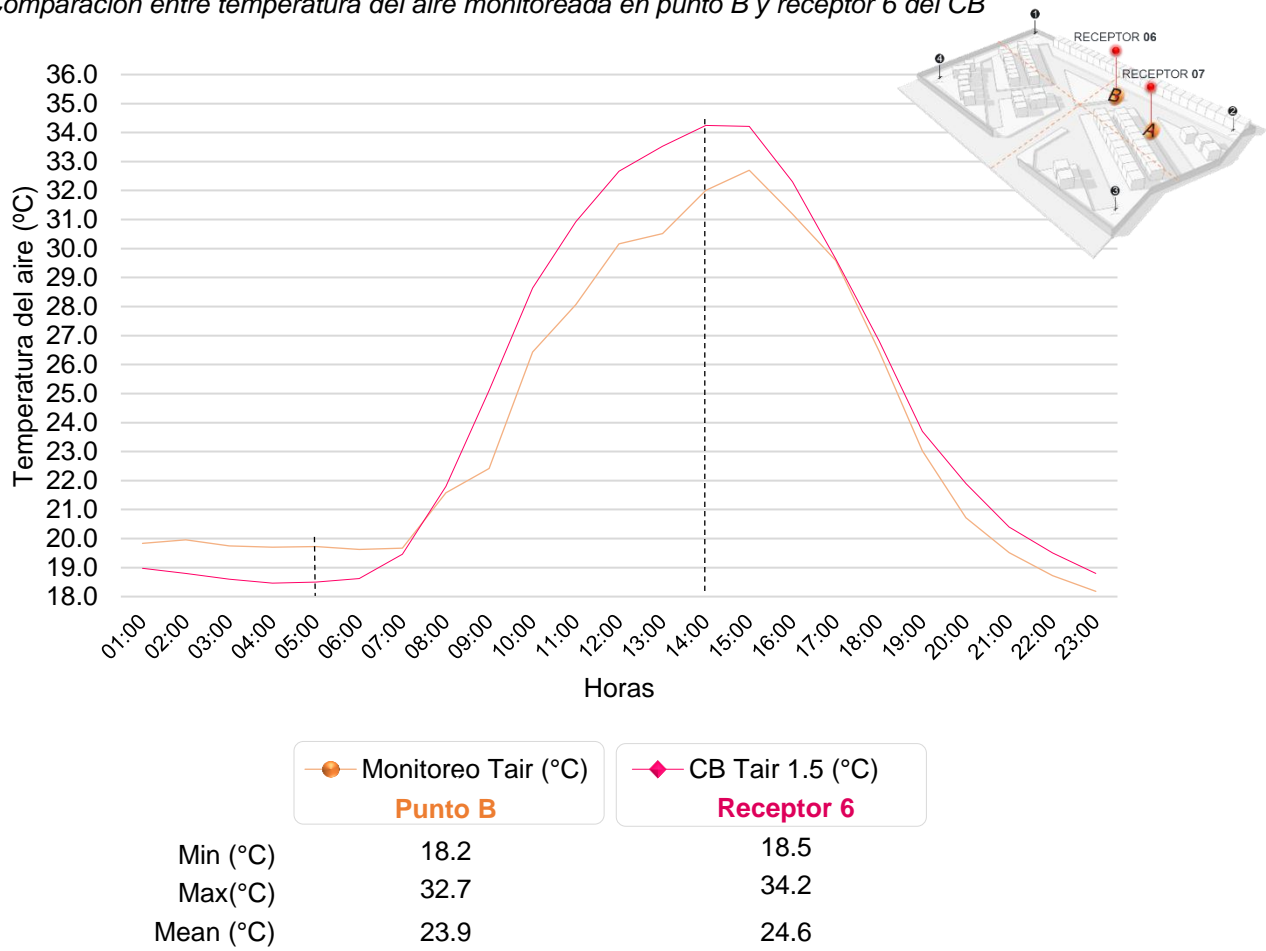
La temperatura observada en los resultados de las 01:00 a las 23:00 h del 18 de septiembre del 2023, oscila en un rango entre los 18.6 °C a los 32.0 °C para el caso del punto A en comparación del receptor 7 (Figura 34); y un rango entre los 17.9 °C a los 34.2 °C para el caso del punto B en comparación del receptor 6 (Figura 35). Estas diferencias de valores entre puntos se le atribuye al contexto donde se encontraban los registradores, ya que el punto A se encontraba cerca de la acera y un estacionamiento con superficie de concreto, mientras que el punto B se encontraba suspendido en el centro de un árbol *Ficus Benjamina* en una superficie de terracería. Por ende, ambos receptores mostraron diferencias entre sí.

Figura 34.

Comparación entre temperatura del aire monitoreada en punto A y receptor 7 del CB



**Figura 35.**  
 Comparación entre temperatura del aire monitoreada en punto B y receptor 6 del CB



Al igual que en el anterior fraccionamiento, como se muestra en la Tabla 20, para analizar la presente validación del desempeño del modelo numérico en el Fracc. Pedregal Playitas, se contrastó la curva de temperatura del aire a partir de los resultados de la simulación de ENVI-met de las 01:00 a las 23:00 h del 18 de septiembre del 2023 de los receptores 3 y 1 del caso base; y de los datos registrados en el punto A y D en la campaña de monitoreo el mismo día, a una escala peatonal de 1,5 m de altura. El RMSE y el MAE de la temperatura del aire del punto A con el receptor 3, fue de 1.5 y 0.9 respectivamente, mientras que el del punto D con el receptor 1 fue de 1.5 y 1.0 respectivamente. Tales resultados demostraron que el caso base se encuentra en el rango estipulado en la literatura, como para considerarse óptimo y obtener información con veracidad.

Tabla 20.

Gráfico de ajuste de puntos monitoreados y el receptor simulado correspondiente, el día 18 de septiembre del 2023 a escala peatonal (1.50 m) en el Fracc. Pedregal Playitas.

Hora	Punto A Tair (°C)	CB Receptor 3 Tair (°C)	Punto D Tair (°C)	CB Receptor 1 Tair (°C)
01:00	19.6	19.4	19.5	19.5
02:00	19.5	19.3	19.5	19.4
03:00	19.2	19.1	19.2	19.1
04:00	19.0	19.0	19.1	19.1
05:00	18.9	18.9	18.9	18.9
06:00	19.0	18.9	19.1	19.0
07:00	19.7	19.7	19.6	19.5
08:00	21.5	21.3	21.0	21.0
09:00	22.9	23.9	22.8	23.4
10:00	23.3	26.9	24.0	26.3
11:00	24.5	27.3	24.7	27.0
12:00	25.2	28.1	25.1	28.0
13:00	25.7	28.5	26.0	28.5
14:00	26.0	26.0	26.8	26.3
15:00	26.5	26.6	25.6	27.1
16:00	25.1	27.7	24.7	28.4
17:00	24.2	26.4	24.0	27.2
18:00	22.5	24.9	23.1	25.5
19:00	22.1	22.2	22.3	22.6
20:00	20.6	20.7	21.2	21.0
21:00	19.6	19.5	19.6	19.7
22:00	18.9	18.8	18.9	19.0
23:00	18.2	18.3	18.5	18.5
Monitoreo punto A - Receptor 3 RMSE: <b>1.56</b>		Monitoreo punto D - Receptor 1 RMSE: <b>1.57</b>		MAE: <b>0.95</b>
				MAE: <b>1.00</b>

La temperatura observada en los resultados de las 01:00 a las 23:00 h del 18 de septiembre del 2023, oscila en un rango entre los 18.2 °C a los 26.5 °C para el caso del punto A en comparación del receptor 3 (Figura 36); y un rango entre los 18.5 °C a los 28.5 °C para el caso del punto D en comparación del receptor 3 (Figura 37). Estas diferencias de valores entre puntos se le atribuye a el contexto donde se encontraban los registradores, ya que el punto D se encontraba cerca de la acera y un estacionamiento con superficie de concreto, mientras que el punto A se encontraba suspendido en el centro de un árbol *Ficus Benjamina* en una superficie de terracería. Por ende, ambos receptores mostraron diferencias entre sí.

Figura 36.  
 Comparación entre temperatura del aire monitoreada en punto A y receptor 3 del CB

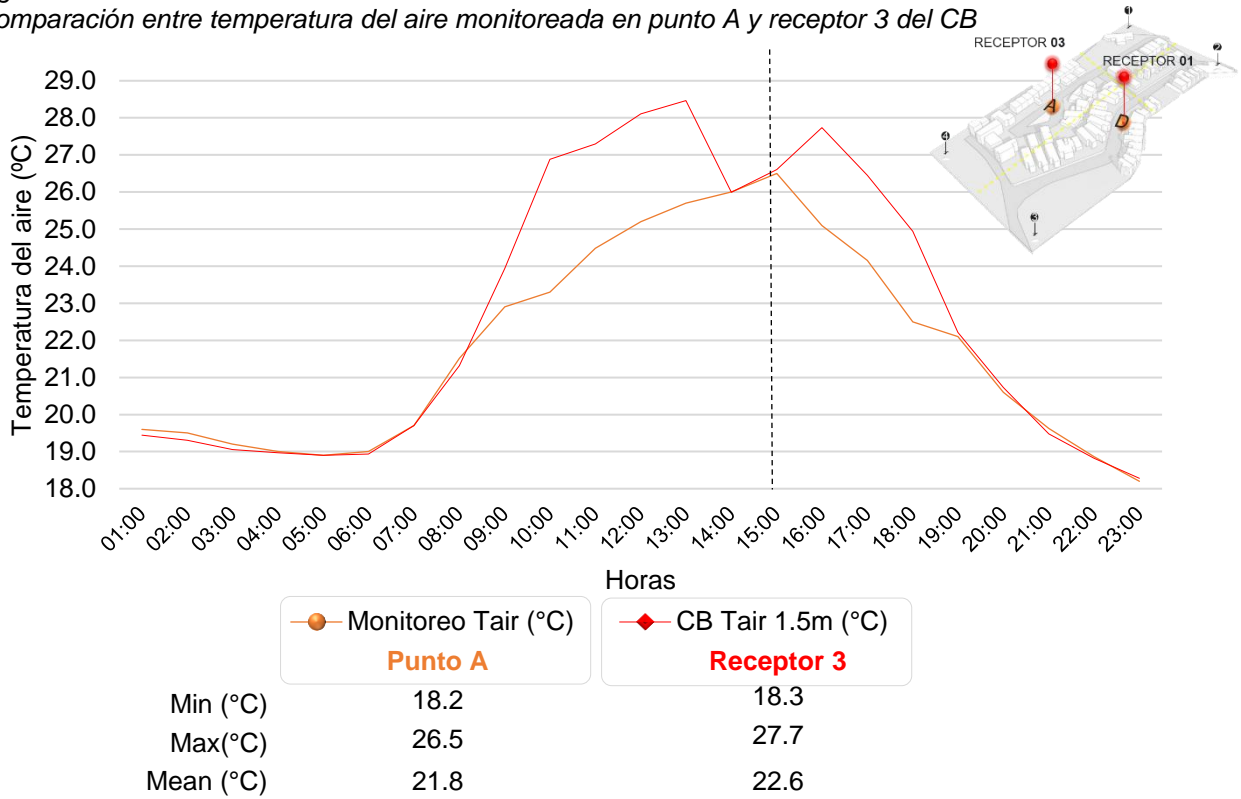
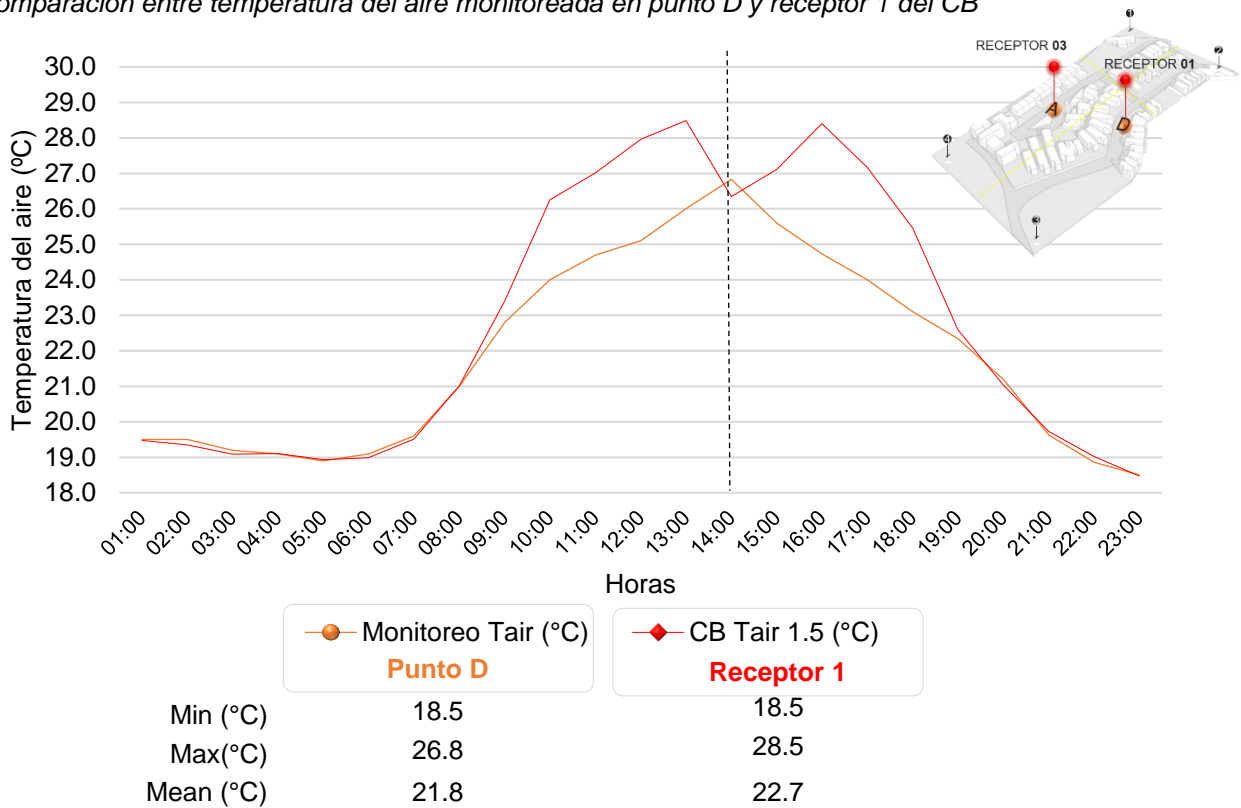


Figura 37.  
 Comparación entre temperatura del aire monitoreada en punto D y receptor 1 del CB



## 4.2. Escenarios de simulación

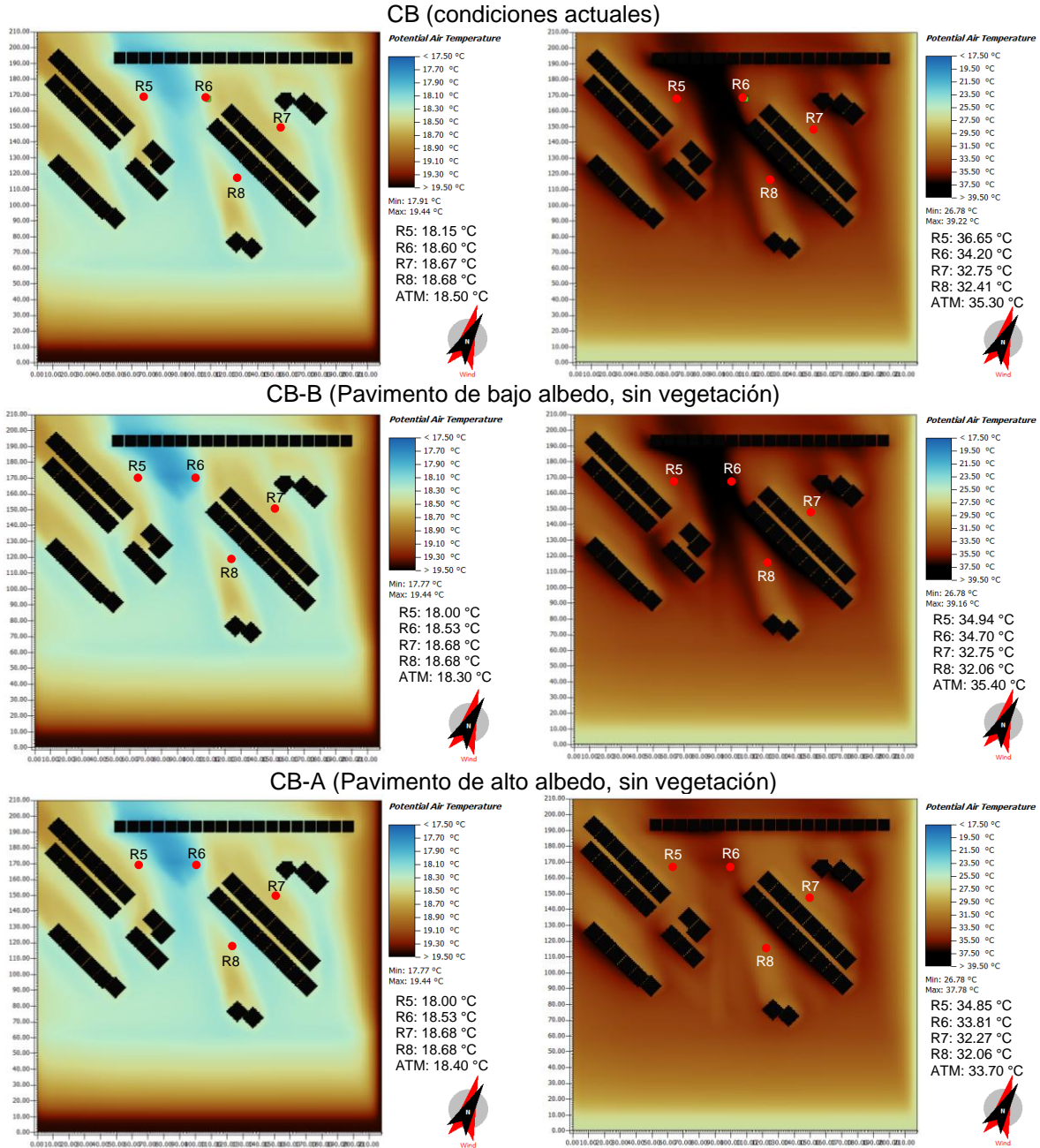
Para comparar cómo el valor de albedo de los materiales y el LAI de los árboles de sombreado influyen en los microclimas exteriores, fueron simulados un caso base y 6 escenarios en distintas estaciones para cada fraccionamiento. Tales escenarios, modelados en el software ENVI-met, fueron sometidos al microclima creado a través de los datos climáticos registrados el día 18 de septiembre del 2023 para caracterizar las condiciones de la temporada de verano y el día 23 de febrero del 2024 para caracterizar las condiciones de la temporada de invierno.

### 4.2.1. Escenarios de simulación Fracc. del Sol

En la Figura 38 se muestran los datos resultantes a nivel peatonal (1.50 m), a las 05:00 y 14:00 h, la hora más fría y cálida, respectivamente, extraídos en temporada de verano. A las 05:00 h, el receptor 5 mostró una temperatura menor en comparación de los demás receptores, en el CB se registró una temperatura de 18.1 °C, en el CB-B se registró 18.0 °C, en el CB-A se registró 18.0 °C, en el CB-1-B se registró 18.1 °C, en el CB-1-A se registró 18.1 °C, en el CB-2-B se registró 17.9 °C y en el CB-2-A se registró 17.9 °C. A las 14 h 00 horas, el receptor 5 mostró una temperatura mayor en comparación de los demás receptores, en el CB se registró una temperatura de 36.6 °C, en el CB-B se registró 34.9 °C, en el CB-A se registró 34.8 °C, en el CB-1-B se registró 36.6 °C, en el CB-1-A se registró 34.7 °C, en el CB-2-B se registró 37.4 °C y en el CB-2-A se registró 35.3 °C.

Figura 38.

Mapas térmicos de los escenarios de simulación en verano a las 05:00 h y 14:00 h a 1.50 m de altura

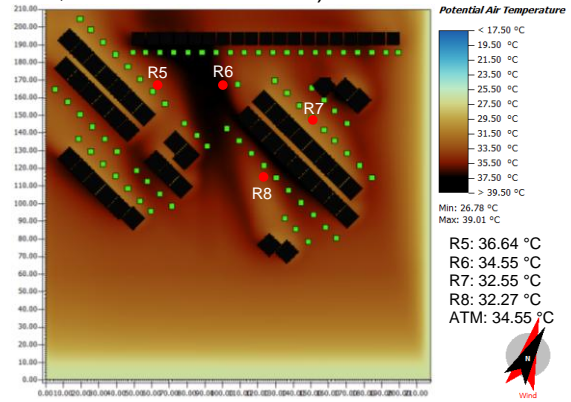
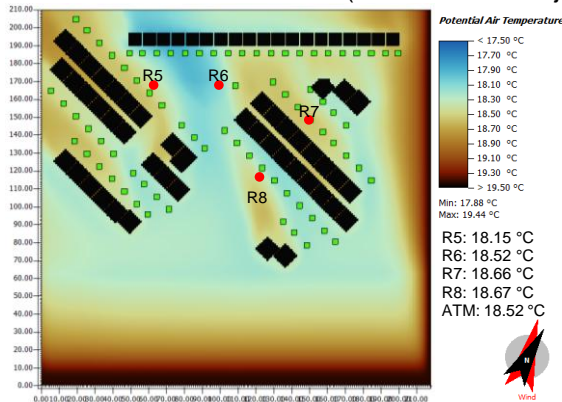


Continua

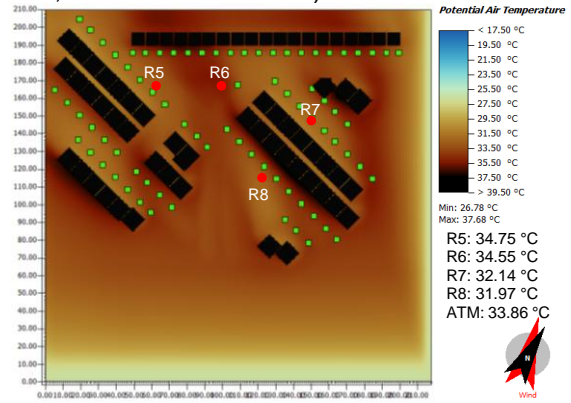
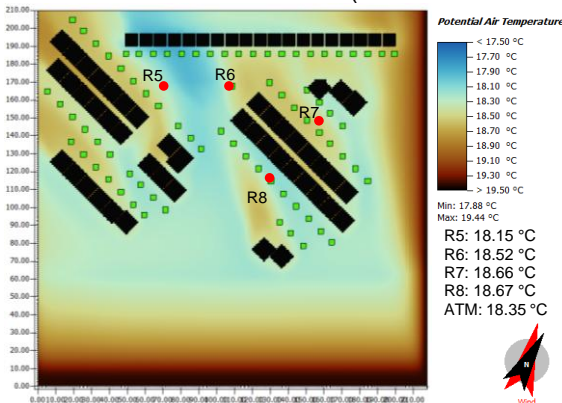
**05:00 h (1.50 m)**

**14:00 h (1.50 m)**

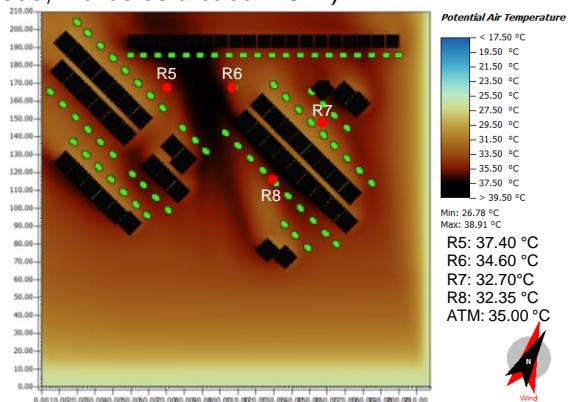
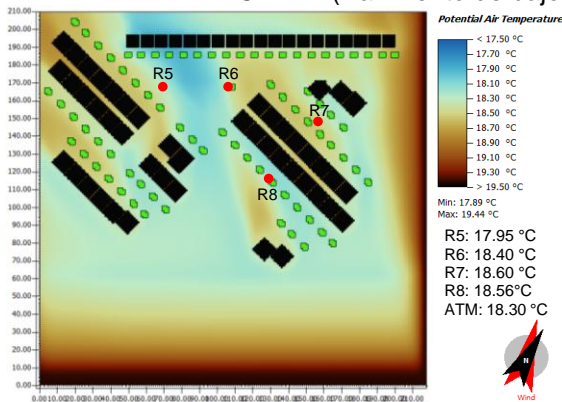
**CB-1-B (Pavimento de bajo albedo, 1 árbol a cada 7.0 m)**



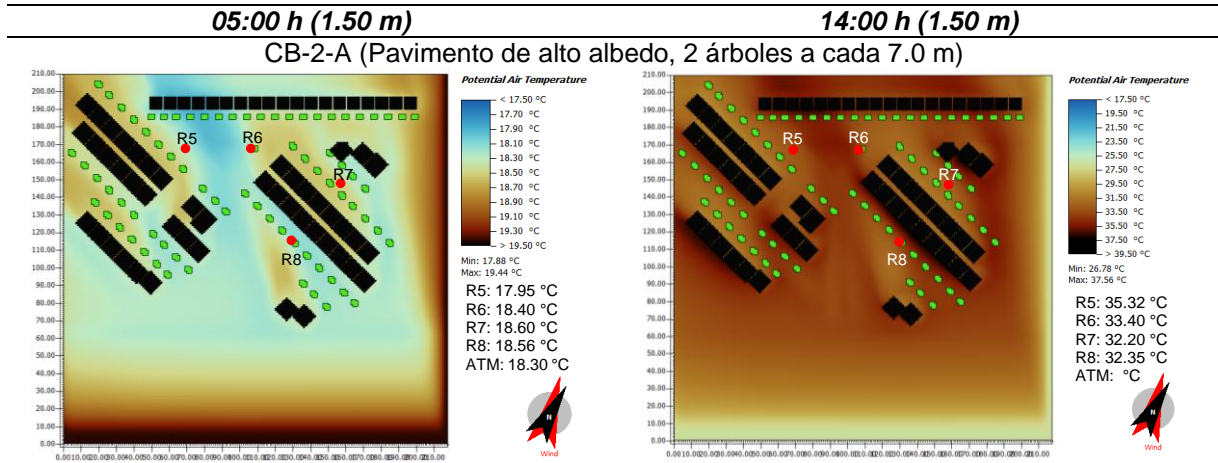
**CB-1-A (Pavimento de alto albedo, 1 árbol a cada 7.0 m)**



**CB-2-B (Pavimento de bajo albedo, 2 árboles a cada 7.0 m)**



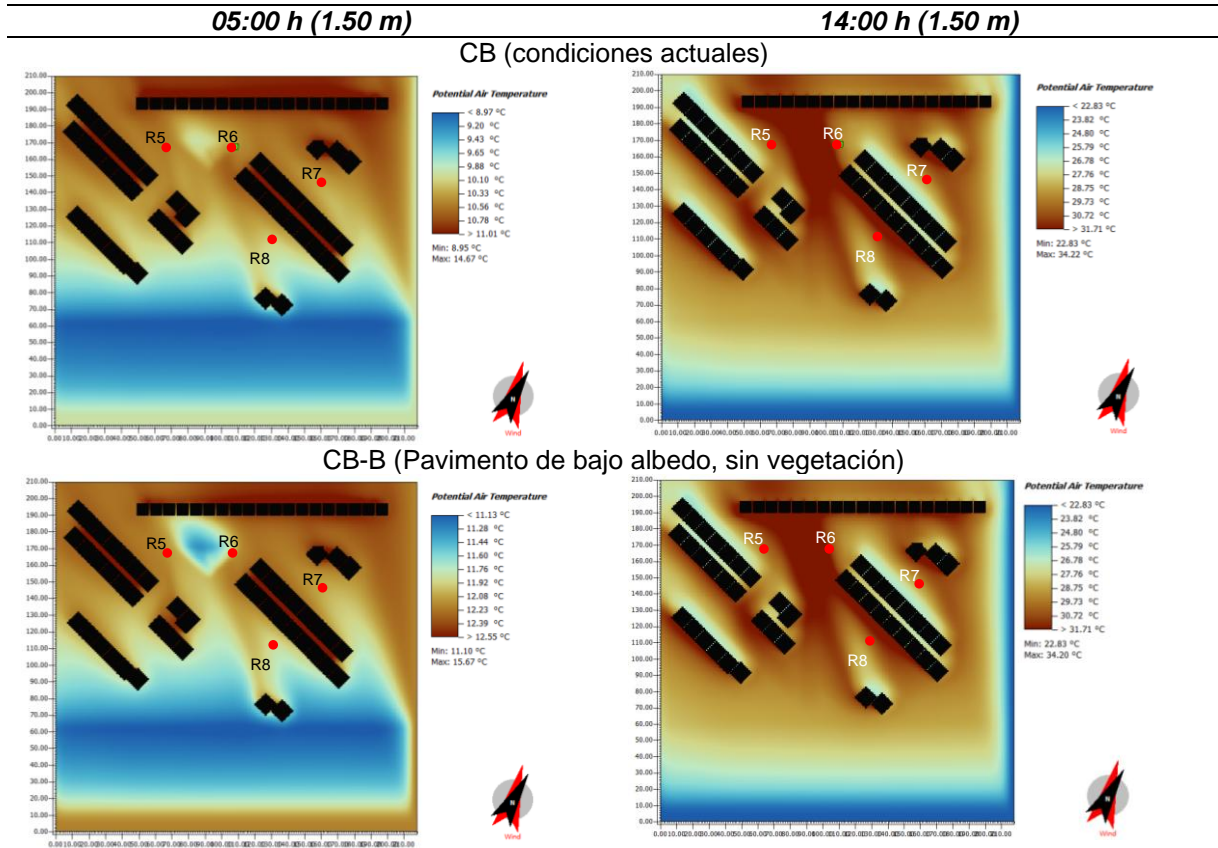
Continua



El presente análisis abarca los datos resultantes en temporada de invierno a nivel peatonal (1.50 m), a las 05 h 00 y 14 h 00, la hora más fría y cálida, respectivamente (Figura 39).

Figura 39.

Mapas térmicos de los escenarios de simulación en invierno a las 05:00 h y 14:00 h a 1.50 m de altura

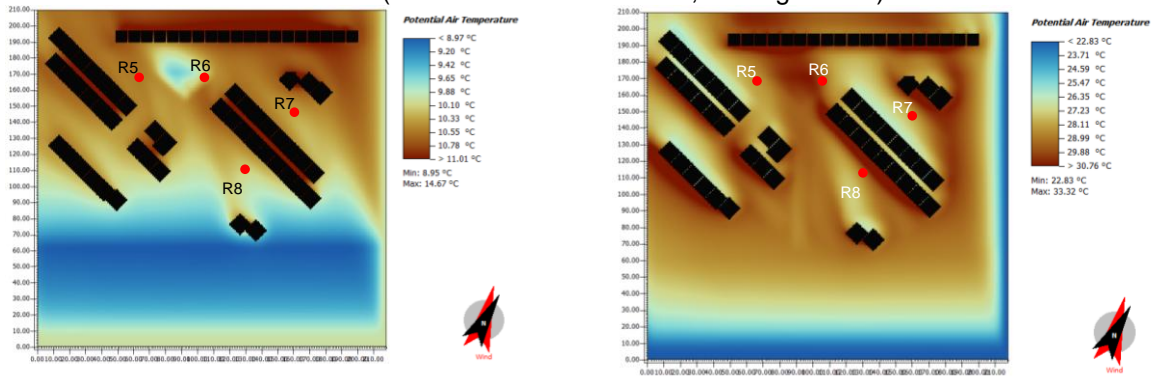


Continua

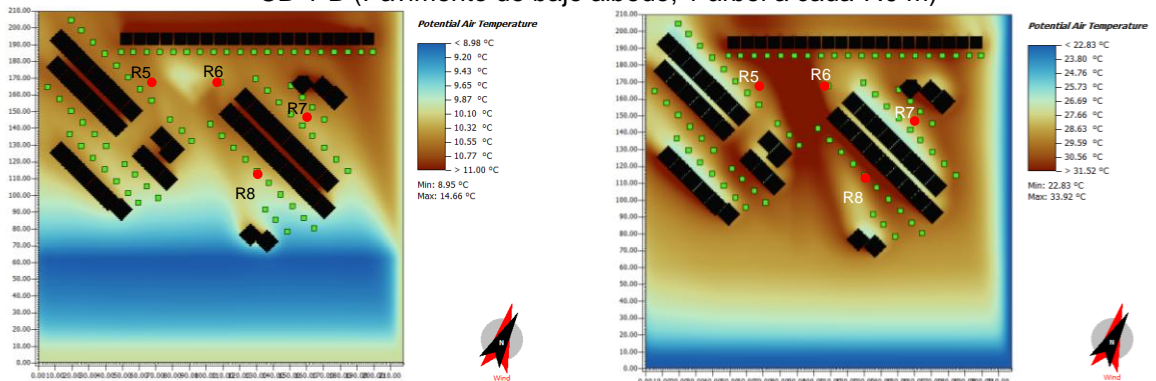
05:00 h (1.50 m)

14:00 h (1.50 m)

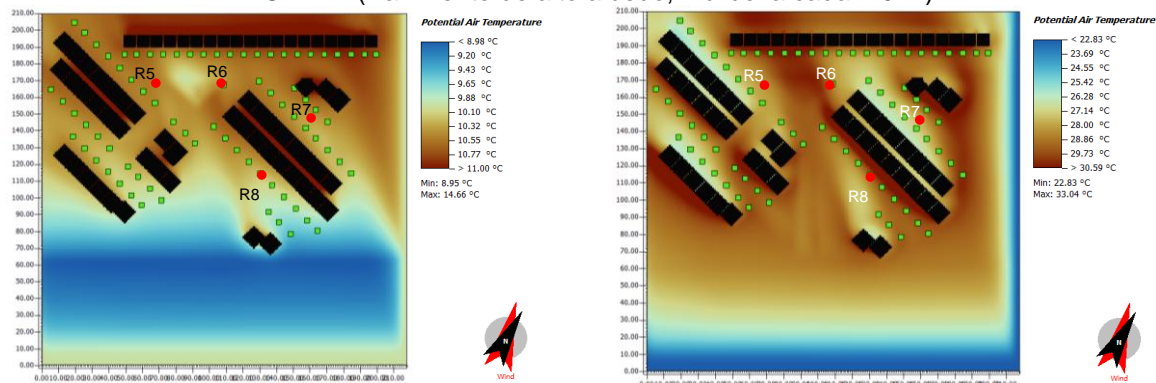
CB-A (Pavimento de alto albedo, sin vegetación)



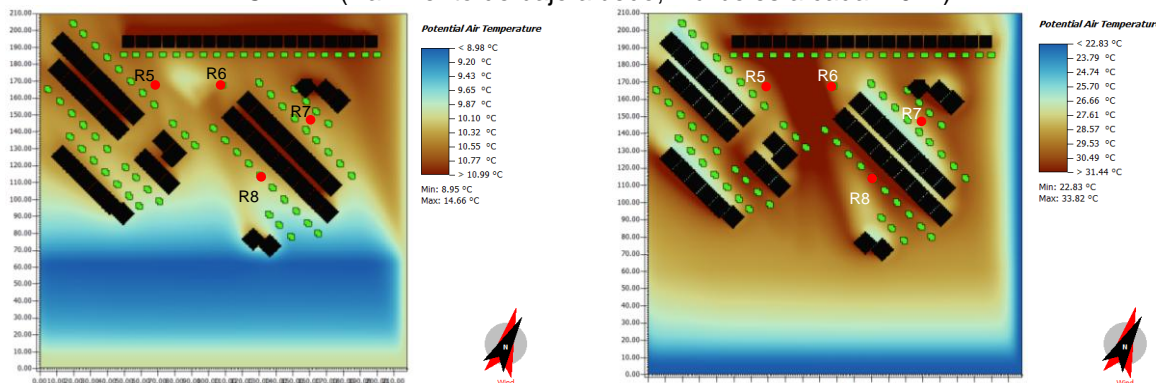
CB-1-B (Pavimento de bajo albedo, 1 árbol a cada 7.0 m)



CB-1-A (Pavimento de alto albedo, 1 árbol a cada 7.0 m)



CB-2-B (Pavimento de bajo albedo, 2 árboles a cada 7.0 m)



#### 4.2.2. Temperatura del aire Fracc. del Sol

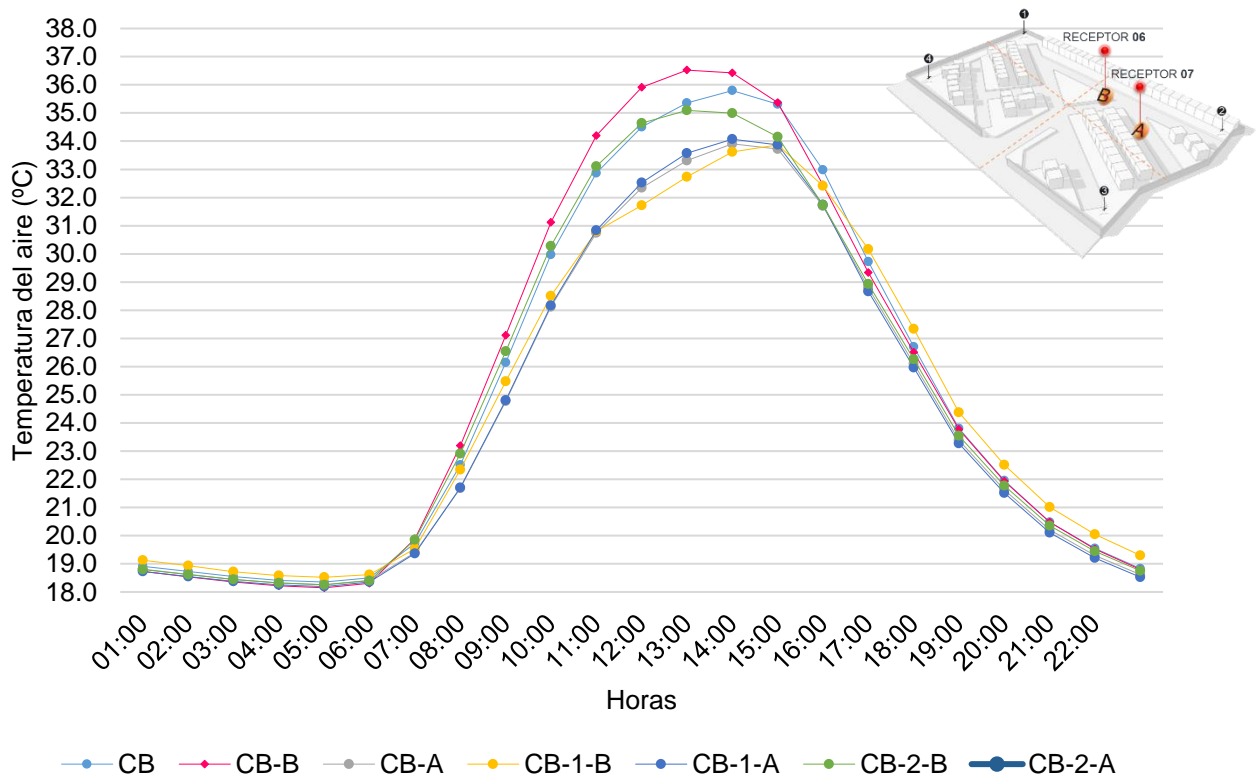
Como se muestra en la Tabla 21, durante la temporada de verano el CB presentó un incremento progresivo de la temperatura desde las primeras horas de la mañana, alcanzando un valor máximo cercano a los 35.0 °C entre las 13:00 y las 15:00 h. Este comportamiento refleja el efecto acumulativo de la radiación solar sobre superficies de bajo albedo y con limitada cobertura vegetal. En el escenario CB-B, al eliminar la vegetación, las temperaturas aumentan ligeramente en comparación con el CB, con diferencias de entre 0.5 °C y 1 °C. En el escenario CB-A, el cambio hacia un pavimento de mayor albedo atenúa parcialmente el incremento térmico generado por la pérdida de vegetación, logrando descensos modestos en las horas de la tarde. Sin embargo, la ausencia de árboles limita el efecto de enfriamiento, evidenciando que los materiales reflectantes, no sustituyen los beneficios de la cobertura arbórea.

Tabla 21.  
Temperatura media del aire del día 18/09/2024 del Fracc. del Sol

Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	18.9	18.7	18.8	19.1	18.7	18.8	18.9
02:00	18.7	18.5	18.6	18.9	18.5	18.6	18.7
03:00	18.5	18.4	18.4	18.7	18.4	18.4	18.5
04:00	18.4	18.2	18.3	18.6	18.3	18.3	18.4
05:00	18.4	18.1	18.3	18.5	18.2	18.3	18.3
06:00	18.5	18.3	18.4	18.6	18.4	18.4	18.5
07:00	19.7	19.9	19.4	19.5	19.4	19.9	19.4
08:00	22.5	23.2	21.7	22.3	21.7	22.9	21.7
09:00	26.2	27.1	24.8	25.5	24.8	26.5	24.8
10:00	30.0	31.1	28.1	28.5	28.2	30.3	28.1
11:00	32.9	34.2	30.7	30.8	30.8	33.1	30.6
12:00	34.5	35.9	32.3	31.7	32.5	34.6	32.0
13:00	35.4	36.5	33.3	32.7	33.6	35.1	32.8
14:00	35.8	36.4	33.9	33.6	34.1	35.0	33.2
15:00	35.3	35.4	33.7	33.9	33.9	34.2	33.0
16:00	33.0	32.4	31.7	32.4	31.7	31.7	30.9
17:00	29.7	29.3	28.8	30.2	28.7	28.9	28.4
18:00	26.7	26.5	26.1	27.3	26.0	26.3	25.9
19:00	23.8	23.8	23.4	24.4	23.3	23.5	23.2
20:00	22.0	21.9	21.6	22.5	21.5	21.8	21.5
21:00	20.5	20.5	20.2	21.0	20.1	20.4	18.8
22:00	19.5	19.5	19.3	20.0	19.2	19.4	18.2
23:00	18.8	18.8	18.6	19.3	18.5	18.7	17.7

Los escenarios con árboles (CB-1-A, CB-1-B, CB-2-A, CB-2-B) muestran una mejora considerable en el microclima. El escenario CB-2-A, con la mayor densidad arbórea (204 árboles) y pavimento claro, alcanza las reducciones más significativas, con hasta  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante el pico de calor. En cambio, CB-1-A y CB-1-B, con menor densidad (102 árboles), también aportan beneficios, aunque en menor magnitud. En conjunto, los resultados destacan que la vegetación es el factor más influyente en la mitigación térmica, mientras que el albedo actúa como un complemento que potencia sus efectos (Figura 40).

Figura 40.  
 Temperatura media del aire del día 18/09/2024 del Fracc. del Sol



Como se muestra en la Tabla 22, durante el invierno las temperaturas son más moderadas, con un máximo que no supera los  $31\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el caso base, alcanzado entre las 13:00 y 14:00 h. Los patrones generales muestran que los efectos de las intervenciones son menos significativos debido a la menor intensidad de la radiación solar en esta estación. En el escenario CB-B la eliminación de vegetación tiene un

impacto menos pronunciado en invierno. La diferencia con el caso base durante las horas más cálidas no supera los 0.5 °C, ya que la vegetación desempeña un rol menos crítico en esta estación debido a la menor demanda de enfriamiento. En el escenario CB-A, el cambio al pavimento de alto albedo tiene un efecto similar al observado en verano. Durante las horas de máxima radiación, las temperaturas disminuyen ligeramente, pero el efecto es menos significativo porque las condiciones climáticas de invierno no producen acumulaciones de calor extremas como en verano. En los escenarios con árboles, la adición de estos sigue mostrando beneficios en invierno, aunque con un impacto menor en comparación con el verano.

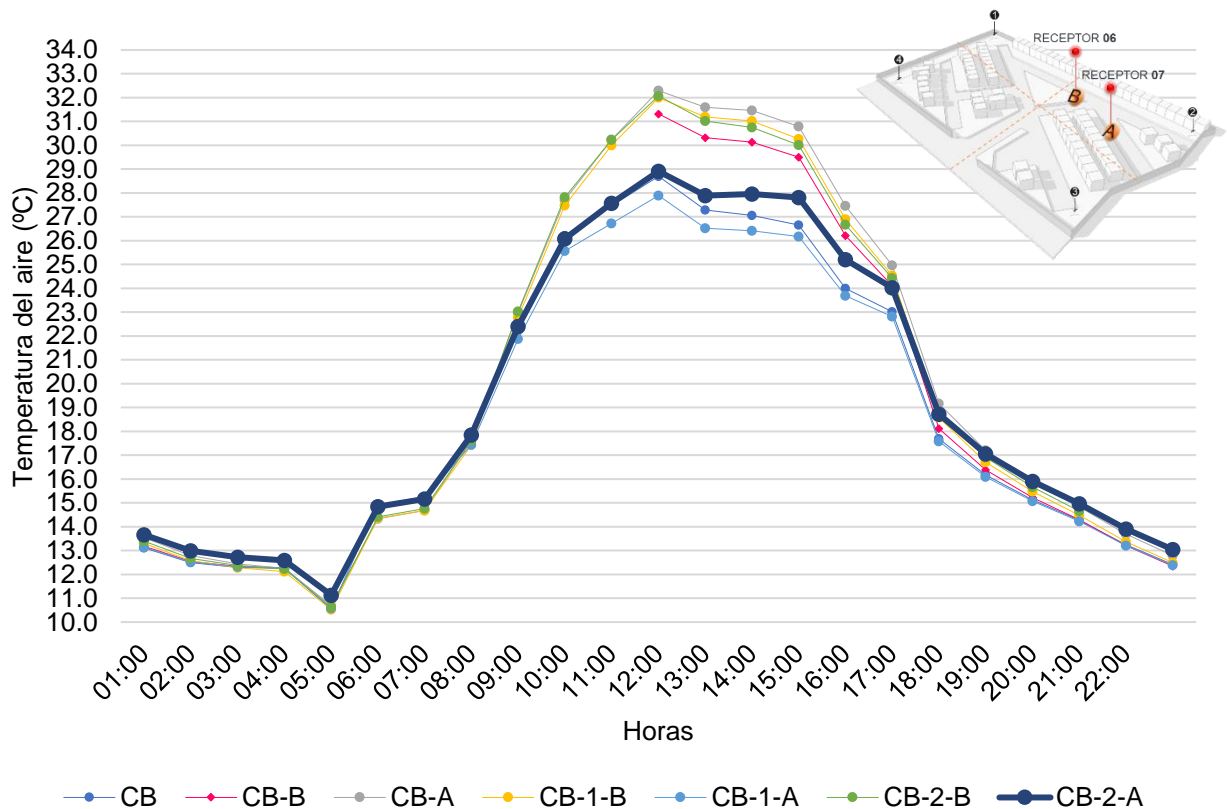
Tabla 22.

Temperatura media del aire del día 23/02/2024 del Fracc. del Sol

Temperatura del aire media el 23/02/2024 (°C)							
Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	13.1	13.2	13.5	13.3	13.1	13.4	13.7
02:00	12.5	12.5	12.8	12.6	12.5	12.7	13.0
03:00	12.3	12.3	12.4	12.3	12.3	12.4	12.7
04:00	12.2	12.3	12.3	12.1	12.3	12.2	12.6
05:00	10.5	10.7	10.7	10.5	10.6	10.6	11.1
06:00	14.9	14.9	14.3	14.4	14.9	14.4	14.8
07:00	15.3	15.3	14.7	14.7	15.2	14.8	15.2
08:00	17.7	17.7	17.6	17.4	17.4	17.6	17.8
09:00	22.3	22.3	23.0	22.8	21.9	23.0	22.4
10:00	26.2	27.7	27.7	27.5	25.6	27.8	26.1
11:00	27.5	30.2	30.2	30.0	26.7	30.2	27.6
12:00	28.7	31.3	32.3	32.0	27.9	32.1	28.9
13:00	27.3	30.3	31.6	31.2	26.5	31.0	27.9
14:00	27.1	30.1	31.5	31.0	26.4	30.8	28.0
15:00	26.7	29.5	30.8	30.3	26.2	30.0	27.8
16:00	24.0	26.2	27.5	26.9	23.7	26.7	25.2
17:00	23.0	24.1	25.0	24.5	22.8	24.4	24.0
18:00	17.7	18.1	19.2	18.6	17.6	18.7	18.7
19:00	16.2	16.4	17.2	16.7	16.1	16.9	17.1
20:00	15.1	15.2	15.9	15.5	15.1	15.7	15.9
21:00	14.3	14.3	14.8	14.5	14.2	14.7	15.0
22:00	13.2	13.2	13.7	13.4	13.2	13.4	13.9
23:00	12.4	12.3	12.8	12.5	12.4	12.5	13.0

Los escenarios CB-1-A y CB-1-B, con 102 árboles, las temperaturas disminuyen ligeramente en las horas centrales del día, con reducciones cercanas a 0.5 °C respecto al caso base. Este efecto es más evidente en CB-1-B, donde la sombra de los árboles compensa el efecto del pavimento de bajo albedo. En el caso de CB-2-A y CB-2-B, al aumentar la densidad arbórea, las temperaturas se reducen en mayor medida, alcanzando diferencias de hasta 1 °C en las horas más cálidas. Particularmente se identificó que el impacto es menor que en verano, lo que refuerza que la principal utilidad de los árboles es mitigar el calor extremo (Figura 41).

Figura 41.  
Temperatura media del aire del día 23/02/2024 del Fracc. del Sol



La eliminación de vegetación (CB-B) incrementa las temperaturas tanto en verano como en invierno. Sin embargo, el impacto es más crítico en verano, donde las temperaturas son más extremas. Esto confirma que la vegetación es fundamental para mantener temperaturas menos elevadas que en escenarios sin vegetación, especialmente en climas cálidos.

Cambiar a un pavimento de alto albedo reduce las temperaturas al reflejar más radiación solar, pero su impacto es limitado en ausencia de vegetación. En escenarios combinados con vegetación, el pavimento de alto albedo refuerza los beneficios, pero no sustituye el efecto de los árboles. La incorporación de árboles tiene el mayor impacto en la reducción de temperaturas, especialmente en escenarios de alta densidad arbórea (CB-2-A y CB-2-B). Los árboles ofrecen sombra directa, reducen la radiación solar sobre las superficies y enfrían el aire a través de la evapotranspiración, lo que los convierte en una estrategia clave para mitigar el calor urbano.

En verano, las estrategias de mitigación son cruciales para combatir el estrés térmico. La combinación de pavimento de alto albedo y árboles (CB-2-A) resulta en las mayores reducciones de temperatura. En invierno, se observa menor impacto de las intervenciones, las estrategias que incluyen vegetación siguen siendo útiles para moderar las temperaturas.

Los datos demuestran que las estrategias urbanas que combinan pavimentos de alto albedo y vegetación densa son las más efectivas para mejorar las condiciones térmicas en áreas residenciales. En particular, la densidad y distribución de árboles tiene un impacto determinante, mostrando beneficios claros en la mitigación del calor durante el verano y contribuyendo al confort térmico en invierno. La eliminación de vegetación, por el contrario, exacerba las temperaturas y debería evitarse en el diseño urbano sostenible.

#### *4.2.2.1. Receptores en Fracc. del Sol*

Los receptores 6 y 7 se encuentran en posiciones estratégicas dentro del área residencial simulada. El receptor 6 está ubicado bajo la sombra de un árbol, mientras que el receptor 7 se encuentra suspendido sobre la acera o banqueta, donde no hay sombra significativa. Ambos miden la temperatura del aire a 1.50 metros de altura, lo que representa el nivel típico de exposición humana. Los datos analizan un día de verano (18/09/2023) y un día de invierno (23/02/2024) para evaluar las diferencias de comportamiento térmico en estas ubicaciones bajo diferentes escenarios microclimáticos.

Como se muestra en la Tabla 23, el Receptor 6 ubicado bajo un árbol, muestra una clara ventaja en términos de regulación térmica gracias al efecto de sombreado y evapotranspiración de la vegetación. Durante las horas críticas (11:00 a 16:00 h), las temperaturas del aire en este punto son consistentemente más bajas en escenarios con mayor densidad de árboles.

*Tabla 23.*

*Temperatura del aire registrada en Receptor 6 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura*

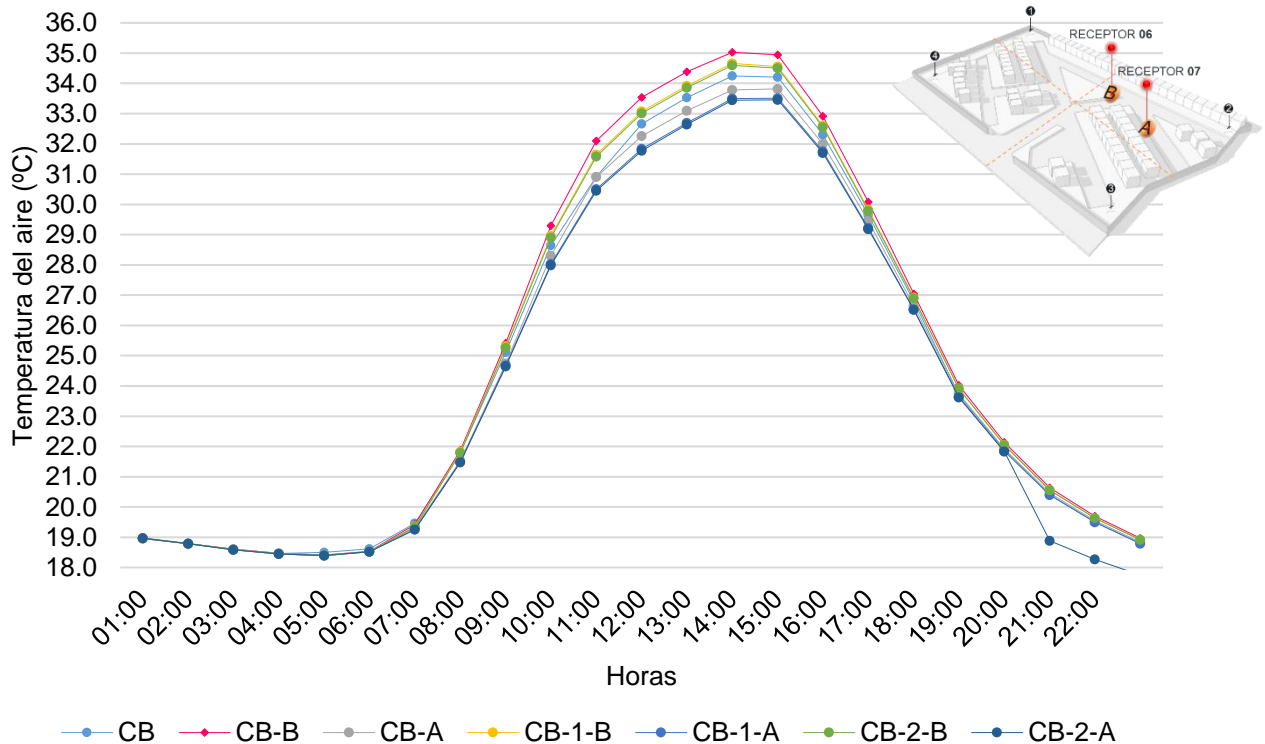
<b>Hora</b>	<b>CB</b>	<b>CB-B</b>	<b>CB-A</b>	<b>CB-1-B</b>	<b>CB-1-A</b>	<b>CB-2-B</b>	<b>CB-2-A</b>
01:00	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0
02:00	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8
03:00	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6
04:00	18.5	18.5	18.5	18.4	18.4	18.5	18.5
05:00	18.5	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4
06:00	18.6	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5
07:00	19.5	19.4	19.3	19.4	19.3	19.3	19.3
08:00	21.8	21.9	21.5	21.8	21.5	21.8	21.5
09:00	25.1	25.4	24.7	25.3	24.7	25.3	24.6
10:00	28.6	29.3	28.3	29.0	28.0	28.9	28.0
11:00	30.9	32.1	30.9	31.6	30.5	31.6	30.5
12:00	32.7	33.5	32.3	33.1	31.8	33.0	31.8
13:00	33.5	34.4	33.1	33.9	32.7	33.9	32.6
14:00	34.2	35.0	33.8	34.7	33.5	34.6	33.4
15:00	34.2	34.9	33.8	34.6	33.5	34.5	33.5
16:00	32.3	32.9	32.0	32.6	31.7	32.6	31.7
17:00	29.6	30.1	29.4	29.8	29.2	29.8	29.2
18:00	26.8	27.0	26.6	26.9	26.5	26.9	26.5
19:00	23.7	24.0	23.7	23.9	23.6	23.9	23.6
20:00	21.9	22.1	21.9	22.1	21.8	22.0	21.8
21:00	20.4	20.6	20.5	20.6	20.4	20.6	18.9
22:00	19.5	19.7	19.5	19.6	19.5	19.6	18.3
23:00	18.8	19.0	18.8	18.9	18.8	18.9	17.7

El CB, que representa las condiciones actuales del área residencial, muestra picos de temperatura que oscilan entre 33.5 °C y 34.1 °C a las 14:00 h. Este rango es típico para áreas urbanas con vegetación moderada. Los escenarios con alta densidad de árboles (CB-2-A y CB-2-B) presentan reducciones significativas de temperatura, alcanzando hasta 31.5 °C a las 14:00 h, una disminución de casi 2 °C respecto al CB. Este efecto se debe a la alta densidad de árboles (*Cupressus forbesii*), que proveen sombra y refrescan el ambiente mediante evapotranspiración. En los escenarios sin

vegetación, donde se elimina la cobertura arbórea, el receptor 6 pierde la protección térmica que anteriormente proporcionaba el árbol bajo el cual estaba ubicado. Este cambio resulta en un aumento significativo de las temperaturas del aire en las horas más críticas del día (11:00 a 16:00 h). El escenario CB-B, en ausencia de árboles, las temperaturas aumentan significativamente, llegando a 35.0 °C o más durante el mismo intervalo horario. La falta de sombra incrementa la absorción de radiación solar por parte del suelo y las superficies expuestas, exacerbando el efecto de isla de calor (Figura 42).

Figura 42.

Temperatura del aire registrada en Receptor 6 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura



Como se muestra en la Tabla 24, el Receptor 7, ubicado sobre la acera, presenta un comportamiento térmico condicionado por su exposición directa a la radiación solar y la ausencia de sombreado natural. En el caso base (CB), las temperaturas alcanzan algunos de los valores más altos registrados, con un máximo de 35.0 °C a las 14:00 h. Este resultado se asocia con las propiedades del pavimento de bajo albedo (0.3), el cual favorece la absorción y posterior emisión de calor hacia el entorno. En los escenarios con pavimentos de alto albedo (0.5), correspondientes a CB-A, CB-1-A y

CB-2-A, se observa una disminución térmica moderada, con temperaturas máximas que descienden hasta 34.0 °C. No obstante, esta reducción resulta limitada debido a la falta de cobertura arbórea, que impide un control más efectivo del calentamiento superficial y de la radiación directa sobre el receptor.

*Tabla 24.*

*Temperatura del aire registrada en Receptor 7 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura*

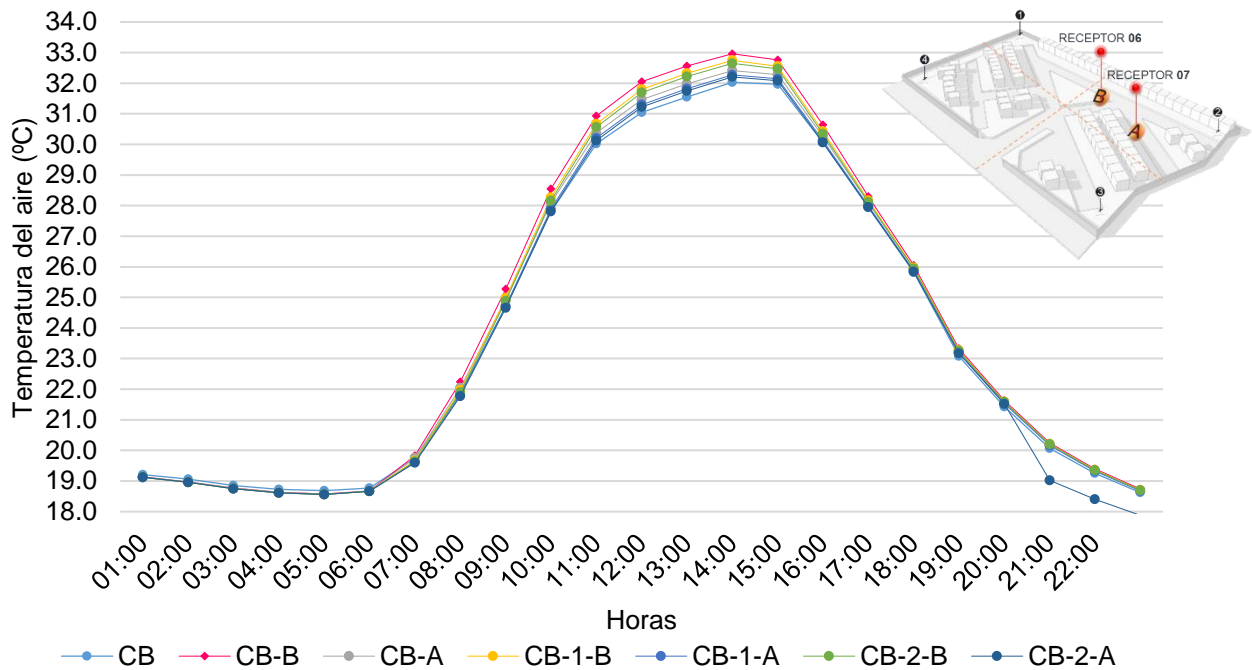
<b>Hora</b>	<b>CB</b>	<b>CB-B</b>	<b>CB-A</b>	<b>CB-1-B</b>	<b>CB-1-A</b>	<b>CB-2-B</b>	<b>CB-2-A</b>
01:00	19.2	19.1	19.1	19.1	19.1	19.1	19.1
02:00	19.1	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0
03:00	18.9	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8
04:00	18.7	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6
05:00	18.7	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6
06:00	18.8	18.7	18.7	18.7	18.7	18.7	18.7
07:00	19.7	19.8	19.8	19.7	19.6	19.6	19.6
08:00	21.9	22.2	22.0	22.0	21.8	21.9	21.8
09:00	24.7	25.3	24.9	25.0	24.7	24.9	24.7
10:00	27.8	28.6	28.1	28.3	27.9	28.2	27.8
11:00	30.0	30.9	30.4	30.7	30.2	30.6	30.1
12:00	31.0	32.1	31.5	31.8	31.3	31.7	31.2
13:00	31.5	32.6	32.0	32.3	31.8	32.2	31.7
14:00	32.0	33.0	32.4	32.7	32.3	32.7	32.2
15:00	32.0	32.8	32.3	32.6	32.1	32.5	32.1
16:00	30.1	30.6	30.3	30.4	30.1	30.3	30.1
17:00	27.9	28.3	28.1	28.2	28.0	28.1	28.0
18:00	25.8	26.0	25.9	26.0	25.9	25.9	25.8
19:00	23.1	23.3	23.2	23.3	23.2	23.3	23.2
20:00	21.4	21.6	21.6	21.6	21.5	21.6	21.5
21:00	20.1	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	19.0
22:00	19.3	19.4	19.3	19.4	19.3	19.4	18.4
23:00	18.6	18.7	18.7	18.7	18.7	18.7	17.9

En los escenarios que incorporan vegetación, la inclusión de árboles produce un efecto significativo en la mitigación térmica del entorno inmediato. Las simulaciones indican reducciones de hasta 2 °C durante las horas de máxima radiación solar, lo que demuestra la capacidad del arbolado para modificar las condiciones microclimáticas. Este descenso se atribuye tanto al sombreado generado por el follaje como a los procesos de evapotranspiración, que contribuyen a disipar la energía térmica acumulada en el pavimento y en el aire circundante. En consecuencia, los escenarios

con vegetación presentan una mayor estabilidad térmica y menores amplitudes de temperatura a lo largo del día. Los resultados reflejan que, aunque los materiales reflectantes ofrecen un beneficio parcial, la presencia de vegetación arbórea constituye el factor más determinante en la reducción de la temperatura del aire y en la mejora de las condiciones de confort térmico en zonas urbanas expuestas (Figura 43).

Figura 43.

Temperatura del aire registrada en Receptor 7 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura



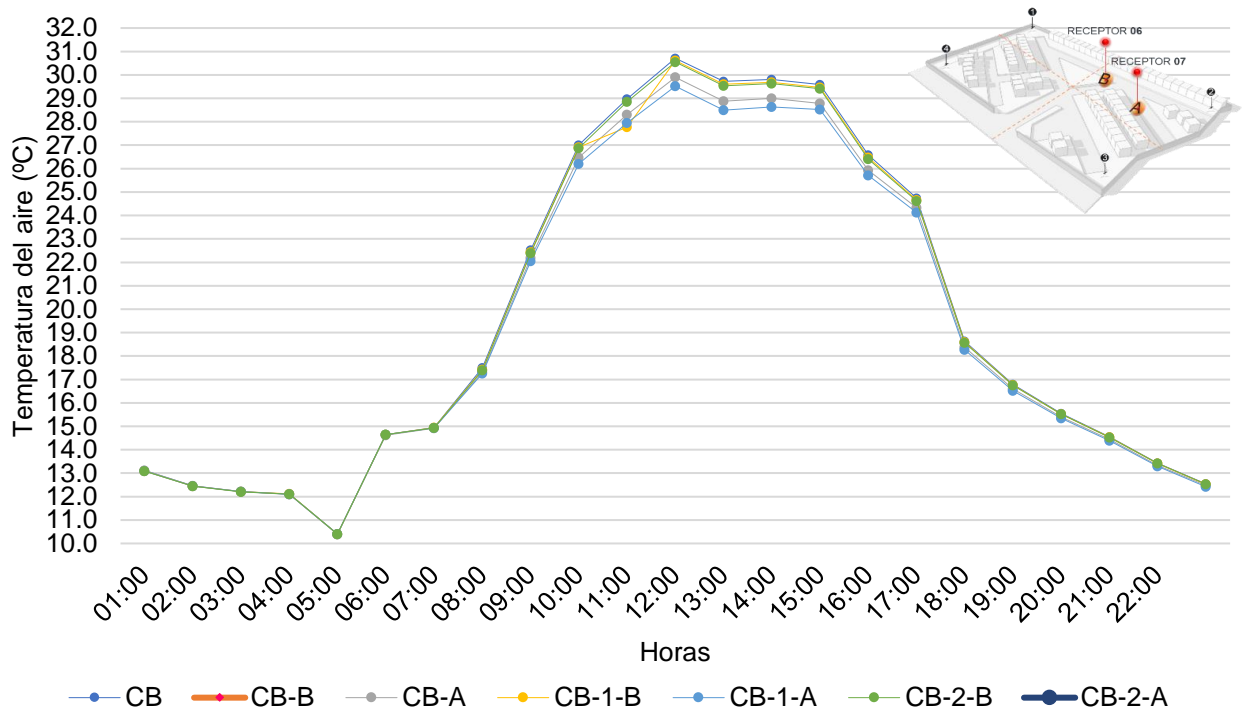
Como se muestra en la Tabla 25, durante la temporada de invierno los árboles, particularmente las especies de follaje perenne como *Cupressus forbesii*, mantienen su función de moderación térmica en menor intensidad que en verano. Los datos registrados en el Receptor 6 del caso base (CB) muestran que, durante las horas de mayor radiación solar, entre las 11:00 y las 15:00 h, las temperaturas oscilaron entre 22.5 °C y 23.2 °C. En los escenarios con alta densidad arbórea (CB-2-A y CB-2-B), las temperaturas se redujeron aproximadamente 0.5 °C respecto al caso base, lo que confirma el efecto regulador del arbolado sobre el microclima local.

Tabla 25.  
Temperatura del aire registrada en el Receptor 6 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura

Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	13.1	12.7	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1
02:00	12.5	12.1	12.5	12.4	12.4	12.4	12.4
03:00	12.2	11.8	12.2	12.2	12.2	12.2	12.1
04:00	12.1	11.4	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
05:00	10.4	9.6	10.4	10.4	10.4	10.4	10.3
06:00	14.6	13.4	14.6	14.6	14.6	14.6	14.5
07:00	15.0	13.6	14.9	14.9	14.9	14.9	14.8
08:00	17.5	17.0	17.3	17.4	17.3	17.4	17.3
09:00	22.5	23.2	22.2	22.4	22.0	22.4	22.1
10:00	27.0	28.9	26.5	26.9	26.2	26.9	26.4
11:00	29.0	31.7	28.3	27.8	28.0	28.9	28.3
12:00	30.7	33.7	29.9	30.6	29.5	30.5	29.7
13:00	29.7	32.7	28.9	29.6	28.5	29.5	28.7
14:00	29.8	32.3	29.0	29.7	28.6	29.6	28.8
15:00	29.6	31.3	28.8	29.5	28.5	29.4	28.7
16:00	26.6	27.4	25.9	26.5	25.7	26.4	25.9
17:00	24.7	24.4	24.3	24.7	24.1	24.6	24.3
18:00	18.6	18.1	18.4	18.6	18.3	18.6	18.2
19:00	16.8	16.4	16.6	16.8	16.5	16.7	16.5
20:00	15.5	15.1	15.4	15.5	15.3	15.5	15.4
21:00	14.6	14.1	14.4	14.5	14.4	14.5	14.4
22:00	13.4	13.0	13.3	13.4	13.3	13.4	13.2
23:00	12.5	12.1	12.5	12.5	12.4	12.5	12.5

Aunque el impacto de la vegetación se mantiene, su efecto de mitigación térmica resulta menos notable debido a las menores tasas de radiación solar características del invierno. En los escenarios sin vegetación (CB-A y CB-B), las temperaturas tienden a incrementarse en relación con los escenarios arbolados; pero este aumento no alcanza los valores críticos observados en verano. Este comportamiento evidencia la influencia del balance térmico estacional, donde la menor carga energética disponible limita tanto la ganancia como la pérdida de calor. En conjunto, los resultados reflejan la capacidad de los árboles para estabilizar la temperatura, incluso en condiciones de baja radiación (Figura 44).

**Figura 44.**  
 Temperatura del aire registrada en el Receptor 6 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura



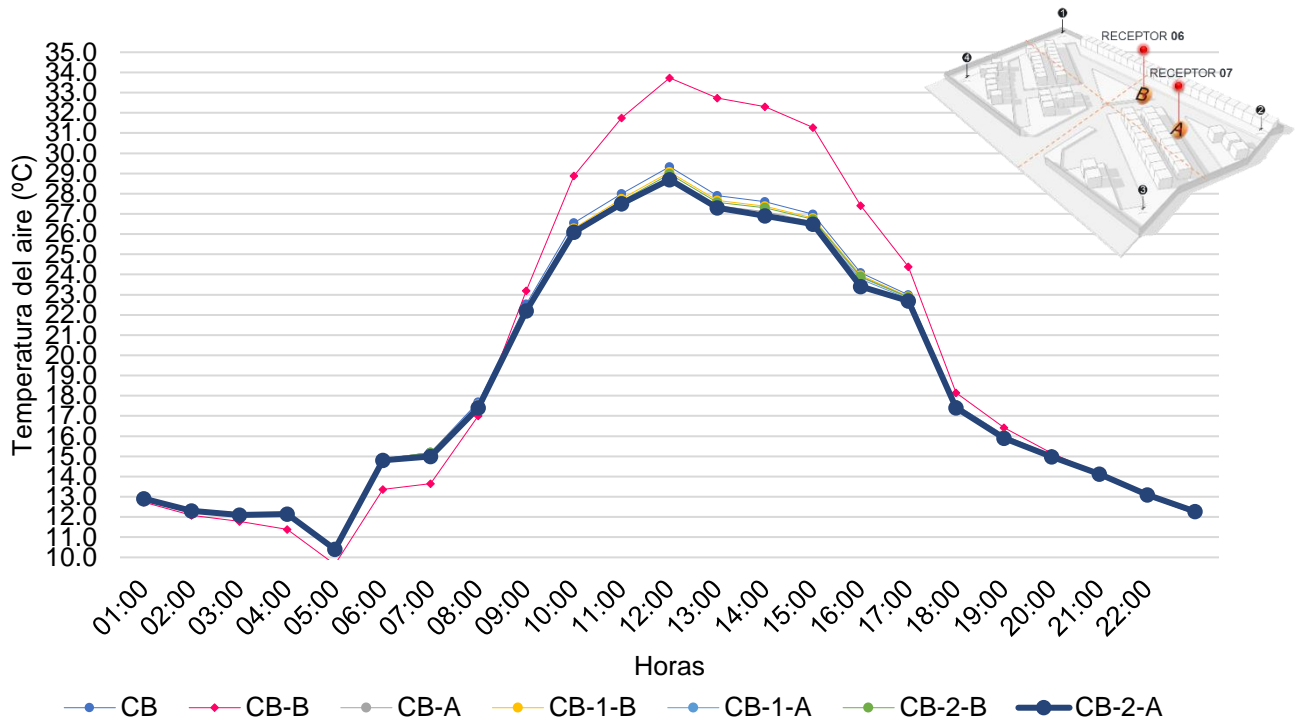
En temporada de invierno, el Receptor 7 continúa registrando temperaturas más elevadas en comparación con el Receptor 6. Esta diferencia se debe principalmente a su exposición directa a la radiación solar y a las propiedades térmicas del pavimento, que favorecen la absorción y posterior liberación de calor en superficie. En el caso base (CB), las temperaturas alcanzaron un máximo de 23.0 °C durante las horas más cálidas del día, lo que confirma cómo las condiciones de orientación y materiales de superficie generan contrastes microclimáticos aún dentro de un mismo fraccionamiento. Estas variaciones, aunque de menor magnitud que en verano, ponen de relieve la capacidad de ciertos espacios urbanos para retener calor incluso en temporadas frías (Tabla 26).

Tabla 26.  
Temperatura del aire registrada en el Receptor 7 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura

Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	12.9
02:00	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.3
03:00	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.1
04:00	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
05:00	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4
06:00	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.8
07:00	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.0
08:00	17.7	17.7	17.6	17.5	17.5	17.5	17.4
09:00	22.5	22.5	22.3	22.3	22.1	22.2	22.2
10:00	26.6	26.6	26.2	26.3	26.0	26.2	26.1
11:00	28.0	28.0	27.5	27.7	27.4	27.6	27.5
12:00	29.3	29.3	28.8	29.1	28.6	29.0	28.7
13:00	27.9	27.9	27.4	27.7	27.2	27.6	27.3
14:00	27.6	27.6	27.1	27.4	27.0	27.3	26.9
15:00	27.0	27.0	26.6	26.8	26.5	26.7	26.5
16:00	24.1	24.1	23.9	24.0	23.8	23.9	23.4
17:00	23.0	23.0	22.9	22.9	22.8	22.9	22.7
18:00	17.6	17.6	17.5	17.5	17.4	17.5	17.4
19:00	16.1	16.1	16.0	16.0	16.0	16.0	15.9
20:00	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
21:00	14.2	14.2	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1
22:00	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1
23:00	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3

Por otra parte, los escenarios con pavimentos de alto albedo (CB-A, CB-1-A y CB-2-A) mostraron reducciones de entre 0.3 °C y 0.5 °C respecto al caso base, lo que evidencia la función de los materiales reflectantes en la moderación térmica. Sin embargo, estas reducciones fueron discretas debido a la menor radiación solar invernal. En los escenarios con vegetación se observó un efecto de estabilización térmica, manteniendo temperaturas más moderadas a lo largo del día. Por otro lado, el impacto del arbolado fue menos marcado que en verano, debido a la reducción de la evapotranspiración y al menor ángulo solar, la presencia de árboles contribuyó a disminuir la variabilidad térmica y a generar un microclima más equilibrado frente a los escenarios sin vegetación (Figura 45).

**Figura 45.**  
 Temperatura del aire registrada en el Receptor 7 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura



En verano, la vegetación tiene un impacto mucho mayor que en invierno, con reducciones de temperatura de hasta 2-3 °C bajo escenarios con alta densidad de árboles. En invierno, la vegetación influye menos debido a la menor radiación solar, pero aún contribuye a un microclima más estable.

Los pavimentos de alto albedo mejoran las condiciones térmicas, especialmente en superficies expuestas como banquetas, pero su efecto es limitado sin cobertura vegetal. El posicionamiento de los receptores dentro de los modelos de simulación fue determinante para interpretar los patrones térmicos observados en los escenarios evaluados. Su ubicación respondió a criterios de representatividad del entorno construido como lo son las zonas sombreadas, expuestas y con diferentes orientaciones con el propósito de captar las variaciones espaciales del ambiente térmico a escala peatonal. Los receptores ubicados bajo árboles (Receptor 6) muestran un mejor desempeño térmico en todos los escenarios debido al sombreado y a la capacidad de los árboles para enfriar el ambiente. Los receptores en superficies expuestas (Receptor 7) son los más afectados por las altas temperaturas, destacando la necesidad de implementar estrategias de sombreado. La variabilidad térmica entre

receptores cercanos dentro de un mismo escenario refleja también la interacción entre vegetación, reflectancia del pavimento y flujo de viento. Por ejemplo, en el Fracc. del Sol, los receptores 6 y 7 que se ubicaron a sotavento respecto al arbolado presentaron diferencias de hasta 2.2 °C, atribuibles a la dispersión del aire enfriado por evapotranspiración. Estos hallazgos sugieren que la eficacia de las estrategias de mitigación no es uniforme en el espacio urbano, sino que depende de la posición relativa de los elementos y la dirección dominante del viento.

Se identificó que la estrategia de pavimento de alto albedo (CB-A, CB-1-A, CB-2-A) genera una reducción consistente de la temperatura respecto al caso base en todos los receptores y temporadas, con disminuciones más marcadas en invierno. Por el contrario, el pavimento de bajo albedo (CB-B) produce un aumento de la temperatura, especialmente notable durante la temporada de invierno. La vegetación mitiga parcialmente este efecto cuando se combina con bajo albedo (CB-1-B, CB-2-B), pero potencia la reducción térmica cuando se usa con alto albedo (CB-1-A, CB-2-A), demostrando sinergias positivas entre ambas estrategias (Tabla 27). La reducción más significativa en el Receptor 6 durante verano (18/09/2023) correspondió al escenario CB-2-A (dos árboles cada 7.0 m + pavimento de alto albedo), con un descenso promedio de  $-0.61$  °C en 24 horas respecto al CB. Este resultado refleja la capacidad de la vegetación combinada con superficies reflectantes para modificar el microclima urbano. Estudios en climas mediterráneos como Tesalónica de Tsoka et al. (2017) y Bolzano de Speak et al. (2020) en Italia, documentan descensos de entre 2 y 4 °C en condiciones similares. La diferencia puede atribuirse a la influencia marina y a la ventilación costera de Ensenada, que tienden a suavizar las variaciones térmicas. Sin embargo, la coincidencia en la dirección del efecto confirma la validez de los hallazgos, que corresponden a la integración de sombra arbórea y materiales de alto albedo para generar un enfriamiento constante, aunque de menor magnitud en comparación con contextos mediterráneos más continentales.

En este contexto, la efectividad de las estrategias de mitigación debe evaluarse no solo en función de su rendimiento diurno, sino también de su capacidad para modular el balance térmico nocturno. En climas BSk, donde las noches suelen ser más frescas y secas, una atenuación excesiva del enfriamiento puede generar un efecto de retención

térmica indeseada. Por ello, resulta relevante considerar configuraciones que equilibren la reducción del calor diurno sin obstaculizar la disipación nocturna, mediante combinaciones de materiales reflectantes y vegetación caducifolia o de copa permeable.

Tabla 27.

Aumento o disminución de la temperatura del aire (°C) promedio en comparación del Caso Base en el Receptor 6 y 7 del Fracc. Del Sol

<i>Fraccionamiento del Sol - Temperatura del Aire (°C)</i>				
Escenario	Receptor 6 (18/09/2023)	Receptor 6 (23/02/2024)	Receptor 7 (18/09/2023)	Receptor 7 (23/02/2024)
CB-B	0.41	1.93	0.32	0
CB-A	-0.38	-0.58	-0.16	-0.1
CB-1-B	0.27	0.1	0.17	-0.03
CB-1-A	-0.52	-0.82	-0.22	-0.13
CB-2-B	0.26	0.09	0.16	-0.03
CB-2-A	-0.61	-0.85	-0.23	-0.14

#### **4.2.3. Humedad relativa Fracc. del Sol**

Como se muestra en la Tabla 28, en el día que caracteriza la temporada de verano, la humedad relativa muestra una variación significativa a lo largo de las 23 horas, con patrones claros que reflejan las condiciones climáticas típicas de esta temporada. Durante las primeras horas (01:00 a 06:00 h), la humedad relativa oscila entre 78 % y 89 %. Esto se debe a las condiciones más frescas y húmedas de la noche, donde la temperatura es más baja y la evaporación es mínima. En este período, los escenarios sin vegetación (CB-B y CB-A) tienden a tener valores ligeramente más altos que el CB, lo que sugiere que la ausencia de árboles podría estar permitiendo una mayor acumulación de humedad en el ambiente durante la noche.

A medida que avanza la mañana (07:00 a 12:00 h), la humedad relativa comienza a disminuir gradualmente, reflejando el aumento de la temperatura y la radiación solar. Este descenso es más pronunciado en los escenarios sin vegetación, donde la humedad relativa cae drásticamente.

Tabla 28.  
Humedad Relativa media del día 18/09/2023 en el Fracc. del Sol

Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	79.8	81.2	80.6	78.4	81.2	80.8	79.9
02:00	81.3	82.8	82.1	80.0	82.7	82.3	81.5
03:00	86.9	88.2	87.6	85.8	88.1	87.7	87.1
04:00	88.0	89.3	88.7	87.0	89.1	88.8	88.3
05:00	87.4	88.8	88.1	86.3	88.6	88.2	87.7
06:00	87.8	89.2	88.5	87.0	89.0	88.7	88.1
07:00	83.5	83.5	85.7	83.8	86.4	83.6	85.5
08:00	73.9	72.2	78.7	73.4	79.5	73.4	78.1
09:00	62.1	60.2	68.6	63.0	69.6	62.2	67.9
10:00	50.2	48.3	57.0	52.9	57.9	50.7	56.4
11:00	44.4	42.1	50.9	48.5	51.4	44.7	50.7
12:00	39.4	36.9	45.0	45.4	44.9	39.6	45.5
13:00	35.4	33.3	39.8	40.8	39.4	36.1	41.0
14:00	34.2	33.1	38.1	38.6	37.7	35.8	39.6
15:00	34.4	34.4	37.6	37.4	37.3	36.7	39.3
16:00	38.2	39.3	41.1	39.4	41.0	41.0	43.0
17:00	40.1	41.1	42.4	39.1	42.7	42.0	43.5
18:00	45.5	46.0	47.2	43.9	47.6	46.8	47.7
19:00	54.7	54.8	56.1	52.9	56.5	55.6	56.7
20:00	62.5	62.6	63.8	60.4	64.3	63.2	64.3
21:00	72.7	72.7	74.0	70.4	74.4	73.3	81.9
22:00	77.0	77.2	78.2	74.7	78.7	77.6	84.8
23:00	76.1	76.3	77.2	74.0	77.7	76.6	83.1

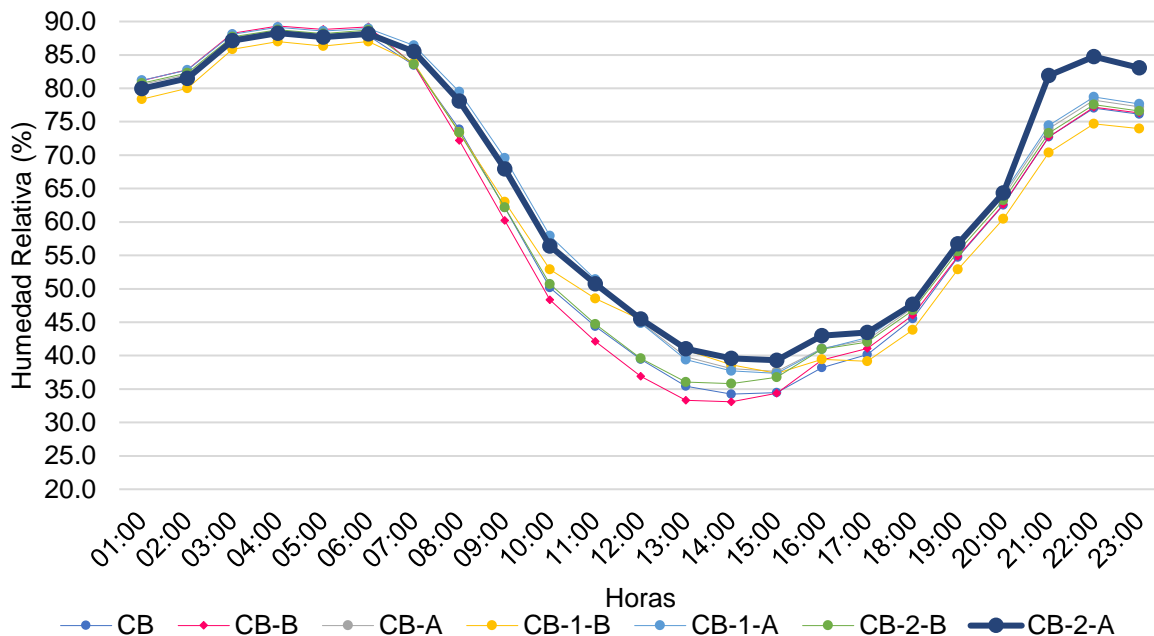
Se observa que el escenario CB-A, que combina pavimento de mayor albedo con la eliminación de vegetación, provoca una disminución, ya que el pavimento reflectante aumenta la temperatura superficial y reduce la humedad en el ambiente.

Durante las horas más calurosas del día (12:00 a 16:00 h), la humedad relativa alcanza sus valores más bajos. A las 14:00 h, el CB registra una humedad relativa del 34.2 %, mientras que en CB-B y CB-A, los valores son del 33.1 % y 38.1 %, respectivamente. En contraste, los escenarios con vegetación (CB-1-B, CB-1-A, CB-2-B, CB-2-A) mantienen valores ligeramente más altos, alrededor del 38%. Esto indica que la vegetación tiene un efecto moderador en la humedad relativa, ayudando a mantener niveles más altos incluso durante las horas más calurosas. La adición de árboles no

solo proporciona sombra, sino que también contribuye a la evapotranspiración, liberando humedad al ambiente y mitigando la disminución de la humedad relativa.

En las horas de la tarde y la noche (17:00 a 23:00 h), la humedad relativa comienza a recuperarse gradualmente, reflejando el descenso de la temperatura y la disminución de la radiación solar. A las 18:00 h, el CB registra una humedad relativa del 45.5%, mientras que, en los escenarios con vegetación, los valores son ligeramente más altos, alrededor del 47%. Esta recuperación es más evidente en los escenarios con mayor cantidad de vegetación (CB-2-B y CB-2-A), donde la humedad relativa alcanza valores cercanos al 48%. Esto sugiere que la vegetación no solo ayuda a mantener la humedad durante el día, sino que también facilita una recuperación más rápida durante la noche (Figura 46).

Figura 46.  
Humedad Relativa media del día 18/09/2023 en el Fracc. del Sol



Como se muestra en la Tabla 29, en el Receptor 6, ubicado bajo un árbol de sombreado, los datos de humedad relativa durante el día de verano muestran variaciones significativas entre los diferentes escenarios y horarios. A las 06:00 h, que es el horario de mayor humedad relativa, los valores son más altos en todos los escenarios debido a las condiciones más frescas de la mañana. En el CB, la humedad

relativa es del 85 % a las 06:00 h, mientras que a las 14:00 h, que es el horario de menor humedad relativa, desciende al 68 %. Sin embargo, también se observa que a las 10:00 h, la humedad relativa es del 75 %, y a las 18:00 h, es del 70 %, lo que indica que la humedad relativa comienza a disminuir gradualmente después de las 06:00 h y alcanza su punto más bajo a las 14:00 h, para luego recuperarse ligeramente hacia el final del día.

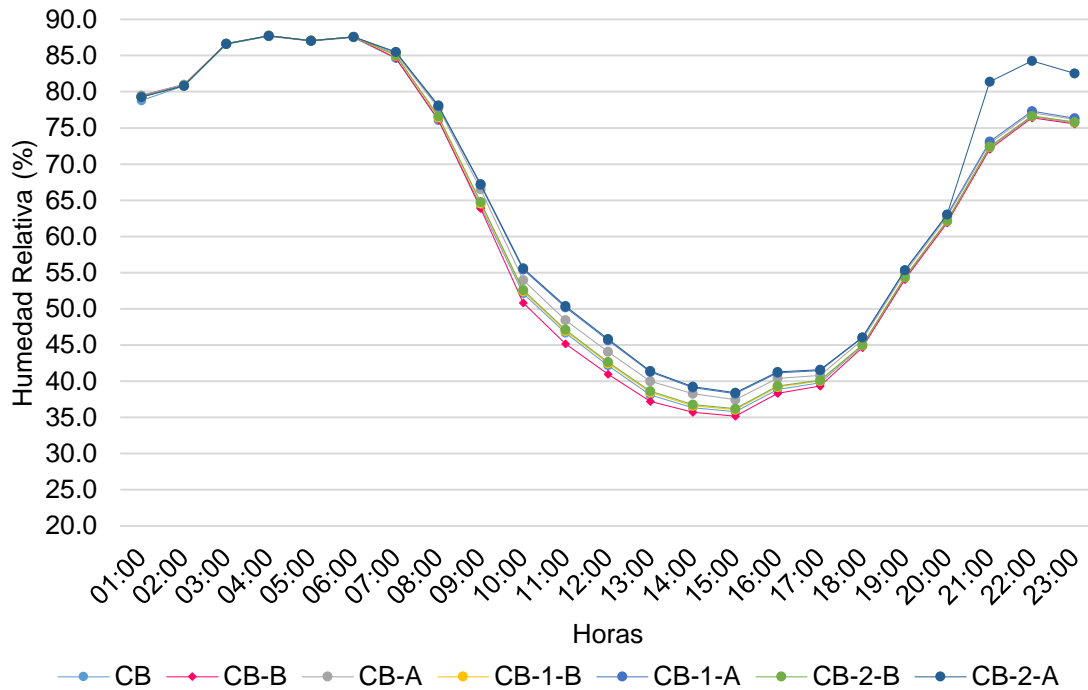
En los escenarios sin vegetación (CB-A y CB-B), la humedad relativa a las 06:00 h es del 78 % y 80 %, respectivamente, lo que representa una reducción del 7 % y 5 % respecto al caso base. A las 10:00 h, la humedad relativa en estos escenarios es del 65 % en CB-A y del 67 % en CB-B, mostrando reducciones del 10 % y 8 %. A las 14:00 h, la humedad relativa disminuye aún más, alcanzando el 55 % en CB-A y el 57 % en CB-B, lo que implica reducciones del 13 % y 11 % respecto al caso base. Finalmente, a las 18:00 h, la humedad relativa es del 60 % en CB-A y del 62 % en CB-B, con reducciones del 10 % y 8 %. Estos descensos confirman que la falta de vegetación tiene un impacto negativo en la humedad relativa, especialmente durante las horas más calurosas del día. En los escenarios con vegetación, como CB-1-A y CB-1-B, la humedad relativa se mantiene más estable. A las 06:00 h, la humedad relativa es del 83% en CB-1-A y del 84 % en CB-1-B, mostrando reducciones mínimas del 2 % y 1 % respecto al caso base. A las 10:00 h, la humedad relativa es del 72 % en CB-1-A y del 73% en CB-1-B, con reducciones del 3% y 2%. A las 14:00 h, la humedad relativa es del 65 % en CB-1-A y del 67% en CB-1-B, con reducciones del 3 % y 1%. Finalmente, a las 18:00 h, la humedad relativa es del 68% en CB-1-A y del 69 % en CB-1-B, con reducciones del 2 % y 1 %. Esto indica que la vegetación ayuda a mantener niveles más altos de humedad relativa, incluso durante las horas más calurosas.

Tabla 29.  
Humedad Relativa registrada en el Receptor 6, el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura

Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	78.8	79.5	79.5	79.3	79.3	79.3	79.3
02:00	80.8	81.0	81.0	80.9	80.9	80.8	80.8
03:00	86.6	86.6	86.6	86.6	86.6	86.6	86.6
04:00	87.7	87.7	87.7	87.8	87.7	87.7	87.7
05:00	87.0	87.0	87.0	87.1	87.1	87.1	87.1
06:00	87.5	87.6	87.6	87.6	87.6	87.6	87.6
07:00	84.6	84.7	85.2	85.0	85.4	85.0	85.5
08:00	76.0	76.1	77.8	76.4	78.0	76.6	78.1
09:00	64.2	63.9	66.6	64.6	67.1	64.8	67.3
10:00	52.1	50.8	54.0	52.4	55.4	52.6	55.6
11:00	46.7	45.2	48.4	47.0	50.2	47.1	50.4
12:00	42.2	41.0	44.1	42.5	45.7	42.7	45.8
13:00	38.1	37.2	40.0	38.5	41.3	38.6	41.4
14:00	36.3	35.7	38.3	36.6	39.1	36.8	39.2
15:00	35.8	35.2	37.5	36.1	38.3	36.2	38.4
16:00	38.9	38.3	40.4	39.2	41.2	39.3	41.3
17:00	39.8	39.3	40.8	40.1	41.5	40.2	41.6
18:00	44.9	44.7	45.7	45.0	46.0	45.0	46.1
19:00	54.3	54.1	55.0	54.4	55.3	54.4	55.3
20:00	62.1	61.9	62.7	62.2	63.0	62.2	63.0
21:00	72.3	72.1	72.9	72.4	73.1	72.4	81.4
22:00	76.6	76.4	77.1	76.6	77.3	76.7	84.3
23:00	75.7	75.6	76.2	75.8	76.4	75.8	82.5

Finalmente, en los escenarios CB-2-A y CB-2-B, con 204 árboles, la humedad relativa se mantiene muy cercana al caso base. A las 06:00 h, la humedad es del 84% en ambos escenarios, y a las 10:00 h, es del 73% en CB-2-A y del 74% en CB-2-B, con reducciones del 2% y 1%. A las 14:00 h, la humedad es del 66% en CB-2-A y del 68% en CB-2-B, igual al caso base. Finalmente, a las 18:00 h, la humedad es del 69% en CB-2-A y del 70% en CB-2-B, con reducciones del 1% y 0%. Esto demuestra que una mayor cantidad de vegetación puede contrarrestar completamente los efectos de disminución del pavimento reflectante (Figura 47).

**Figura 47.**  
*Humedad Relativa registrada en el Receptor 6, el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura*



Como se muestra en la Tabla 30, En el Receptor 7, ubicado sobre la acera y expuesto directamente al Sol, los datos de humedad relativa durante el día de verano muestran variaciones significativas entre los diferentes escenarios y horarios. A las 06:00 h, en el CB, la humedad relativa es del 80%, mientras que a las 14:00 h, desciende al 60%, mostrando una diferencia de 20% entre ambos horarios. Sin embargo, también se observa que a las 10:00 h, la humedad relativa es del 70%, y a las 18:00 h, es del 65%, lo que indica que la humedad relativa comienza a disminuir gradualmente después de las 06:00 h y alcanza su punto más bajo a las 14:00 h, para luego recuperarse ligeramente hacia el final del día. En los escenarios sin vegetación (CB-A y CB-B), la humedad relativa a las 06:00 h es del 72% y 74%, respectivamente, lo que representa reducciones del 8% y 6% respecto al caso base. A las 10:00 h, la humedad relativa en estos escenarios es del 60% en CB-A y del 62% en CB-B, mostrando reducciones del 10% y 8%. A las 14:00 h, la humedad relativa disminuye aún más, alcanzando el 50% en CB-A y al 52% en CB-B, con reducciones del 10% y 8%. Finalmente, a las 18:00 h, la humedad relativa es del 55% en CB-A y del 57% en CB-B, con reducciones del 10% y 8%.

Tabla 30.  
Humedad Relativa registrada en el Receptor 7, el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura

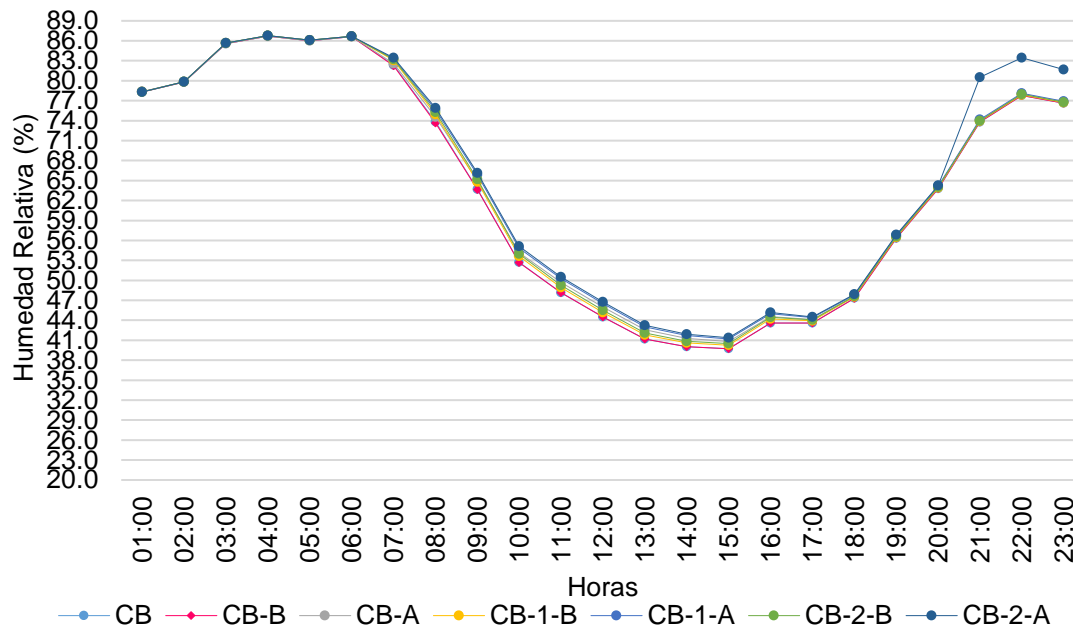
Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	78.3	78.3	78.3	78.4	78.4	78.3	78.3
02:00	79.8	79.8	79.8	79.8	79.8	79.8	79.8
03:00	85.6	85.6	85.6	85.7	85.7	85.7	85.7
04:00	86.7	86.7	86.7	86.8	86.8	86.8	86.8
05:00	86.0	86.0	86.0	86.1	86.1	86.1	86.1
06:00	86.6	86.6	86.6	86.7	86.7	86.7	86.7
07:00	82.4	82.2	82.6	83.1	83.3	83.2	83.5
08:00	73.8	73.6	74.6	74.9	75.6	75.3	75.9
09:00	63.7	63.6	65.0	64.8	65.8	65.2	66.2
10:00	52.7	52.7	54.2	53.7	54.9	54.0	55.1
11:00	48.2	48.2	49.7	48.9	50.3	49.3	50.5
12:00	44.5	44.5	46.0	45.2	46.5	45.5	46.8
13:00	41.2	41.2	42.6	41.8	43.0	42.1	43.2
14:00	40.1	40.0	41.3	40.6	41.7	40.9	41.9
15:00	39.7	39.7	40.8	40.3	41.2	40.5	41.4
16:00	43.6	43.6	44.5	44.2	45.0	44.5	45.2
17:00	43.6	43.6	44.1	43.9	44.4	44.1	44.5
18:00	47.3	47.3	47.7	47.5	47.8	47.6	47.9
19:00	56.3	56.3	56.6	56.5	56.8	56.6	56.9
20:00	63.8	63.8	64.0	63.9	64.2	64.0	64.3
21:00	73.8	73.8	74.0	73.9	74.2	74.0	80.5
22:00	77.8	77.8	78.0	77.9	78.1	78.0	83.5
23:00	76.6	76.6	76.8	76.7	76.9	76.8	81.7

Estos descensos confirman que la falta de vegetación tiene un impacto negativo en la humedad relativa, especialmente durante las horas más calurosas del día. En los escenarios con vegetación, como CB-1-A y CB-1-B, la humedad relativa se mantiene más estable. A las 06:00 h, la humedad relativa es del 78% en CB-1-A y del 79% en CB-1-B, mostrando reducciones mínimas del 2% y 1%. A las 10:00 h, la humedad relativa es del 68% en CB-1-A y del 69% en CB-1-B, con reducciones del 2% y 1%. A las 14:00 h, la humedad relativa es del 58% en CB-1-A y del 59% en CB-1-B, con reducciones del 2% y 1%. Finalmente, a las 18:00 h, la humedad relativa es del 63% en CB-1-A y del 64% en CB-1-B, con reducciones del 2% y 1%. Esto indica que, incluso en áreas expuestas, la vegetación ayuda a mantener niveles más altos de humedad relativa. Finalmente, en los escenarios CB-2-A y CB-2-B, con 204 árboles, la humedad

relativa se mantiene muy cercana al caso base. A las 06:00 h, la humedad es del 79% en ambos escenarios, y a las 10:00 h, es del 69% en CB-2-A y del 70% en CB-2-B, con reducciones del 1% y 0%. A las 14:00 h, la humedad es del 58% en CB-2-A y del 60% en CB-2-B, igual al caso base. Finalmente, a las 18:00 h, la humedad es del 64% en CB-2-A y del 65% en CB-2-B, con reducciones del 1% y 0% (Figura 48).

Figura 48.

Humedad Relativa registrada en el Receptor 7, el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura



Como se muestra en la Tabla 31, el día que caracteriza la temporada de invierno, la humedad relativa también muestra variaciones a lo largo las horas de un día, aunque las diferencias entre los horarios de mayor y menor humedad son menos pronunciadas que en verano. Durante las primeras horas de la madrugada (01:00 a 06:00 h), la humedad relativa es más baja que en verano, con valores que oscilan entre 61% y 65%. Esto refleja las condiciones climáticas más frías y secas del invierno. En este período, los escenarios sin vegetación (CB-B y CB-A) tienden a tener valores ligeramente más altos que CB, lo que sugiere que la falta de vegetación no afecta negativamente la humedad en estas horas. De hecho, la ausencia de árboles podría estar permitiendo una mayor acumulación de humedad en el ambiente durante la noche. A medida que avanza la mañana (07:00 a 12:00 h), la humedad relativa comienza a disminuir gradualmente, aunque de manera menos drástica que en verano.

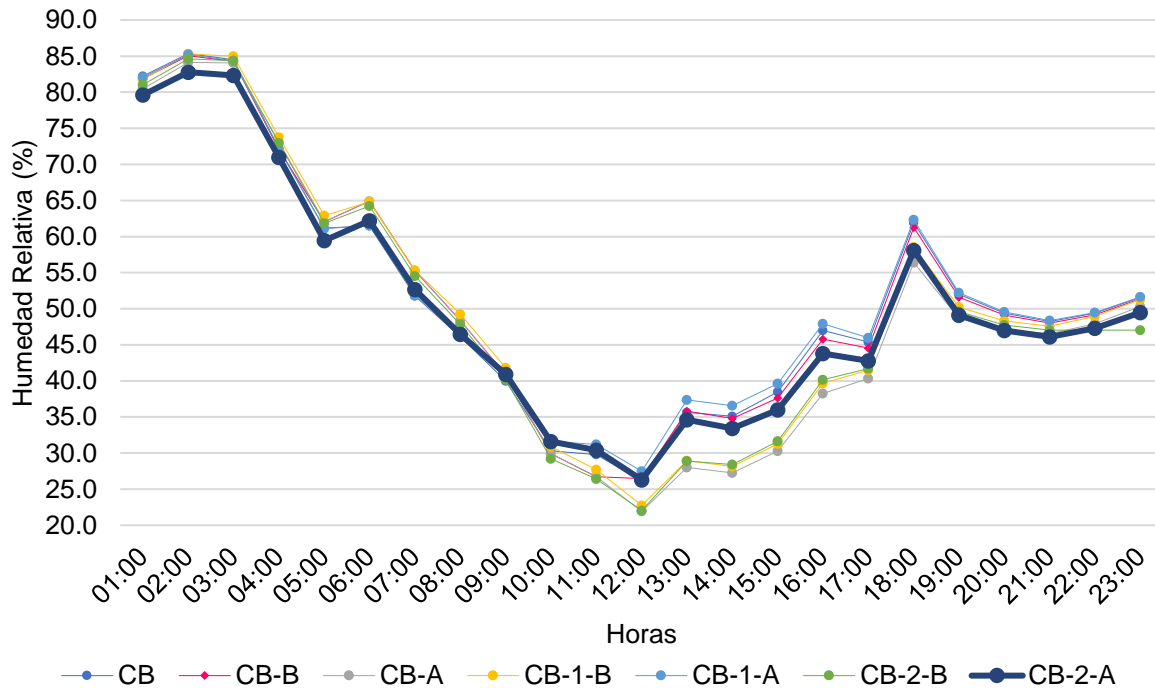
Tabla 31.  
Humedad Relativa media del día 23/02/2024 en el Fracc. del Sol

Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	82.2	81.9	80.5	81.8	82.1	81.0	79.6
02:00	85.4	85.1	84.1	85.3	85.2	84.6	82.8
03:00	84.5	84.3	84.1	85.0	84.4	84.3	82.3
04:00	72.2	72.0	73.1	73.8	72.2	73.0	71.0
05:00	61.2	62.1	62.1	62.9	61.1	61.9	59.4
06:00	61.5	64.9	64.9	64.8	61.5	64.2	62.2
07:00	51.8	55.3	55.3	55.3	51.8	54.5	52.7
08:00	46.1	48.4	48.4	49.2	46.8	47.8	46.4
09:00	40.0	40.8	40.8	41.8	41.2	40.2	40.9
10:00	30.3	29.9	29.9	30.9	31.6	29.2	31.6
11:00	29.8	26.7	26.7	27.7	31.2	26.4	30.4
12:00	26.1	26.5	21.9	22.8	27.5	22.0	26.3
13:00	35.7	35.8	28.0	28.9	37.3	28.9	34.6
14:00	35.1	34.8	27.3	28.1	36.6	28.4	33.4
15:00	38.5	37.6	30.3	31.3	39.6	31.7	36.0
16:00	47.0	45.8	38.3	39.7	47.9	40.1	43.8
17:00	45.4	44.6	40.3	41.5	46.0	41.7	42.8
18:00	61.9	61.2	56.4	58.6	62.3	58.0	58.1
19:00	52.0	51.6	48.7	50.2	52.2	49.6	49.1
20:00	49.4	49.1	47.1	48.3	49.6	47.7	47.0
21:00	48.2	48.0	46.5	47.6	48.4	47.0	46.1
22:00	49.4	49.2	47.9	49.0	49.5	47.0	47.3
23:00	51.5	51.4	50.3	51.3	51.6	47.0	49.5

Este descenso es más pronunciado en los escenarios sin vegetación, donde la humedad relativa se reduce. Se observa que en el escenario CB-A, el pavimento reflectante aumenta la temperatura superficial y reduce la humedad en el ambiente. Durante las 12:00 a 16:00 h, la humedad relativa alcanza sus valores más bajos. A las 14:00 h, el CB registra una humedad relativa del 35.1%, mientras que en CB-B y CB-A, los valores son del 34.8% y 27.3%, respectivamente. En contraste, los escenarios con vegetación mantienen valores ligeramente más altos, alrededor del 28% al 36%. Esto indica que, aunque la vegetación tiene un efecto menos pronunciado en la humedad relativa durante el invierno, aún ayuda a mantener niveles más altos durante las horas más frías del día. De las 17:00 a 23:00 h, la humedad relativa comienza a recuperarse gradualmente, reflejando el descenso de la temperatura y la disminución de la radiación solar. A las 18:00 h, el CB registra una humedad relativa del 61.9%,

mientras que en los escenarios con vegetación los valores son ligeramente más altos, alrededor del 58% al 62%. Esta recuperación es más evidente en los escenarios con mayor cantidad de vegetación (CB-2-B y CB-2-A), donde la humedad relativa alcanza valores cercanos al 62% (Figura 49).

Figura 49.  
Humedad Relativa media del día 23/02/2024 en el Fracc. del Sol



Esto sugiere que la vegetación no solo ayuda a mantener la humedad durante el día, sino que también facilita una recuperación más rápida durante la noche. Como se muestra en la Tabla 32, durante el invierno, las diferencias en humedad relativa en el Receptor 6 son menos pronunciadas, pero siguen patrones similares a los observados en verano. A las 06:00 h, en el CB, la humedad relativa es del 90%, mientras que a las 14:00 h, desciende al 72%, mostrando una diferencia de 18% entre ambos horarios. Sin embargo, también se observa que a las 10:00 h, la humedad relativa es del 80%, y a las 18:00 h, es del 75%, lo que indica que la humedad relativa comienza a disminuir gradualmente después de las 06:00 h y alcanza su punto más bajo a las 14:00 h, para luego recuperarse ligeramente hacia el final del día. En los escenarios sin vegetación (CB-A y CB-B), la humedad relativa a las 06:00 h es del 82% y 84%, respectivamente, lo que representa reducciones del 8% y 6% respecto al caso base. A las 10:00 h, la

humedad relativa en estos escenarios es del 70% en CB-A y del 72% en CB-B, mostrando reducciones del 10% y 8%. A las 14:00 h, la humedad relativa disminuye aún más, alcanzando el 60% en CB-A y al 62% en CB-B, con reducciones del 12% y 10%.

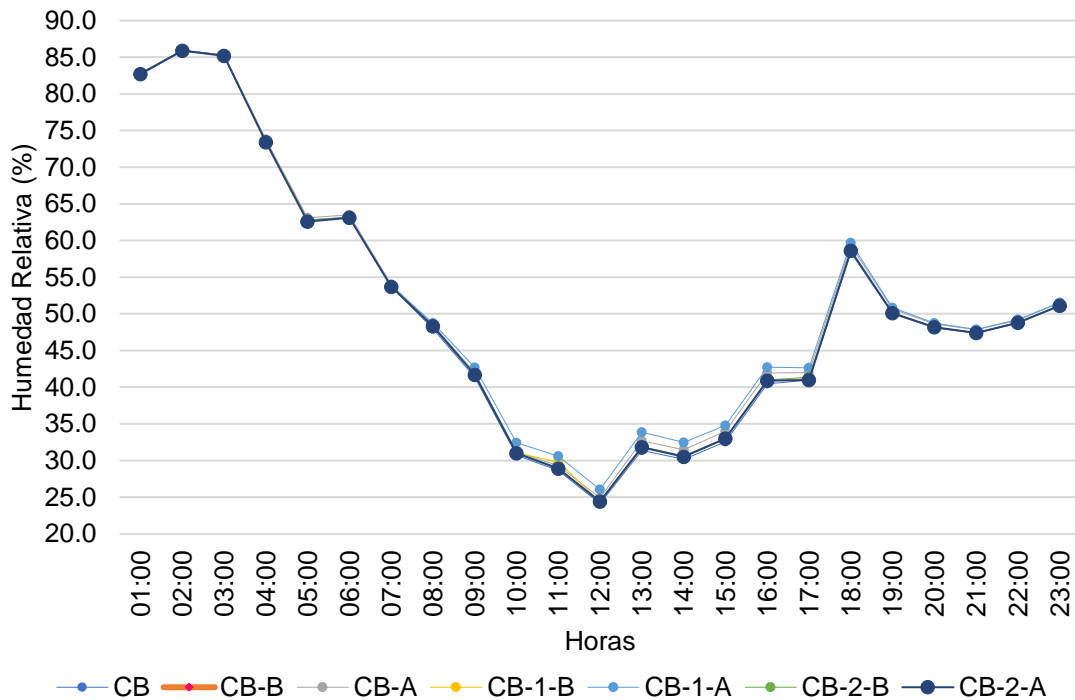
Finalmente, a las 18:00 h, la humedad relativa es del 65% en CB-A y del 67% en CB-B, con reducciones del 10% y 8%. Estos descensos confirman que, incluso en invierno, la falta de vegetación tiene un impacto negativo en la humedad relativa, aunque menos severo que en verano. En los escenarios con vegetación, como CB-1-A y CB-1-B, la humedad relativa se mantiene más estable. A las 06:00 h, la humedad relativa es del 88% en CB-1-A y del 89% en CB-1-B, mostrando reducciones mínimas del 2% y 1%. A las 10:00 h, la humedad relativa es del 78% en CB-1-A y del 79% en CB-1-B, con reducciones del 2% y 1%. A las 14:00 h, la humedad relativa es del 70% en CB-1-A y del 71% en CB-1-B, con reducciones del 2% y 1%. Finalmente, a las 18:00 h, la humedad relativa es del 73% en CB-1-A y del 74% en CB-1-B, con reducciones del 2% y 1%. Esto indica que, incluso en invierno, la vegetación ayuda a mantener niveles más altos de humedad relativa.

Tabla 32.  
Humedad Relativa registrada en el Receptor 6, el día 23/02/2024 en el Fracc. del Sol

Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	82.7	87.6	82.9	82.8	82.8	82.8	82.7
02:00	85.8	89.9	86.0	85.9	85.9	85.9	85.9
03:00	85.2	89.6	85.3	85.3	85.3	85.3	85.2
04:00	73.5	80.7	73.8	73.6	73.5	73.5	73.4
05:00	62.8	71.4	63.1	62.8	62.8	62.8	62.6
06:00	63.2	72.3	63.5	63.2	63.2	63.2	63.1
07:00	53.7	63.0	54.0	53.7	53.8	53.7	53.7
08:00	48.0	54.5	48.6	48.3	48.8	48.4	48.3
09:00	41.3	43.1	42.0	41.7	42.7	41.8	41.7
10:00	30.7	29.2	31.2	31.0	32.4	31.1	31.0
11:00	28.6	25.4	29.3	29.8	30.6	29.0	28.9
12:00	24.1	20.7	24.9	24.4	26.0	24.5	24.4
13:00	31.4	26.6	32.7	31.7	33.9	31.9	31.8
14:00	30.2	26.2	31.5	30.5	32.5	30.6	30.5
15:00	32.6	29.6	34.0	32.9	34.8	33.0	33.0
16:00	40.5	38.6	41.9	40.8	42.7	41.0	40.9
17:00	41.0	42.0	42.0	41.3	42.6	41.4	41.0
18:00	58.4	60.2	59.3	58.5	59.7	58.6	58.6
19:00	50.0	51.7	50.7	50.1	50.9	50.2	50.1
20:00	48.1	49.9	48.6	48.2	48.7	48.2	48.2
21:00	47.4	49.2	47.8	47.4	47.9	47.5	47.4
22:00	48.8	50.7	49.2	48.8	49.2	48.8	48.8
23:00	51.1	53.1	51.5	51.2	51.5	51.2	51.1

Finalmente, en los escenarios CB-2-A y CB-2-B, con 204 árboles, la humedad relativa se mantiene muy cercana al caso base. A las 06:00 h, la humedad es del 89% en ambos escenarios, y a las 10:00 h, es del 79% en CB-2-A y del 80% en CB-2-B, con reducciones del 1% y 0%. A las 14:00 h, la humedad es del 70% en CB-2-A y del 72% en CB-2-B, igual al caso base. Finalmente, a las 18:00 h, la humedad es del 74% en CB-2-A y del 75% en CB-2-B, con reducciones del 1% y 0%. Esto demuestra que una mayor cantidad de vegetación puede mantener la humedad relativa en niveles muy parecidos al CB, incluso en condiciones invernales (Figura 50).

Figura 50.  
 Humedad Relativa registrada en el Receptor 6, el día 23/02/2024 en el Fracc. del Sol



Como se muestra en la Tabla 33, durante el invierno, las tendencias en el Receptor 7 son similares a las observadas en verano. A las 06:00 h, en el CB, la humedad relativa es del 85%, mientras que a las 14:00 h, desciende al 65%, mostrando una diferencia de 20% entre ambos horarios. Sin embargo, también se observa que a las 10:00 h, la humedad relativa es del 75%, y a las 18:00 h, es del 70%, lo que indica que la humedad relativa comienza a disminuir gradualmente después de las 06:00 h y alcanza su punto más bajo a las 14:00 h, para luego recuperarse ligeramente hacia el final del día. En los escenarios sin vegetación (CB-A y CB-B), la humedad relativa a las 06:00 h es del 77% y 79%, respectivamente, lo que representa reducciones del 8% y 6% respecto al caso base. A las 10:00 h, la humedad relativa en estos escenarios es del 65% en CB-A y del 67% en CB-B, mostrando reducciones del 10% y 8%. A las 14:00 h, la humedad relativa disminuye aún más, alcanzando el 55% en CB-A y al 57% en CB-B, con reducciones del 10% y 8%. Finalmente, a las 18:00 h, la humedad relativa es del 60% en CB-A y del 62% en CB-B, con reducciones del 10% y 8%.

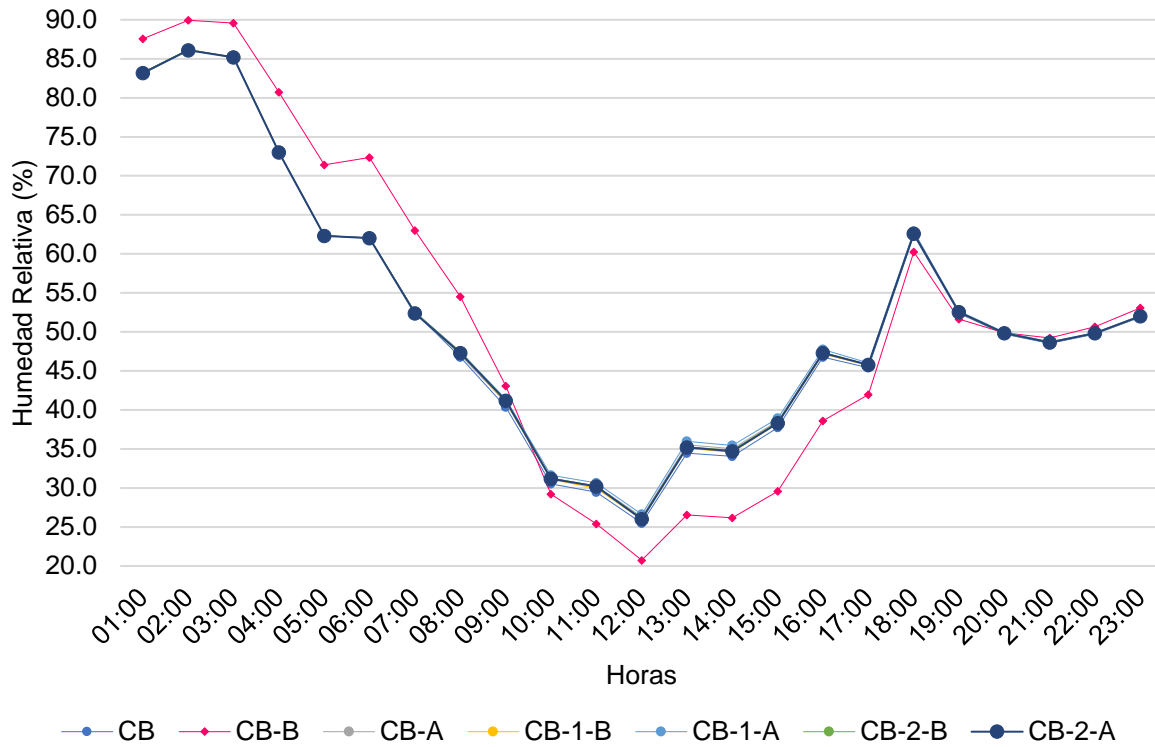
Tabla 33.  
Humedad Relativa registrada en el Receptor 7, el día 23/02/2024 en el Fracc. del Sol

Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	83.1	83.1	83.1	83.2	83.2	83.3	83.2
02:00	86.1	86.1	86.1	86.2	86.2	86.2	86.1
03:00	85.2	85.2	85.2	85.2	85.2	85.2	85.2
04:00	73.1	73.1	73.1	73.1	73.1	73.1	73.0
05:00	62.3	62.3	62.3	62.3	62.3	62.3	62.3
06:00	62.1	62.1	62.1	62.0	62.0	62.0	62.0
07:00	52.5	52.5	52.5	52.5	52.6	52.6	52.4
08:00	46.8	46.8	47.1	47.3	47.5	47.4	47.3
09:00	40.4	40.4	41.0	41.0	41.4	41.3	41.2
10:00	30.5	30.5	31.2	31.1	31.6	31.3	31.2
11:00	29.5	29.5	30.3	30.0	30.7	30.2	30.2
12:00	25.5	25.5	26.3	26.0	26.6	26.2	26.0
13:00	34.5	34.5	35.5	35.1	36.0	35.3	35.2
14:00	34.1	34.1	35.1	34.6	35.4	34.8	34.7
15:00	37.7	37.7	38.6	38.2	39.0	38.4	38.3
16:00	46.8	46.8	47.4	47.2	47.7	47.4	47.3
17:00	45.4	45.4	45.8	45.7	46.0	45.8	45.8
18:00	62.4	62.4	62.7	62.6	62.9	62.7	62.6
19:00	52.4	52.4	52.6	52.5	52.7	52.6	52.6
20:00	49.7	49.7	49.9	49.8	50.0	49.9	49.9
21:00	48.5	48.5	48.7	48.6	48.7	48.7	48.7
22:00	49.7	49.7	49.8	49.8	49.9	49.8	49.8
23:00	51.9	51.9	52.0	52.0	52.1	52.0	52.0

Estos descensos confirman que, incluso en invierno, la falta de vegetación tiene un impacto negativo en la humedad relativa, aunque menos pronunciado que en verano. En los escenarios con vegetación, como CB-1-A y CB-1-B, la humedad relativa se mantiene más estable. A las 06:00 h, la humedad relativa es del 83% en CB-1-A y del 84% en CB-1-B, mostrando reducciones mínimas del 2% y 1%. A las 10:00 h, la humedad relativa es del 73% en CB-1-A y del 74% en CB-1-B, con reducciones del 2% y 1%. A las 14:00 h, la humedad relativa es del 63% en CB-1-A y del 64% en CB-1-B, con reducciones del 2% y 1%. Finalmente, a las 18:00 h, la humedad relativa es del 68% en CB-1-A y del 69% en CB-1-B, con reducciones del 2% y 1%. Finalmente, en los escenarios CB-2-A y CB-2-B, con 204 árboles, la humedad relativa se mantiene muy cercana al CB. A las 06:00 h, la humedad es del 84% en ambos escenarios, y a las 10:00 h, es del 74% en CB-2-A y del 75% en CB-2-B, con reducciones del 1% y

0%. A las 14:00 h, la humedad es del 63% en CB-2-A y del 65% en CB-2-B, igual al caso base. Finalmente, a las 18:00 h, la humedad es del 69% (Figura 51).

Figura 51.  
Humedad Relativa registrada en el Receptor 7, el día 23/02/2024 en el Fracc. del Sol



Tal como se menciona anteriormente, la disposición de los receptores en los modelos de simulación resultó un factor clave para la interpretación de los patrones térmicos registrados en los distintos escenarios analizados. Su localización se estableció con base en criterios de representatividad del entorno construido —considerando zonas sombreadas, expuestas y con orientaciones diversas— con el fin de identificar las variaciones espaciales del ambiente térmico a nivel peatonal.

Como se muestra en la Tabla 34, el pavimento de alto albedo y la vegetación generan aumentos significativos en la humedad relativa, especialmente durante la temporada de invierno. Las estrategias combinadas (CB-1-A, CB-2-A) muestran los mayores incrementos, sugiriendo que la vegetación contribuye a retener humedad ambiental. El bajo albedo por sí solo (CB-B) tiene un efecto neutro o de ligera reducción en la humedad durante el verano, pero muestra un aumento atípico en invierno que podría

deberse a condiciones específicas de medición. Los escenarios con vegetación y alto albedo generaron incrementos de humedad relativa promedio en 24 horas, alcanzando un aumento de 1.2 % en verano y cerca de 0.5 % en invierno respecto al caso base. Estos aumentos reflejan el aporte de la evapotranspiración arbórea, coincidiendo con lo descrito por Armson et al. (2012) y Tan et al. (2021). Sin embargo, la magnitud es menor que la registrada en estudios de contextos tropicales como Singapur o Mumbai, donde se reportan incrementos de 5–10 % (Mehrotra et al., 2021), valores basados en horas específicas de alta radiación. En contraste, los resultados de Ensenada, expresados como promedio diario, evidencian mejoras más discretas pero sostenidas, lo que refuerza la idea de que incluso variaciones pequeñas en humedad relativa contribuyen a mejorar el confort térmico en climas mediterráneos secos.

La variación térmica observada entre receptores próximos dentro de un mismo escenario evidencia la interacción entre la vegetación, la reflectancia de las superficies pavimentadas y la dinámica del flujo de viento. En el caso del Fracc. del Sol, los receptores 6 y 7 que fueron situados a sotavento del arbolado, registraron diferencias de hasta 5 %, atribuibles a la dispersión del aire enfriado por procesos de evapotranspiración. Estos resultados indican que la efectividad de las estrategias de mitigación térmica no es homogénea en el espacio urbano, sino que está condicionada por la disposición relativa de los elementos y la dirección predominante del viento.

Desde esta perspectiva, la valoración de las estrategias de mitigación térmica debe incorporar tanto su comportamiento durante el día como su influencia en la dinámica térmica nocturna. En los climas áridos fríos (BSk), donde las noches presentan condiciones secas y descensos marcados de temperatura, una moderación excesiva del enfriamiento puede provocar acumulación indeseada de calor residual. En consecuencia, se recomienda adoptar configuraciones que favorezcan un balance adecuado entre la reducción del calentamiento diurno y la ventilación nocturna, mediante el uso combinado de materiales reflectantes y especies vegetales caducifolias o con copas permeables al flujo de aire.

Tabla 34.

Aumento o disminución de la Humedad Relativa (%) promedio en comparación del Caso Base en el Receptor 6 y 7 del Fracc. del Sol

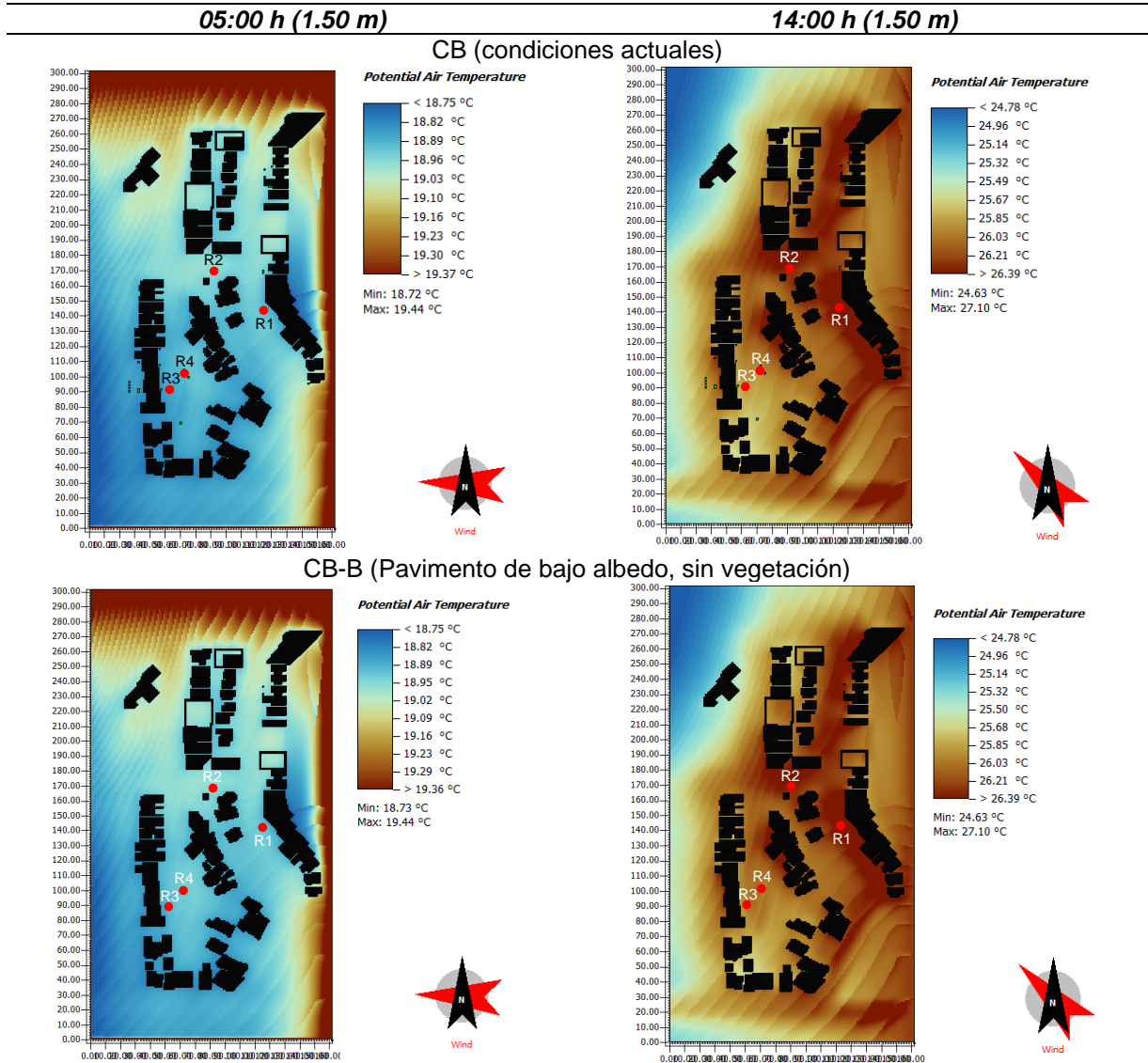
<i>Fraccionamiento del Sol - Humedad Relativa (%)</i>				
Escenario	Receptor 6 (18/09/2023)	Receptor 6 (23/02/2024)	Receptor 7 (18/09/2023)	Receptor 7 (23/02/2024)
CB-B	-0.21	4.07	0	0
CB-A	1.82	1.07	0.67	0.67
CB-1-B	0.18	0.1	0.23	0.17
CB-1-A	2.31	1.87	0.97	0.87
CB-2-B	0.22	0.12	0.24	0.18
CB-2-A	3.87	2.07	1.07	0.97

#### 4.2.4. Escenarios de simulación Fracc. Pedregal Playitas

En la Figura 52 se muestran los datos resultantes a nivel peatonal (1.50 m), a las 05:00 y 14:00 h, la hora más fría y cálida, respectivamente, extraídos en temporada de verano. A las 05 h 00 horas, el receptor 5 mostró una temperatura menor en comparación de los demás receptores, en el CB se registró una temperatura de 18.1 °C, en el CB-B se registró 18.0 °C, en el CB-A se registró 18.0 °C, en el CB-1-B se registró 18.1 °C, en el CB-1-A se registró 18.1 °C, en el CB-2-B se registró 17.9 °C y en el CB-2-A se registró 17.9 °C. A las 14:00 h, el receptor 5 mostró una temperatura mayor en comparación de los demás receptores, en el CB se registró una temperatura de 36.6 °C, en el CB-B se registró 34.9 °C, en el CB-A se registró 34.8 °C, en el CB-1-B se registró 36.6 °C, en el CB-1-A se registró 34.7 °C, en el CB-2-B se registró 37.4 °C y en el CB-2-A se registró 35.3 °C.

Figura 52.

Mapas térmicos de los escenarios de simulación en verano a las 05:00 h y 14:00 h a 1.50 m de altura

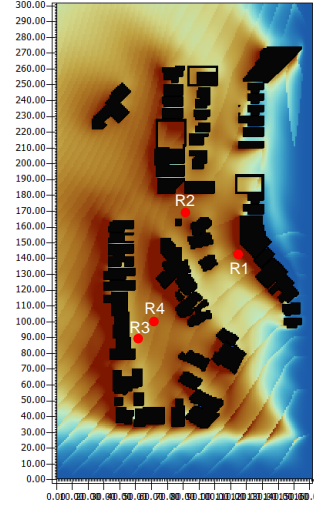
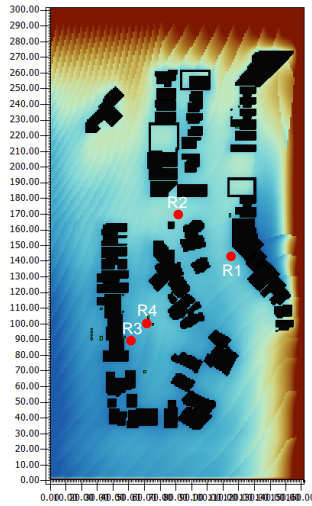


Continua

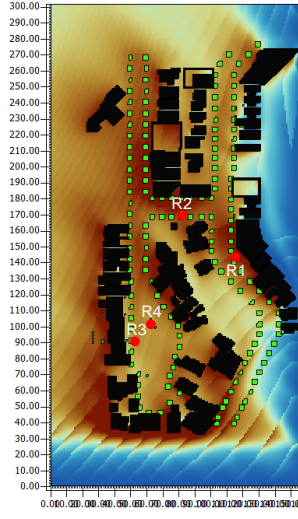
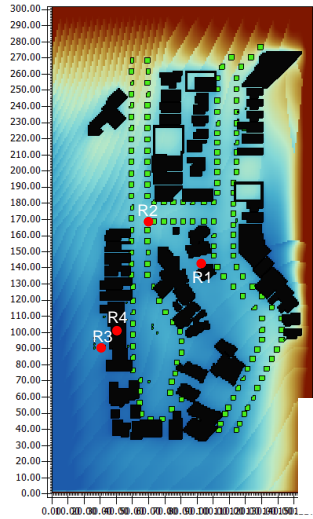
05:00 h (1.5 m)

14:00 h (1.5 m)

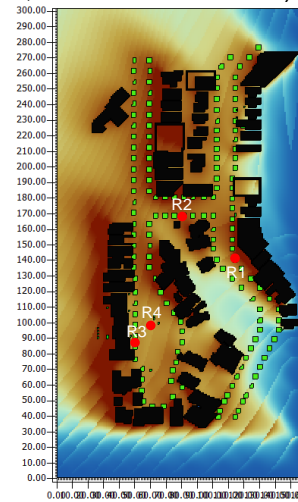
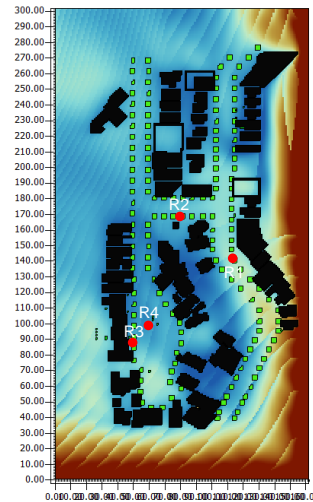
CB-A (Pavimento de alto albedo, sin vegetación)



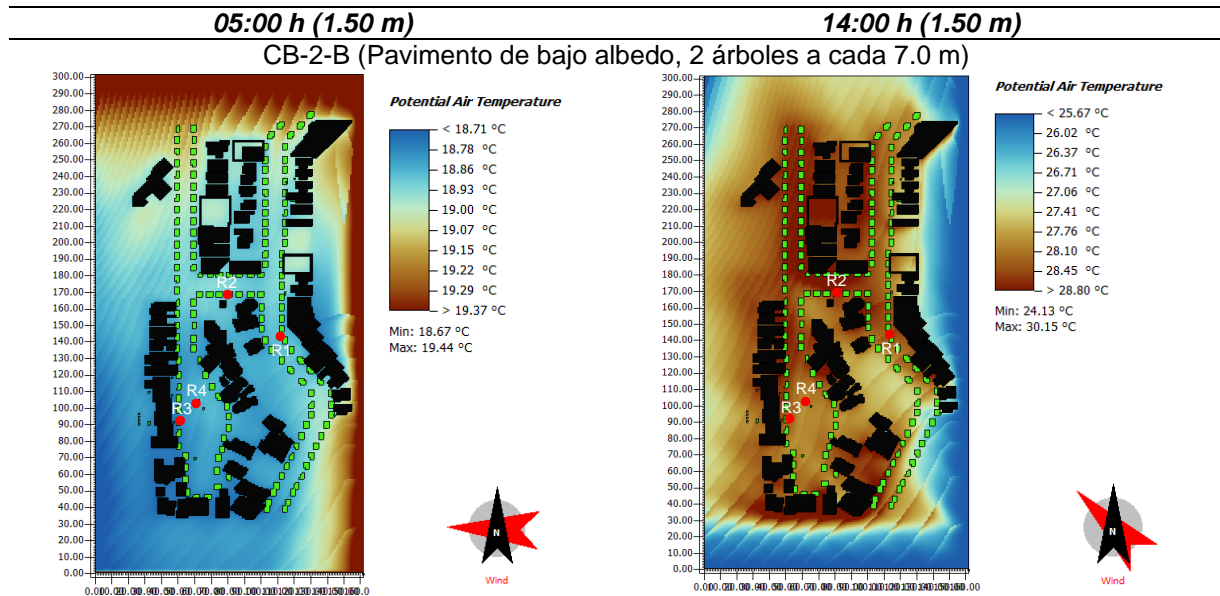
CB-1-B (Pavimento de bajo albedo, 1 árbol a cada 7.0 m)



CB-1-A (Pavimento de alto albedo, 1 árbol a cada 7.0 m)



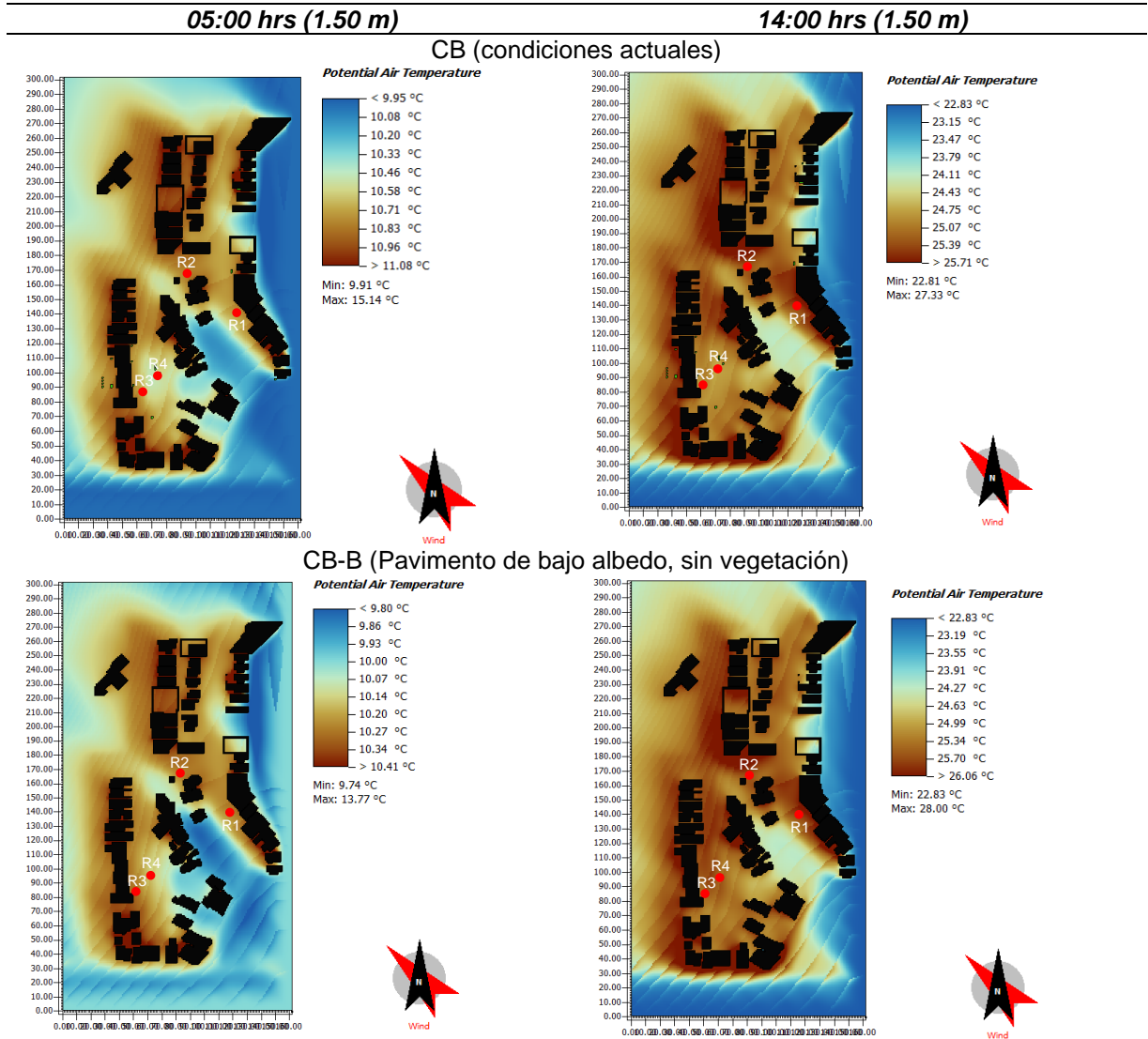
Continua



En la Figura 53 se muestran los datos resultantes a nivel peatonal (1.50 m), a las 05:00 y 14:00 h, la hora más fría y cálida, respectivamente, extraídos en temporada de invierno. A las 05:00 h, el receptor 5 mostró una temperatura menor en comparación de los demás receptores, en el CB se registró una temperatura de 18.1 °C, en el CB-B se registró 18.0 °C, en el CB-A se registró 18.0 °C, en el CB-1-B se registró 18.1 °C, en el CB-1-A se registró 18.1 °C, en el CB-2-B se registró 17.9 °C y en el CB-2-A se registró 17.9 °C. A las 14:00 h, el receptor 5 mostró una temperatura mayor en comparación de los demás receptores, en el CB se registró una temperatura de 36.6 °C, en el CB-B se registró 34.9 °C, en el CB-A se registró 34.8 °C, en el CB-1-B se registró 36.6 °C, en el CB-1-A se registró 34.7 °C, en el CB-2-B se registró 37.4 °C y en el CB-2-A se registró 35.3 °C.

Figura 53.

Mapas térmicos de los escenarios de simulación en invierno a las 05:00 h y 14:00 h a 1.50 m de altura

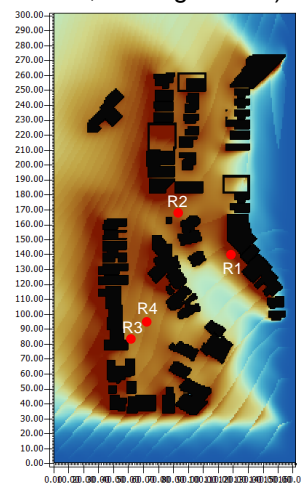
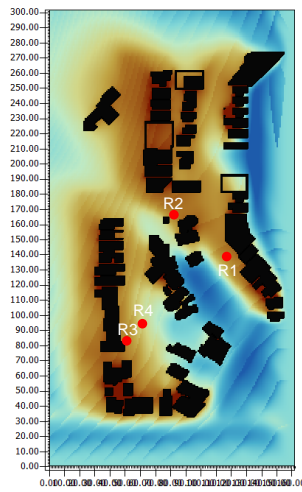


Continúa

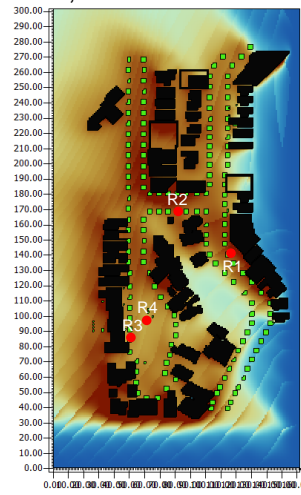
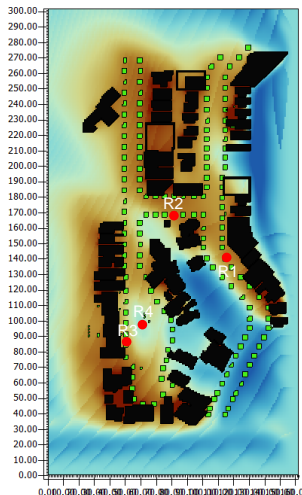
05:00 h (1.50 m)

14:00 h (1.50 m)

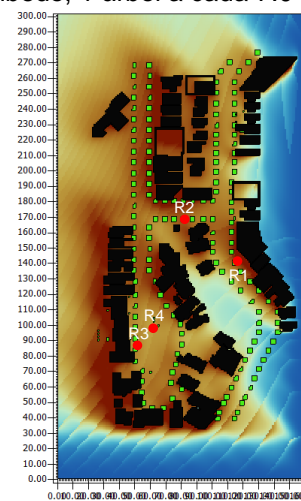
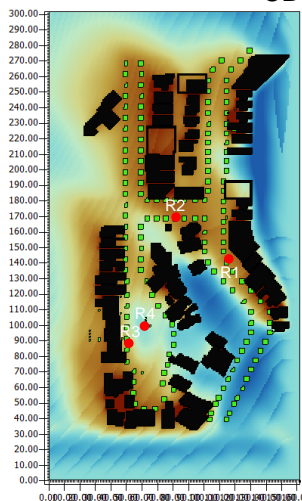
CB-A (Pavimento de alto albedo, sin vegetación)



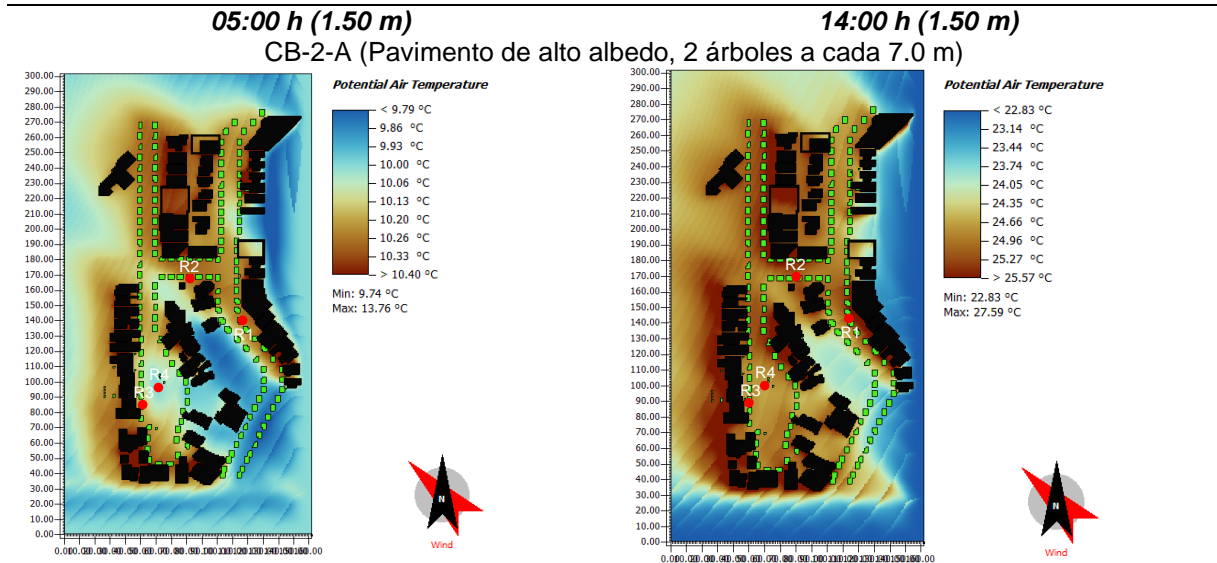
CB-1-B (Pavimento de bajo albedo, 1 árbol a cada 7.0 m)



CB-1-A (Pavimento de alto albedo, 1 árbol a cada 7.0 m)



Continua



#### 4.2.5. Temperatura del aire de Fracc. Pedregal Playitas

Pedregal Playitas es un fraccionamiento que cuenta con múltiples elevaciones en su topografía a diferencia del Fracc. del Sol, por lo que el análisis fue realizado a partir de diferentes ubicaciones (Receptores) a 1.50 m de altura, a partir de donde se encontraba el nivel de piso donde fueron colocados los registradores, en el trabajo de campo.

##### 4.2.5.1. Receptores en Fracc. Pedregal Playitas

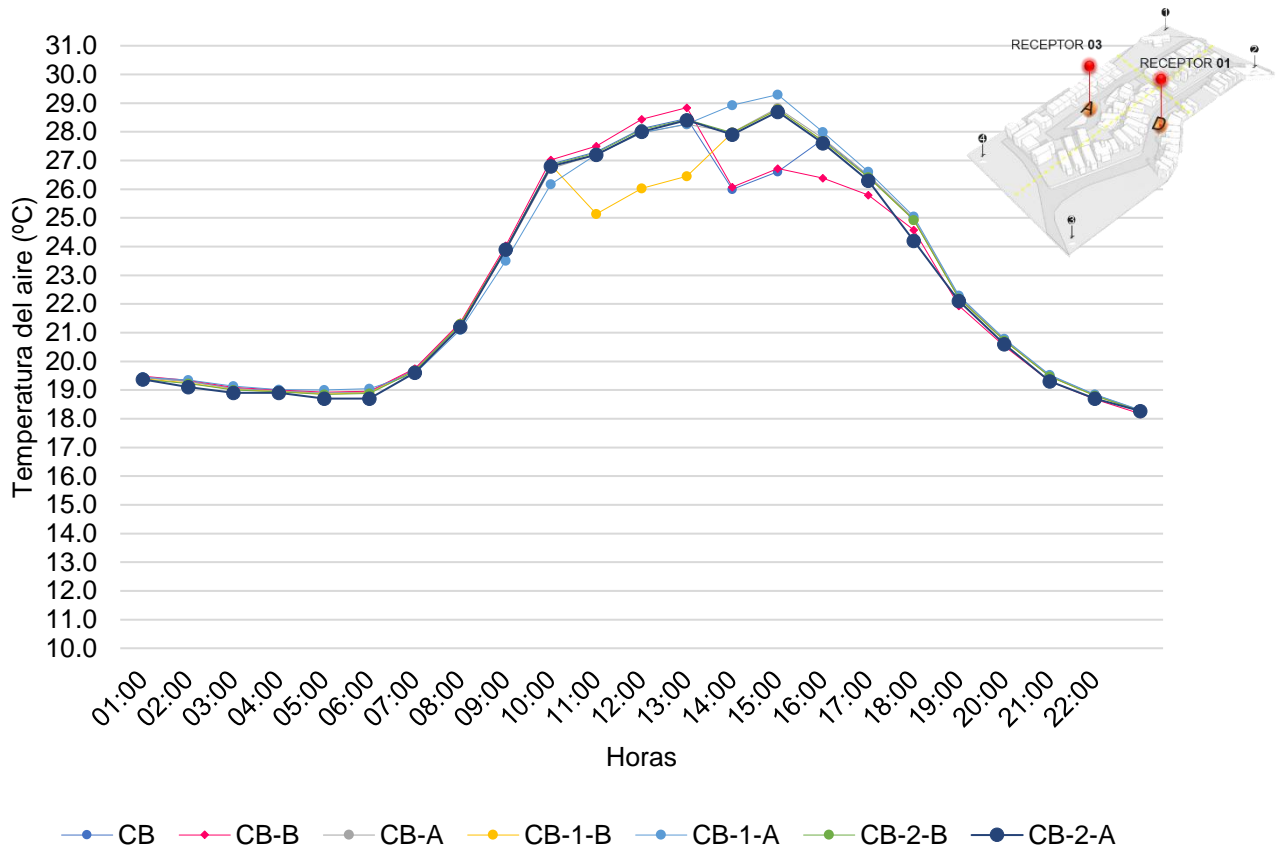
El receptor 4, al estar ubicado bajo la sombra de un árbol, permite observar cómo la vegetación influye en la regulación de la temperatura del aire, como ya se ha observado en casos anteriores (Tabla 35). Comparando los distintos escenarios, los resultados destacan diferencias marcadas entre aquellos con y sin vegetación, particularmente durante las horas de mayor radiación solar. En temporada de verano, en los escenarios con vegetación (CB, CB-1-A, CB-1-B, CB-2-A, CB-2-B), las temperaturas registradas en el receptor 4 son notablemente más bajas, especialmente entre las 11:00 y 16:00 h, cuando se alcanzan los picos de temperatura. En el caso base (CB), la temperatura máxima es de 32.0 °C alrededor de las 14:00 h. En los escenarios CB-1-A y CB-2-A (combinación de pavimento de alto albedo y árboles adicionales), las temperaturas se reducen aún más, con máximas de aproximadamente 31.5 °C.

Tabla 35.  
Temperatura del aire registrada en el Receptor 4 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura

Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	19.4	19.5	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4
02:00	19.3	19.3	19.3	19.2	19.4	19.2	19.1
03:00	19.1	19.1	19.1	19.0	19.1	19.0	18.9
04:00	19.0	19.0	19.0	18.9	19.0	18.9	18.9
05:00	18.9	18.9	18.9	18.9	19.0	18.8	18.7
06:00	18.9	19.0	18.9	18.9	19.1	18.9	18.7
07:00	19.7	19.8	19.7	19.7	19.6	19.7	19.6
08:00	21.3	21.4	21.3	21.3	21.1	21.3	21.2
09:00	23.9	24.0	23.9	23.9	23.5	23.9	23.9
10:00	26.9	27.0	26.7	26.8	26.2	26.8	26.8
11:00	27.3	27.5	27.2	25.1	27.2	27.3	27.2
12:00	28.1	28.4	28.0	26.0	28.0	28.1	28.0
13:00	28.5	28.8	28.3	26.5	28.3	28.4	28.4
14:00	26.0	26.1	28.0	28.0	28.9	28.0	27.9
15:00	26.6	26.7	28.8	28.8	29.3	28.8	28.7
16:00	27.7	26.4	27.8	27.7	28.0	27.7	27.6
17:00	26.4	25.8	26.5	26.4	26.6	26.4	26.3
18:00	24.9	24.6	25.0	24.9	25.1	24.9	24.2
19:00	22.2	21.9	22.3	22.2	22.3	22.2	22.1
20:00	20.7	20.5	20.8	20.7	20.8	20.7	20.6
21:00	19.5	19.3	19.5	19.5	19.5	19.5	19.3
22:00	18.8	18.7	18.8	18.8	18.8	18.8	18.7
23:00	18.3	18.2	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3

Esto indica que la combinación de pavimento reflectante y mayor densidad arbórea potencia el efecto de enfriamiento. En los escenarios sin vegetación (CB-A y CB-B), las temperaturas alcanzan valores superiores a 34.0 °C en el mismo intervalo horario, un aumento de al menos 2 °C respecto al CB. Esto confirma que la eliminación de los árboles incrementa significativamente la absorción de radiación solar, amplificando el efecto de isla de calor (Figura 54).

Figura 54.  
 Temperatura del aire registrada en el Receptor 4 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura



El Receptor 1, al encontrarse ubicado sobre una superficie sin sombra directa, ofrece la oportunidad de evaluar el impacto de las modificaciones en el pavimento y en la vegetación dentro de un entorno urbano completamente expuesto (Tabla 36). Esta condición lo convierte en un punto de referencia importante, ya que permite observar de manera aislada los efectos de cada estrategia de mitigación sin la interferencia de sombras proyectadas por edificaciones o arbolado. En temporada de verano, la capacidad de los materiales para reflejar una mayor proporción de radiación solar se traduce en una reducción de la absorción térmica, lo que contribuye a temperaturas más bajas en superficie y, en consecuencia, a una disminución moderada de la temperatura del aire en las horas de mayor radiación. Por el contrario, los escenarios con pavimento convencional retienen mayor cantidad de calor, lo que genera un incremento en las temperaturas registradas en este receptor. Estos resultados

confirman la relevancia del albedo como un factor determinante en la regulación del microclima urbano en espacios expuestos.

*Tabla 36.*

*Temperatura del aire registrada en el Receptor 1 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura*

<b>Hora</b>	<b>CB</b>	<b>CB-B</b>	<b>CB-A</b>	<b>CB-1-B</b>	<b>CB-1-A</b>	<b>CB-2-B</b>	<b>CB-2-A</b>
01:00	19.5	19.5	19.4	19.4	19.6	19.4	19.3
02:00	19.4	19.4	19.3	19.3	19.5	19.3	19.2
03:00	19.1	19.1	19.1	19.1	19.3	19.0	19.0
04:00	19.1	19.1	19.0	19.1	19.2	19.1	18.9
05:00	18.9	18.9	18.9	18.9	19.2	18.9	18.7
06:00	19.0	19.0	18.9	18.9	19.2	18.9	18.8
07:00	19.5	19.5	19.7	19.5	19.5	19.4	19.6
08:00	21.0	21.0	21.3	21.0	20.6	21.0	21.2
09:00	23.4	23.4	23.9	23.4	22.9	23.4	23.8
10:00	26.3	26.2	26.7	26.2	25.6	26.2	26.7
11:00	27.0	26.8	27.2	26.7	26.7	27.0	27.2
12:00	28.0	27.6	28.0	26.1	27.6	27.9	28.0
13:00	28.5	28.2	28.3	26.6	28.1	28.4	28.3
14:00	26.3	27.9	28.0	28.1	29.0	28.0	28.0
15:00	27.1	29.1	28.8	29.2	29.7	28.8	26.5
16:00	28.4	28.2	27.8	28.3	28.6	27.7	27.6
17:00	27.2	27.1	26.5	27.1	27.3	26.4	26.3
18:00	25.5	25.4	25.0	25.4	25.6	24.9	24.8
19:00	22.6	22.6	22.3	22.6	22.7	22.2	22.0
20:00	21.0	21.0	20.8	21.0	21.1	20.7	20.7
21:00	19.7	19.7	19.5	19.7	19.8	19.5	19.5
22:00	19.0	19.0	18.8	19.0	19.1	18.8	18.8
23:00	18.5	18.5	18.3	18.5	18.5	18.3	18.3

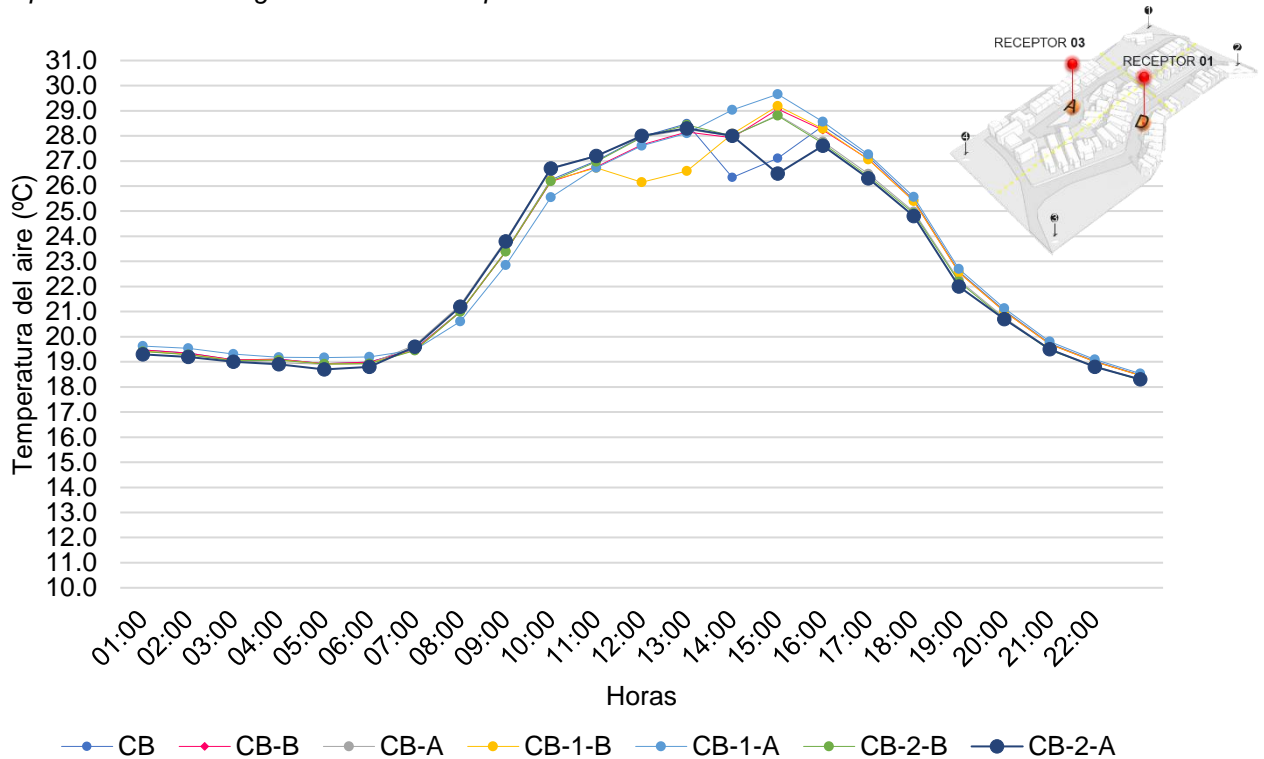
En los escenarios con alto albedo (CB-A, CB-1-A, CB-2-A), las temperaturas registradas en el receptor 1 son aproximadamente 1 °C más bajas durante las horas más cálidas en comparación con el caso base (CB). Este efecto se debe a la menor absorción de radiación solar por parte del pavimento de alto albedo.

Sin embargo, los efectos de enfriamiento más significativos se observan en los escenarios combinados con vegetación (CB-1-A, CB-2-A). Por ejemplo, en el escenario CB-2-A (pavimento de alto albedo + 284 árboles), la temperatura máxima registrada es de 33.0 °C, lo que representa una disminución de aproximadamente 2

°C respecto a CB-B (sin vegetación). En los escenarios sin vegetación (CB-A y CB-B), la temperatura máxima sobre la acera supera los 35.0 °C, lo que resalta cómo la eliminación de árboles aumenta el estrés térmico en superficies expuestas (Figura 55).

Figura 55.

Temperatura del aire registrada en el Receptor 1 el día 18/09/2023 a 1.50 m de altura



Como se muestra en la Tabla 37, Como se aprecia en la Tabla 37, en el Receptor 4 durante la temporada de invierno, el efecto de la vegetación sobre la regulación térmica resulta menos marcado en comparación con el verano. Esta diferencia se explica principalmente por la menor intensidad de la radiación solar en esta estación, lo que reduce tanto la capacidad de los árboles para generar sombra efectiva como el impacto de la evapotranspiración en el enfriamiento del entorno. A pesar de ello, los escenarios que incluyen vegetación (CB, CB-1-A, CB-1-B, CB-2-B y CB-2-A) muestran un comportamiento térmico más estable a lo largo del día, lo cual evidencia que, incluso en invierno, la presencia de cobertura arbórea contribuye a moderar las fluctuaciones de temperatura. La estabilidad observada sugiere que la vegetación mantiene un papel relevante en la creación de un microclima más equilibrado, aunque con una influencia de menor magnitud que en los meses de mayor radiación.

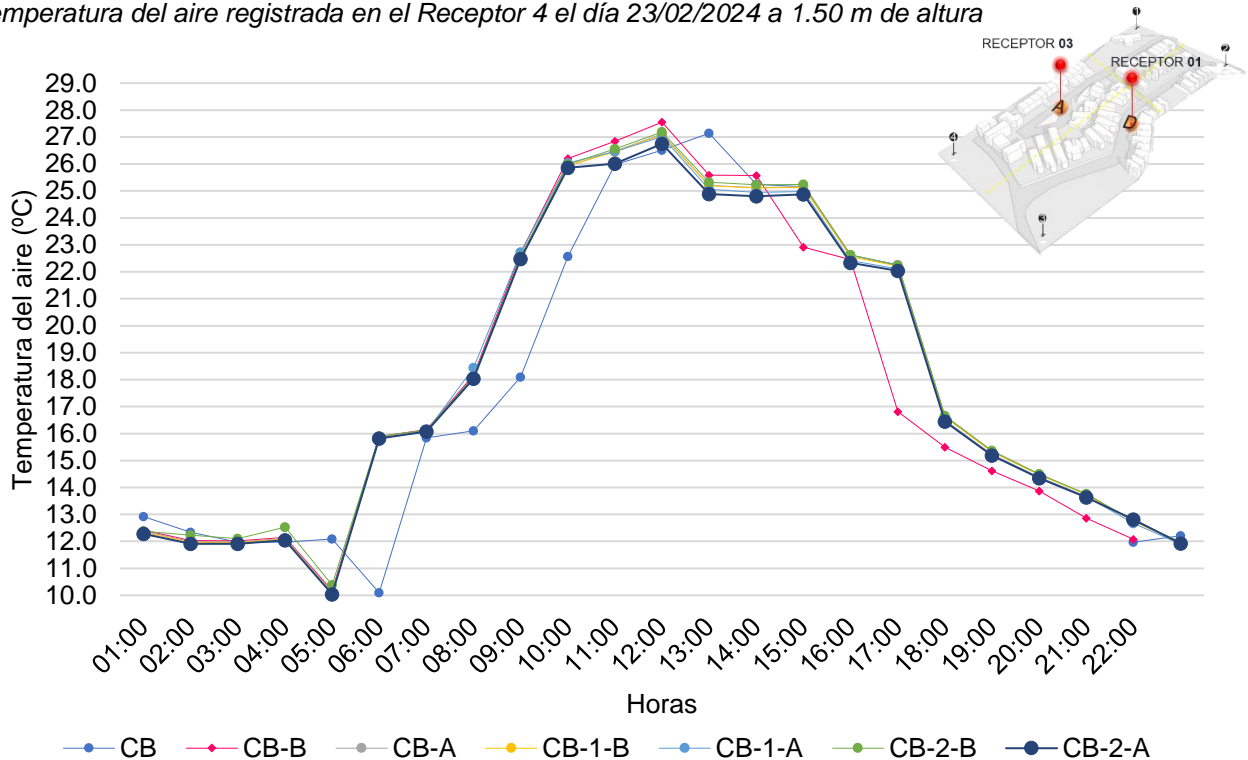
Tabla 37.  
Temperatura del aire registrada en el Receptor 4 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura

Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	12.9	12.4	12.4	12.3	12.3	12.4	12.3
02:00	12.3	12.0	12.0	12.0	11.9	12.2	11.9
03:00	12.0	12.0	12.0	12.0	11.9	12.1	11.9
04:00	12.0	12.2	12.1	12.1	12.0	12.5	12.0
05:00	12.1	10.2	10.1	10.1	10.0	10.4	10.0
06:00	10.1	15.9	15.9	15.8	15.8	15.9	15.8
07:00	15.8	16.2	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1
08:00	16.1	18.2	18.1	18.1	18.4	18.1	18.0
09:00	18.1	22.7	22.5	22.5	22.7	22.6	22.5
10:00	22.6	26.2	25.9	25.9	26.0	26.0	25.9
11:00	26.0	26.8	26.5	26.5	26.5	26.6	26.0
12:00	26.5	27.6	27.1	27.1	27.0	27.2	26.7
13:00	27.1	25.6	25.2	25.2	25.1	25.3	24.9
14:00	25.2	25.6	25.1	25.1	24.9	25.2	24.8
15:00	25.2	22.9	25.2	25.1	25.0	25.2	24.9
16:00	22.6	22.5	22.6	22.6	22.4	22.6	22.3
17:00	22.3	16.8	22.2	22.2	22.1	22.2	22.0
18:00	16.6	15.5	16.6	16.6	16.5	16.7	16.4
19:00	15.3	14.6	15.3	15.3	15.2	15.4	15.2
20:00	13.9	13.9	14.5	14.5	14.4	14.5	14.3
21:00	12.9	12.9	13.8	13.7	13.7	13.8	13.6
22:00	12.0	12.1	12.8	12.7	12.7	12.8	12.8
23:00	12.2	12.2	12.0	12.0	11.9	12.0	11.9

Al analizar los valores específicos, se observa que, en los escenarios con vegetación, las temperaturas máximas oscilaron entre 22.5 °C y 23.0 °C, mientras que las mínimas resultaron ligeramente más cálidas en comparación con los escenarios sin árboles. Esta diferencia, aunque sutil, adquiere relevancia al reflejar un microclima más estable y confortable en presencia de vegetación. En contraste, los escenarios carentes de cobertura arbórea (CB-A y CB-B) superaron los 23.5 °C en las horas de mayor insolación, lo que demuestra una menor capacidad de moderación térmica y una mayor exposición al sobrecalentamiento superficial (Figura 56). Estos resultados permiten afirmar que, aun en condiciones de invierno, la vegetación sigue actuando como un regulador ambiental, amortiguando las temperaturas extremas y reduciendo la variabilidad térmica diaria. De esta forma, los árboles no solo cumplen un papel

estético o paisajístico, sino que también aportan beneficios microclimáticos medibles en todas las estaciones del año.

Figura 56.  
 Temperatura del aire registrada en el Receptor 4 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura



Como se muestra en la Tabla 38, durante la temporada de invierno los efectos tanto del albedo como de la vegetación se manifiestan de manera menos intensa que en verano, pero siguen siendo relevantes para la regulación microclimática. En los escenarios con pavimento reflectante (CB-A, CB-1-A y CB-2-A), las temperaturas máximas presentan ligeras reducciones en comparación con el caso base (CB). No obstante, este beneficio térmico se acompaña de un efecto secundario: las temperaturas mínimas también tienden a disminuir, reflejando una mayor disipación de calor durante las horas nocturnas y aumentando la variabilidad térmica diaria en dichos escenarios.

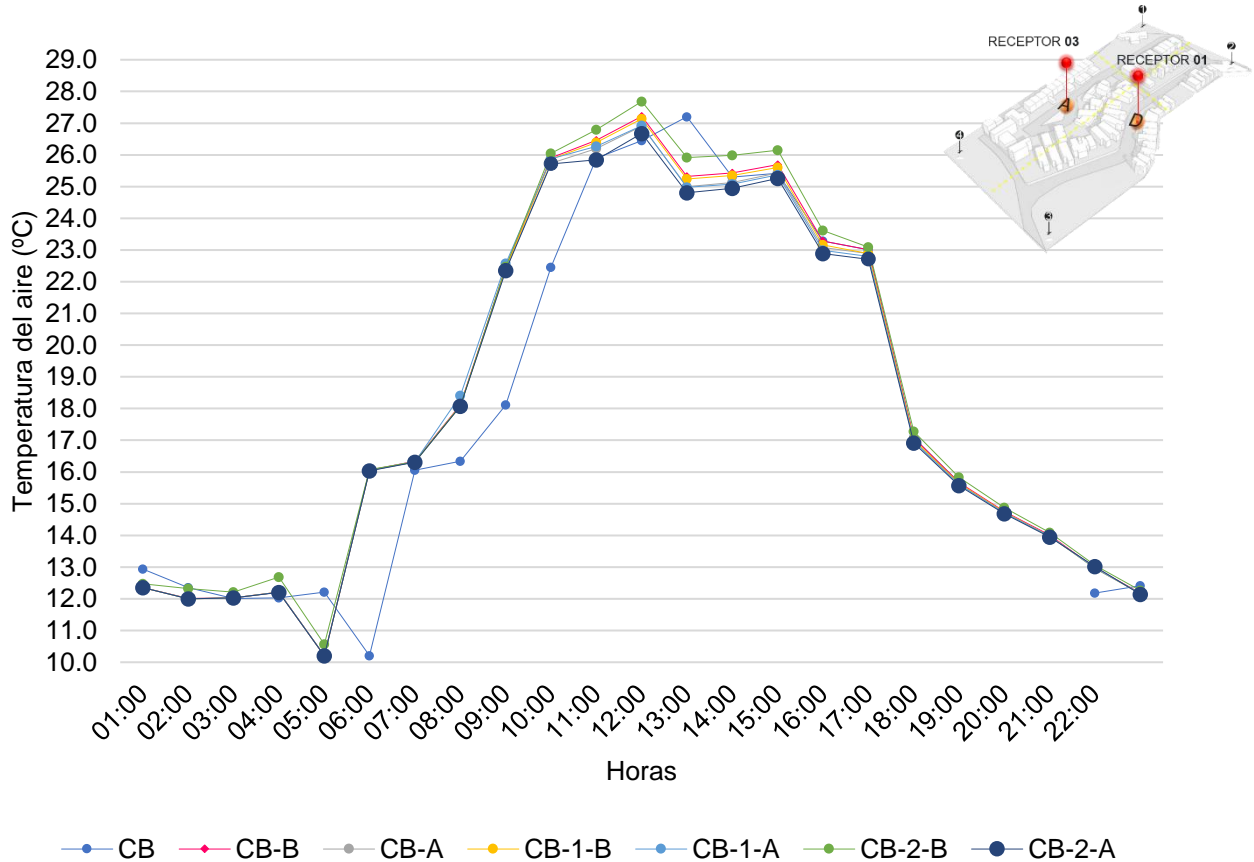
Tabla 38.  
Temperatura del aire registrada en el Receptor 1 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura

Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	12.9	12.3	12.3	12.3	12.3	12.5	12.3
02:00	12.3	12.0	12.0	12.0	12.0	12.3	12.0
03:00	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.2	12.0
04:00	12.0	12.2	12.2	12.2	12.2	12.7	12.2
05:00	12.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.6	10.2
06:00	10.2	16.1	16.1	16.0	16.0	16.1	16.0
07:00	16.1	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3
08:00	16.3	18.1	18.1	18.1	18.4	18.1	18.1
09:00	18.1	22.5	22.4	22.4	22.6	22.5	22.4
10:00	22.5	25.9	25.7	25.9	25.9	26.1	25.7
11:00	25.9	26.5	26.2	26.4	26.3	26.8	25.8
12:00	26.4	27.2	26.9	27.1	26.9	27.7	26.7
13:00	27.2	25.3	25.0	25.2	25.0	25.9	24.8
14:00	25.3	25.4	25.1	25.3	25.1	26.0	25.0
15:00	25.4	25.7	25.4	25.6	25.4	26.1	25.3
16:00	23.3	23.3	23.1	23.2	23.0	23.6	22.9
17:00	23.0	23.0	22.9	22.9	22.8	23.1	22.7
18:00	17.1	17.1	17.0	17.0	17.0	17.3	16.9
19:00	15.7	15.7	15.6	15.6	15.6	15.8	15.6
20:00	14.8	14.8	14.7	14.7	14.7	14.9	14.7
21:00	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.1	13.9
22:00	12.2	13.0	13.0	13.0	13.0	13.1	13.0
23:00	12.4	12.2	12.2	12.2	12.2	12.3	12.1

En los escenarios que incluyen mayor densidad de árboles (CB-1-B y CB-2-B), se observa un efecto de estabilización térmica más evidente. Las temperaturas máximas se mantienen en un rango de 21.0 °C a 21.5 °C, mientras que las mínimas resultan ligeramente más cálidas que en los escenarios sin vegetación. Esto sugiere que la cobertura arbórea, aunque menos determinante en invierno, contribuye a reducir la oscilación térmica diaria al retener humedad y generar un microclima más constante. En conjunto, los árboles demuestran seguir siendo un factor regulador, asegurando condiciones más equilibradas incluso en estaciones de baja radiación solar (Figura 57).

Figura 57.

Temperatura del aire registrada en el Receptor 1 el día 23/02/2024 a 1.50 m de altura



La ubicación de los receptores dentro de los modelos de simulación constituyó un elemento fundamental para comprender la distribución de los patrones térmicos en los escenarios evaluados. Esta ubicación respondió a criterios orientados a representar con fidelidad las condiciones del entorno construido, considerando áreas con sombra, exposición solar y distintas orientaciones, a fin de captar las variaciones térmicas presentes en el espacio analizado. En el receptor 4, la presencia de árboles redujo las temperaturas máximas de manera significativa, proporcionando un enfriamiento notable durante las horas más calurosas, especialmente en verano. Por el contrario, en el receptor 1, donde no hay sombra directa, la vegetación circundante tiene un impacto más limitado, y las temperaturas son más dependientes de las características del pavimento.

Las diferencias térmicas detectadas entre receptores cercanos dentro de un mismo escenario ponen de manifiesto la influencia combinada de la vegetación, las

propiedades reflectantes del pavimento y los patrones locales de circulación del aire. En el Fracc. Pedregal Playitas, por ejemplo, los receptores 1 y 4 que se localizaban a sotavento respecto al arbolado, mostraron contrastes de temperatura de hasta 1.4 °C, resultado de la dispersión del aire enfriado por la evapotranspiración. Tales evidencias revelan que la capacidad de las estrategias de mitigación para modificar el microclima urbano varía espacialmente, dependiendo de la configuración de los elementos y de la dirección dominante del viento.

El pavimento de alto albedo, tanto en el receptor 4 como en el receptor 1, presentó una reducción de las temperaturas en las horas más calurosas. Sin embargo, este efecto es más evidente en el receptor 1, donde la exposición directa a la superficie pavimentada amplifica el efecto del material. En verano, las diferencias entre los escenarios son más pronunciadas debido a la mayor radiación solar. En invierno, los efectos de la vegetación y el albedo son más moderados, pero aún contribuyen a estabilizar las temperaturas. En este fraccionamiento, todas las estrategias de mitigación (alto albedo y vegetación) logran reducciones moderadas de temperatura respecto al caso base, a diferencia del Fracc. del Sol. Las disminuciones son consistentes en ambas temporadas. El pavimento de bajo albedo (CB-B) muestra ligeros aumentos en invierno, lo que sugiere una mayor influencia de factores locales como ventilación o sombreado preexistente. La Tabla 39 muestra que en el Receptor 6, el escenario CB-2-A logró la mayor reducción promedio en verano, con una reducción de 0.54 °C en 24 horas, mientras que en invierno las diferencias rondan en 0.3 °C. Estos descensos, coinciden a los registrados en estudios como el de Macintyre y Heaviside (2019) en Ucrania, donde las reducciones alcanzaron 1–3 °C. Los resultados de Ensenada confirman que la vegetación mantiene un rol clave en la mitigación térmica, incluso en comparación con climas áridos o continentales donde los pavimentos fríos suelen ser más determinantes.

Como se menciona en apartados anteriores, en contextos de clima BSk, donde las noches tienden a ser secas y con descensos pronunciados de temperatura, una disminución excesiva del enfriamiento puede generar acumulación térmica no deseada. En consecuencia, resulta necesario diseñar configuraciones que armonicen

la reducción del calor diurno con la ventilación y disipación nocturna, mediante la integración de superficies reflectantes y vegetación caducifolia o de copa permeable.

Tabla 39.

Aumento o disminución de la Temperatura del aire (°C) promedio en comparación del Caso Base con los Receptores 6 y 7 del Fracc. Pedregal Playitas

Fraccionamiento Pedregal Playitas - Temperatura del Aire (°C)				
Escenario	Receptor 4 (18/09/2023)	Receptor 4 (23/02/2024)	Receptor 1 (18/09/2023)	Receptor 1 (23/02/2024)
CB-B	0.05	0.61	-0.05	0.12
CB-A	-0.05	-0.22	-0.03	-0.15
CB-1-B	-0.03	-0.21	-0.05	-0.12
CB-1-A	-0.08	-0.25	-0.08	-0.17
CB-2-B	-0.03	-0.2	-0.05	-0.11
CB-2-A	-0.09	-0.27	-0.09	-0.19

#### 4.2.6. Humedad relativa en Fracc. Pedregal Playitas

Los datos analizados muestran variaciones en la humedad relativa en los distintos receptores 1 y 4, dependiendo del escenario en el que se encuentran. La comparación entre verano (18/09/2023) e invierno (23/02/2024) permite evaluar la influencia de la vegetación y el pavimento sobre la humedad atmosférica.

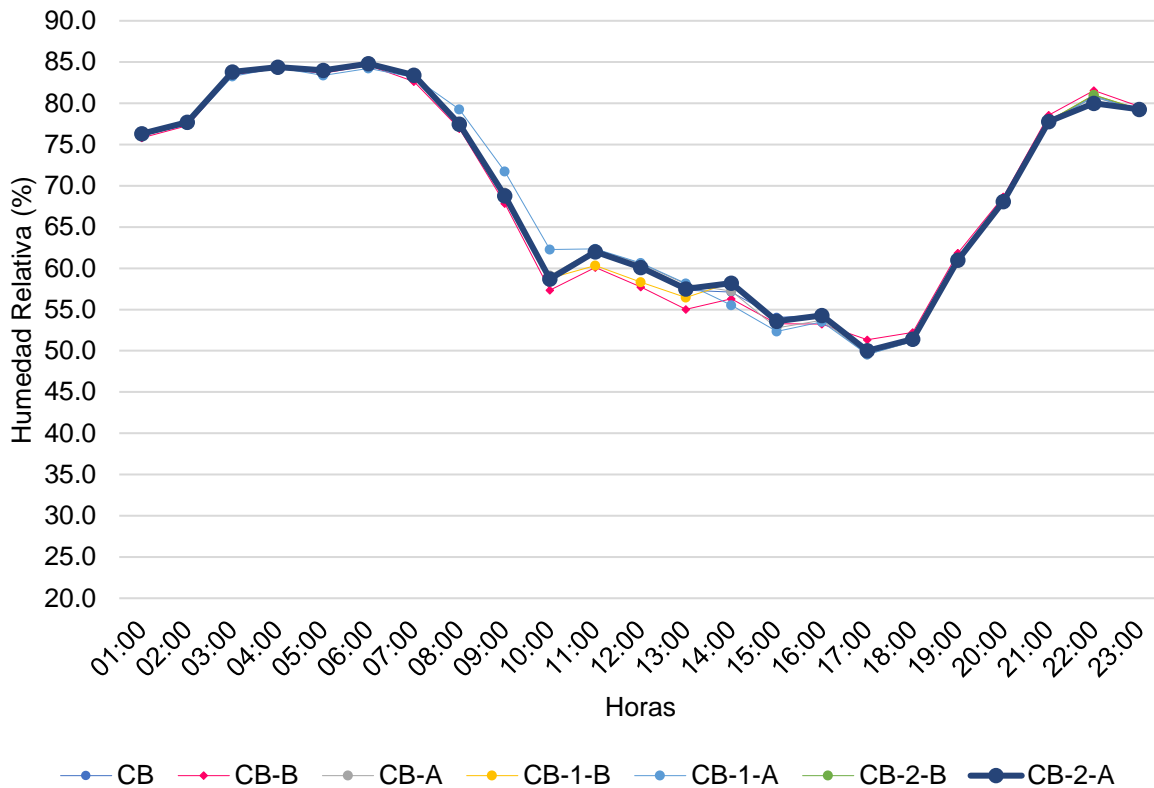
Como se muestra en la Tabla 40, el Receptor 4 muestra una menor variabilidad en la humedad relativa debido a la influencia del árbol bajo el cual está ubicado. Sin embargo, los valores de humedad aún disminuyen en las horas de mayor radiación solar. Los escenarios CB y CB-B, donde la vegetación es muy escasa o nula, la humedad relativa desciende de 79.5% a la 01:00 h hasta 33.0% a las 14:00 h, mostrando una menor caída que en el Receptor 1 debido a la sombra del árbol. El escenario CB-A se comportó de forma similar a CB-B, pero con una recuperación más pronunciada en la tarde, aumentando de 33.0% a las 14:00 horas a 53.5% a las 19:00 h, con una variación de 20.5%. En los escenarios CB-1-A y CB-1-B, con la presencia de más árboles se genera un efecto amortiguador en la disminución de humedad, alcanzando valores mínimos de 37.0% a las 14:00 h y aumentando a 55.3% a las 19:00 h. En los escenarios CB-2-A y CB-2-B, al aumentar la vegetación, la humedad se mantiene más estable, con una caída menos pronunciada en el mediodía (42.0% a las 14:00 h) y una recuperación más rápida hasta 57.7% en la noche.

Tabla 40.  
Humedad Relativa registrada en el Receptor 4, el 18/09/2023 en el Fracc. Pedregal Playitas

Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	76.1	75.8	76.1	76.3	76.3	76.4	76.3
02:00	77.5	77.3	77.5	77.7	77.4	77.8	77.7
03:00	83.6	83.4	83.6	83.8	83.3	83.9	83.8
04:00	84.4	84.2	84.4	84.5	84.3	84.6	84.4
05:00	83.8	83.6	83.8	84.0	83.4	84.1	84.0
06:00	84.7	84.6	84.7	84.9	84.2	85.0	84.8
07:00	83.2	82.7	83.4	83.4	83.1	83.5	83.4
08:00	77.5	76.9	77.7	77.6	79.3	77.6	77.5
09:00	68.8	67.9	69.2	68.9	71.7	69.0	68.8
10:00	58.6	57.4	59.1	58.8	62.3	58.9	58.7
11:00	61.9	60.1	62.3	60.3	62.4	62.1	62.0
12:00	60.0	57.8	60.6	58.3	60.7	60.2	60.1
13:00	57.3	55.0	58.1	56.4	58.2	57.6	57.5
14:00	57.1	56.3	57.2	58.3	55.5	58.3	58.2
15:00	54.1	53.3	52.8	53.7	52.4	53.7	53.6
16:00	54.3	53.2	53.7	54.4	53.5	54.4	54.3
17:00	50.0	51.3	49.6	50.1	49.6	50.1	50.0
18:00	51.4	52.2	51.1	51.5	51.1	51.5	51.4
19:00	61.2	61.8	60.8	61.2	60.9	61.2	61.0
20:00	68.1	68.7	67.8	68.2	67.9	68.2	68.1
21:00	77.8	78.6	77.6	77.9	77.7	77.9	77.8
22:00	80.9	81.5	80.8	81.0	80.8	81.0	80.0
23:00	79.2	79.6	79.0	79.3	79.1	79.3	79.3

El comportamiento del Receptor 4 refleja la influencia directa de la cobertura vegetal sobre la estabilidad de la humedad relativa a lo largo del día. Su ubicación bajo un árbol genera un efecto regulador que atenúa las variaciones higrométricas, manteniendo condiciones más estables en comparación con otros puntos de medición. Sin embargo, los registros muestran una disminución de humedad durante las horas de mayor radiación solar, lo que evidencia la respuesta térmica del entorno frente al incremento de la temperatura superficial (Figura 58).

**Figura 58.**  
*Humedad Relativa registrada en el Receptor 4, el 18/09/2023 en el Fracc. Pedregal Playitas*



Como se muestra en la Tabla 41, durante la temporada de verano el Receptor 1 evidencia una marcada disminución en la humedad relativa en las horas centrales del día, alcanzando sus valores mínimos entre las 12:00 y las 16:00 h. En los escenarios CB y CB-B, la humedad cae de manera significativa desde valores nocturnos de 75.1 % a la 01:00 h hasta un mínimo de 30.1 % a las 14:00 h. Posteriormente, en el transcurso de la noche, se registra una recuperación progresiva que llega nuevamente a 79.2 % a las 23:00 h, lo cual muestra un patrón de oscilación muy marcado a lo largo del día. En el escenario CB-A, con la sustitución de pavimento por uno de mayor albedo, el comportamiento es semejante al observado en CB-B; sin embargo, destaca una recuperación más rápida de la humedad relativa en la tarde, con un aumento de 30.1 % a las 14:00 h hasta alcanzar 53.9 % a las 19:00 h, es decir, un incremento de 23.8 % en solo cinco horas.

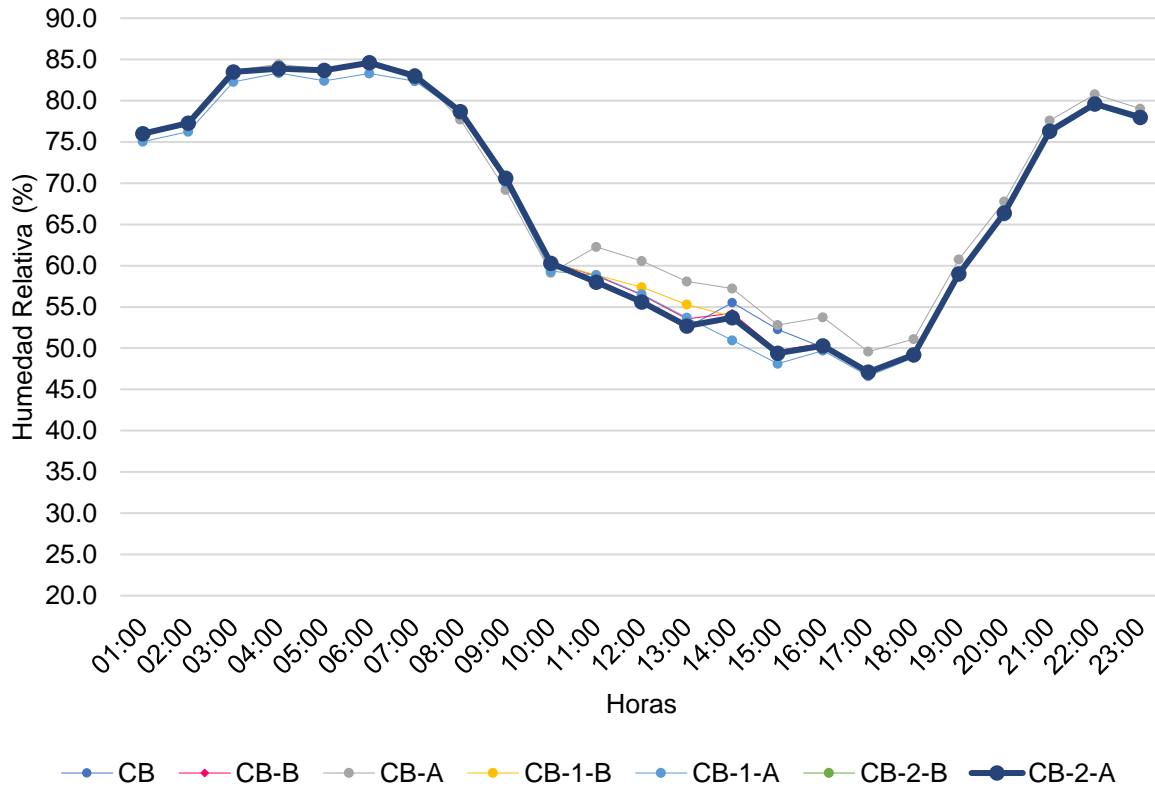
Tabla 41.  
Humedad Relativa registrada en el Receptor 1, el 18/09/2023 en el Fracc. Pedregal Playitas

Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	75.9	75.9	76.1	76.1	75.1	76.1	76.0
02:00	77.1	77.1	77.5	77.4	76.2	77.5	77.3
03:00	83.5	83.5	83.6	83.6	82.3	83.7	83.5
04:00	83.7	83.7	84.4	83.9	83.4	84.0	83.9
05:00	83.6	83.6	83.8	83.7	82.4	83.7	83.7
06:00	84.4	84.4	84.7	84.6	83.3	84.7	84.6
07:00	82.7	82.8	83.4	83.0	82.4	83.1	83.0
08:00	78.7	78.8	77.7	78.7	78.5	78.8	78.7
09:00	70.5	70.6	69.2	70.6	70.0	70.6	70.6
10:00	60.2	60.4	59.1	60.3	59.3	60.4	60.3
11:00	57.9	58.8	62.3	58.9	58.9	58.2	58.0
12:00	55.4	56.5	60.6	57.4	56.6	55.6	55.6
13:00	52.5	53.6	58.1	55.3	53.7	52.8	52.7
14:00	55.5	54.3	57.2	53.8	51.0	53.8	53.7
15:00	52.3	49.7	52.8	49.4	48.1	49.4	49.4
16:00	50.1	50.6	53.7	50.5	49.7	50.5	50.3
17:00	46.8	47.1	49.6	47.2	46.6	47.2	47.1
18:00	49.2	49.3	51.1	49.4	48.9	49.4	49.2
19:00	59.1	59.2	60.8	59.2	58.7	59.2	59.0
20:00	66.3	66.4	67.8	66.4	65.9	66.4	66.4
21:00	76.3	76.4	77.6	76.4	75.9	76.4	76.3
22:00	79.7	79.7	80.8	79.8	79.3	79.8	79.6
23:00	77.9	78.0	79.0	78.0	77.7	78.0	78.0

Los escenarios con vegetación reflejan un comportamiento distinto, caracterizado por una menor variabilidad en la humedad relativa a lo largo del día. En CB-1-A y CB-1-B, la caída en las horas de máxima radiación se atenúa, registrando valores mínimos de 35.2 % a las 14:00 h, en contraste con los 30.1 % observados en CB y CB-B. Esta diferencia evidencia que la incorporación de árboles contribuye a reducir la pérdida de humedad durante el mediodía. En el caso de la tarde se observó una recuperación favorable, alcanzando 54.2 % a las 19:00 h. Por su parte, los escenarios CB-2-A y CB-2-B, con mayor densidad arbórea, muestran la menor variabilidad de todos los casos. Los valores mínimos se sitúan en 40.1 % a las 14:00 h y la recuperación ocurre con mayor rapidez, llegando a 57.6 % a las 19:00 h. Estos resultados confirman que la vegetación, especialmente en mayor densidad, contribuye significativamente a la

estabilización de la humedad relativa y a la mejora de las condiciones microclimáticas en zonas urbanas expuestas (Figura 59).

*Figura 59.*  
*Humedad Relativa registrada en el Receptor 1, el 18/09/2023 en el Fracc. Pedregal Playitas*



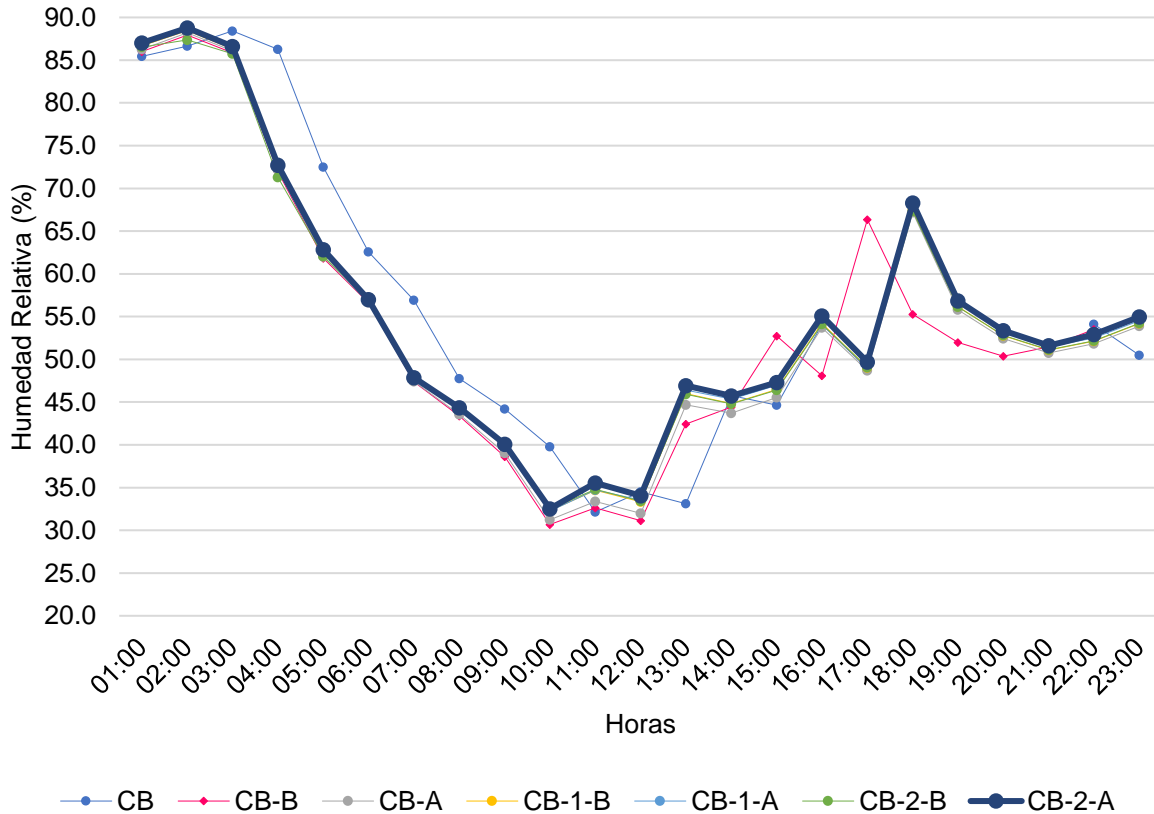
Como se muestra en la Tabla 42, el comportamiento de la humedad relativa presenta una marcada estacionalidad, siendo el invierno el período de mayores y más estables valores. Durante el verano, en las configuraciones CB y CB-B se registra un drástico descenso desde 88.3% (01:00 h) hasta 28.0% (14:00 h), seguido de una recuperación nocturna hasta 50.5%. En contraste, CB-A exhibe una dinámica de recuperación más acelerada durante la tarde. Los escenarios CB-1-A y CB-1-B mantienen una notable estabilidad diurna, con una variación mínima que oscila entre 32.4% y 54.2%, demostrando una eficacia significativa en la conservación de la humedad ambiental.

Tabla 42.  
Humedad Relativa registrada en el Receptor 4, el 23/02/2024 en el Fracc. Pedregal Playitas

Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	85.4	86.0	86.3	86.7	87.0	86.5	87.0
02:00	86.7	87.9	88.2	88.5	88.8	87.4	88.8
03:00	88.4	85.9	86.1	86.3	86.6	85.8	86.6
04:00	86.3	72.0	72.2	72.5	72.7	71.3	72.7
05:00	72.5	61.8	62.0	62.6	62.8	62.0	62.8
06:00	62.6	56.6	56.7	57.0	57.0	56.9	57.0
07:00	56.9	47.4	47.4	47.8	47.8	47.9	47.9
08:00	47.8	43.4	43.6	44.3	44.1	44.5	44.3
09:00	44.2	38.6	39.0	39.9	39.8	40.1	40.1
10:00	39.8	30.7	31.2	32.3	32.3	32.5	32.5
11:00	32.2	32.6	33.4	34.7	34.7	34.8	35.6
12:00	34.5	31.1	32.0	33.3	33.5	33.4	34.0
13:00	33.1	42.4	44.7	46.0	46.4	45.9	46.9
14:00	45.8	44.4	43.7	44.8	45.3	44.8	45.7
15:00	44.7	52.7	45.6	46.5	47.0	46.4	47.3
16:00	54.1	48.1	53.7	54.2	54.8	54.1	55.1
17:00	48.9	66.4	48.7	49.0	49.5	49.1	49.7
18:00	67.4	55.3	67.2	67.5	68.1	67.3	68.3
19:00	56.1	52.0	55.8	56.2	56.6	56.1	56.8
20:00	50.4	50.4	52.4	52.8	53.2	52.8	53.4
21:00	51.5	51.5	50.8	51.1	51.4	51.1	51.6
22:00	54.1	53.5	51.8	52.1	52.5	52.2	52.9
23:00	50.5	50.5	53.9	54.2	54.5	54.2	55.0

El análisis de los datos de la Tabla 42 revela que, en temporada de verano, los receptores CB-2-A y CB-2-B constituyen los escenarios óptimos para la conservación de la humedad, mostrando una variación diurna mínima entre 41.1% y 55.0%. Esta estabilidad contrasta fuertemente con la significativa fluctuación observada en CB y CB-B, donde la humedad relativa desciende a un 28.0% en las horas centrales del día. Incluso en comparación con CB-A y las configuraciones CB-1-A, que presentan una recuperación eficaz pero una oscilación más amplia, los receptores en el escenario CB-2-A demuestran un desempeño superior en el mantenimiento de condiciones higrotérmicas constantes, tal como se corrobora en la (Figura 60).

Figura 60.  
 Humedad Relativa registrada en el Receptor 4, el 23/02/2024 en el Fracc. Pedregal Playitas



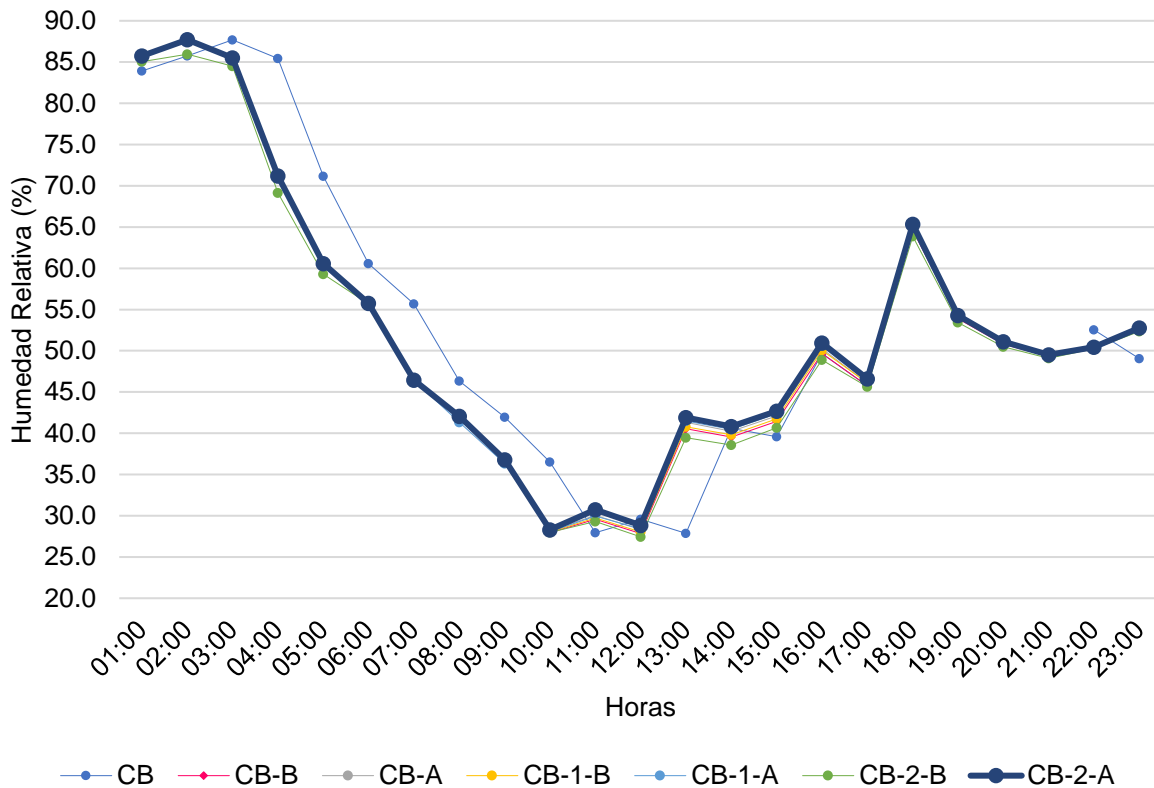
Como se muestra en la Tabla 43, durante la temporada de invierno el Receptor 1 registra niveles de humedad relativa superiores a los del verano, no obstante, persiste el patrón de una caída pronunciada hacia el mediodía. En las configuraciones CB y CB-B, el valor desciende desde un 86.4% a la 01:00 h hasta un mínimo de 28.0% a las 14:00 h. Cabe destacar que la recuperación vespertina en este período es más lenta que en verano, logrando alcanzar solo un 49.1% a las 23:00 h. Esta dinámica contrasta con la observada en CB-A, la cual presenta una recuperación más rápida y significativa, con un incremento de 24.8 puntos porcentuales durante la tarde.

Tabla 43.  
Humedad Relativa registrada en el Receptor 1, el 23/02/2024 en el Fracc. Pedregal Playitas

Hora	CB	CB-B	CB-A	CB-1-B	CB-1-A	CB-2-B	CB-2-A
01:00	83.9	85.7	85.7	85.7	85.7	85.1	85.7
02:00	85.7	87.7	87.7	87.7	87.7	86.0	87.7
03:00	87.7	85.5	85.5	85.5	85.5	84.5	85.5
04:00	85.5	71.2	71.2	71.2	71.2	69.1	71.2
05:00	71.1	60.6	60.6	60.6	60.6	59.3	60.6
06:00	60.6	55.7	55.7	55.7	55.7	55.7	55.8
07:00	55.7	46.3	46.4	46.4	46.4	46.5	46.4
08:00	46.3	41.9	42.0	42.0	41.3	42.2	42.1
09:00	41.9	36.5	36.7	36.6	36.3	36.7	36.8
10:00	36.5	27.9	28.2	28.0	28.1	28.0	28.3
11:00	27.9	29.6	30.0	29.7	30.0	29.3	30.8
12:00	29.6	27.8	28.4	28.0	28.4	27.4	28.9
13:00	27.9	40.6	41.3	40.8	41.5	39.5	41.9
14:00	40.6	39.5	40.3	39.8	40.5	38.6	40.8
15:00	39.6	41.5	42.1	41.8	42.4	40.7	42.7
16:00	49.7	49.7	50.2	50.1	50.6	48.9	50.9
17:00	45.7	45.7	46.1	46.1	46.4	45.6	46.6
18:00	64.7	64.7	65.0	64.9	65.1	63.9	65.4
19:00	53.9	53.9	54.1	54.0	54.1	53.4	54.3
20:00	50.8	50.8	50.9	50.9	51.0	50.5	51.1
21:00	49.3	49.3	49.4	49.4	49.4	49.1	49.5
22:00	52.6	50.4	50.5	50.5	50.5	50.2	50.5
23:00	49.1	52.6	52.6	52.6	52.6	52.4	52.8

Los escenarios CB-2-A y CB-2-B se confirman, incluso en invierno, como los de mayor estabilidad higrotérmica, con una variación diurna mínima que oscila entre el 41.3% (14:00 h) y el 55.0% (nocturno). Esta performance óptima se evidencia al compararla con las configuraciones CB-1-A y CB-1-B, las cuales, si bien muestran una notable estabilidad con valores entre 32.1% y 54.5%, presentan una fluctuación ligeramente mayor. Los datos consolidan a los resultados del escenario CB-2-A como los más eficaces en la atenuación de la amplitud de la oscilación diaria de la humedad relativa, manteniendo condiciones ambientales considerablemente más constantes, como se visualiza en la Figura 61.

Figura 61.  
 Humedad Relativa registrada en el Receptor 1, el 23/02/2024 en el Fracc. Pedregal Playitas



Se observa un patrón claro donde las estrategias de alto albedo y vegetación producen aumentos en la humedad relativa, especialmente durante la temporada de invierno. El bajo albedo (CB-B) tiene un efecto neutro o de ligero aumento en la humedad. La vegetación combinada con alto albedo (CB-1-A, CB-2-A) muestra los mejores resultados, confirmando que la evapotranspiración de los árboles y la reflectividad del pavimento crean un microclima más húmedo y estable durante ambas temporadas del año. Los resultados de la Tabla 44 evidencian que los escenarios CB-1-A y CB-2-A produjeron los mayores incrementos en humedad relativa, con un aumento de 1.0 % en verano y hasta 0.8 % en invierno respecto al caso base. Este comportamiento coincide con lo observado en el Fracc. del Sol, confirmando que la introducción de vegetación es el factor que más contribuye a elevar la humedad en el ambiente urbano. En comparación con estudios como el de Salvati et al. (2022) y Pigliautile et al. (2020), que destacan la importancia de la sombra en la mitigación térmica, los resultados del Pedregal Playitas muestran que incluso aumentos menores en humedad relativa son

suficientes para mejorar la percepción de confort. Además, la combinación de árboles con pavimentos claros se revela como la opción más eficiente, ya que los escenarios con pavimento de bajo albedo no solo no generaron mejoras, sino que en algunos casos redujeron ligeramente la humedad. Esto refuerza la idea de que la estrategia aislada de materiales oscuros es contra productiva, tal como ya lo advierten los autores internacionales.

Tabla 44.

Aumento o disminución de la Humedad Relativa (%) promedio en comparación del Caso Base con los Receptores 6 y 7 del Fracc. Pedregal Playitas

Fraccionamiento Pedregal Playitas - Humedad Relativa (%)							
Escenario	Receptor 4 (18/09/2023)	Receptor 4 (23/02/2024)	Receptor 1 (18/09/2023)	Receptor 1 (23/02/2024)			
CB-B	-0.15	0.68	0.05	0			
CB-A	0.93	1.12	0.35	0			
CB-1-B	0.05	0.87	0.1	0.03			
CB-1-A	1.12	1.42	0.45	0.08			
CB-2-B	0.07	0.89	0.1	0.03			
CB-2-A	1.35	1.57	0.5	0.1			

#### 4.2.7. Relación entre el LAI y la reducción de la temperatura del aire

El análisis de la variable Índice de Área Foliar (LAI) permitió identificar su influencia directa sobre la temperatura del aire a nivel peatonal (1.50 m de altura). Además, se observó que los árboles con mayor densidad foliar (LAI alto) generan una reducción térmica más significativa durante las horas de máxima radiación solar.

En ambos fraccionamientos analizados, la temperatura promedio del aire disminuyó entre 0.27 °C y 0.85 °C al incrementar el LAI de 3.0 a 6.0 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, evidenciando una correlación inversa entre densidad foliar y temperatura del aire. Este comportamiento confirma que el factor de sombreado asociado al LAI actúa como un mecanismo de mitigación microclimática, al reducir la radiación directa y favorecer el enfriamiento del entorno inmediato.

Se observó además que el efecto de sombreado es más pronunciado en las horas diurnas (de 12:00 a 15:00 h), con una recuperación térmica más lenta durante el atardecer. Estas variaciones respaldan el papel del LAI como indicador del desempeño

térmico del entorno exterior, especialmente en climas mediterráneos donde la radiación solar es el principal factor de ganancia térmica.

Los modelos de simulación donde se estableció solo una estrategia de mitigación, demostraron que las ubicaciones y arreglos de los árboles pueden modificar los microclimas exteriores. Los resultados de la investigación reafirman la frase expuesta por Santamouris et al. (2018) "El árbol correcto, en el lugar correcto", ya que, dependiendo de la configuración, es decir la ubicación y el arreglo (individual o agrupado) varía la efectividad de mitigación de hasta 1.5 °C, afirmando que agregar más vegetación no es equivalente a una menor disminución en puntos estratégicos o críticos (áreas con mayor temperatura) dentro de los fraccionamientos. A diferencia de los escenarios con árboles de sombreado, donde fueron simulados distintos valores de albedo en los pavimentos, entre mayor valor, mayor disminución de la temperatura, debido a las menores ganancias de energía durante el día, principalmente una mitigación de hasta 2.5°C a escala peatonal en temporada de verano, coincidiendo con Ghenai et al. (2023). Desde la fase de trabajo de campo, se observó que sellar los pavimentos con materiales de colores claros aumenta la reflectancia solar y reduce la temperatura de la superficie, cuestión por la que se esperaba tal resultado.

#### ***4.2.8. Relación entre el albedo de las superficies y el desempeño térmico exterior***

En cuanto a la variable albedo de las superficies, los escenarios simulados con pavimentos de alto albedo ( $\alpha = 0.50$ ) presentaron reducciones promedio de temperatura del aire de hasta 0.85 °C respecto a los pavimentos convencionales ( $\alpha = 0.25-0.30$ ).

Los resultados confirman que el aumento de la reflectancia solar reduce la absorción de radiación de onda corta y, por tanto, el almacenamiento de calor sensible en la superficie. No obstante, se observó que el efecto enfriador del albedo disminuye en zonas sombreadas, debido a que la radiación directa ya ha sido interceptada por la vegetación.

En consecuencia, el albedo contribuye principalmente al enfriamiento de áreas expuestas (sin cobertura arbórea), mientras que su efecto combinado con la vegetación debe evaluarse en función del balance radiativo y no de manera aislada.

#### ***4.2.9. Efectos de enfriamiento a partir de las combinaciones de LAI de la vegetación y albedo de las superficies***

La comparación de los escenarios simulados evidencia que la combinación de vegetación con alto LAI y pavimentos de alto albedo alcanza las mayores reducciones térmicas. El escenario CB-2-A (LAI= 6.0 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) mostró una disminución promedio de hasta 3.4 °C en verano y 1.5 °C en invierno respecto al caso base, lo que confirma un efecto sinérgico entre ambas estrategias. El análisis cruzado entre LAI y albedo indica que el albedo tiene mayor impacto en áreas abiertas o con baja densidad vegetal; y que el LAI presenta una respuesta más estable ante variaciones estacionales. Su combinación optimiza el desempeño térmico del entorno exterior, reduciendo la temperatura del aire y mejorando el confort térmico urbano.

En los escenarios CB-2-B para ambos fraccionamientos, al utilizar agrupaciones de dos árboles con la corona traslapada, se observó un aumento de los valores en temporada de verano, donde se busca disminución. Este efecto se le atribuye a la obstrucción del viento y la disminución de la velocidad m/s. Cabe mencionar que, al revisar los mapas térmicos, en la superficie ocupada por los árboles y sus áreas circundantes inmediatas, se presentan temperaturas más bajas en todos los escenarios.

Los resultados anteriores refuerzan lo mencionado en la literatura de casos en climas mediterráneos donde la combinación de albedo alto y vegetación es más efectiva que una sola estrategia. Tsoka et al. (2017) y Speak et al. (2020), reportan reducciones de 2–4 °C en Grecia e Italia bajo configuraciones similares. Los resultados difieren en contextos con climas tropicales, como el de Tan et al. (2021) en Singapur o Mehrotra et al. (2021) en Mumbai, donde la vegetación reduce hasta 10 °C la temperatura superficial por evapotranspiración. Es decir que la estacionalidad mediterránea y la brisa marina limitan la magnitud del enfriamiento, pero confirman la consistencia direccional del efecto. En climas áridos o continentales como en el estudio de

Macintyre & Heaviside, (2019) en Ucrania, los pavimentos fríos tienen mayor efecto de enfriamiento que la vegetación, mientras que en el presente caso los árboles aportan un efecto mayor. De acuerdo con los hallazgos, en ambos fraccionamientos la combinación de árboles (2 cada 7.0 m) más un alto albedo en pavimentos fue el escenario más favorable, lo cual coincide con la evidencia de Salvati et al. (2022) y Pigliautile et al. (2020), quienes enfatizan que los materiales fríos por sí solos no garantizan confort térmico si no se combinan con sombra.

De noche e invierno, la combinación alto albedo + vegetación atenúa la amplitud higrotérmica diaria; no obstante, podría acentuar el enfriamiento en episodios fríos. Se recomiendan estrategias estacionales (especies caducifolias y/o recubrimientos con SRI seleccionados) para modular reflectancia y sombra sin comprometer el confort invernal.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En la actualidad existe una creciente urbanización y con ella el desarrollo de infraestructura para atender la necesidad de interconectividad y transporte de los habitantes, como lo son los pavimentos, que según la investigación de Sankar et al., (2021), ocupan el 38-40% de la cobertura del suelo urbano, y el 75-80% de los pavimentos tienen superficies asfálticas con exposición directa al Sol. Este remplazo de las superficies naturales por materiales que absorben el calor, son conductores térmicos y almacenan mucho calor, ha dado lugar a la formación de la UHI, como se menciona en secciones anteriores. Razón por la que en este trabajo se explora el diseño de distribución de patrones de plantación de árboles en aceras y el albedo en pavimentos para áreas residenciales en función de mitigar la UHI, en la ciudad de Ensenada, B.C. El experimento se llevó a cabo a partir de la simulación de las condiciones térmicas de distintos escenarios en el software ENVI-met, que incluyen configuraciones de vegetación de árboles individuales y agrupados, además de pavimentos con diferente albedo.

En relación con las simulaciones realizadas, se observó una disminución significativa de la temperatura del aire durante la temporada de verano. Durante la temporada de invierno, en los escenarios resultó eficiente colocar estrategias individuales, teniendo en cuenta que se busca disminuir el efecto UHI sin afectar el confort térmico de los habitantes. En la hora cálida (14:00 h) se mantuvieron las condiciones de temperatura del aire, con variaciones de 0.1 °C abajo en todos los escenarios y un promedio de 0.2 °C, en comparación con el CB. En el caso de los escenarios con árboles de sombreado, este resultado se debe a que los árboles de hoja perenne mantienen una cubierta vegetal más densa especialmente en invierno en comparación con los árboles de hoja caduca, lo que da como resultado una reducción más extensa e intensa de la temperatura del aire (Chen et al., 2025). En el caso de los pavimentos, también reflejan la irradiación solar hacia los edificios adyacentes durante el invierno, un proceso que puede ayudar al calentamiento térmico de los edificios (Qin, 2015). Si bien en la presente investigación no se analizaron específicamente los efectos de la radiación reflejada sobre las fachadas, su consideración resulta relevante para futuros estudios, ya que podría complementar la comprensión de los beneficios estacionales asociados a los materiales de alto albedo.

Por otra parte, en todos los escenarios, en ambos fraccionamientos simulados fue notable la disminución de la temperatura en ambas temporadas al aplicar una combinación de estrategias de mitigación. Los resultados señalan que la incorporación de agrupaciones de dos árboles resulta efectiva para disminuir la temperatura del aire únicamente cuando se combina con un pavimento de alto albedo (0.50), correspondiente a superficies claras de pavimento frío con elevada reflectancia solar, en contraste con el pavimento convencional de bajo albedo (0.30), asociado al asfalto oscuro de uso común en vialidades urbanas. De manera individual, la aplicación del arbolado sin la mejora del pavimento tiende a generar un efecto contrario, lo que confirma la necesidad de integrar ambas estrategias de forma conjunta.

Asimismo, diversas investigaciones, mencionan que múltiples “puntos fríos” individuales con arreglos de árboles efectivos en el vecindario crean un vecindario más fresco en general por ejemplo, el estudio de Zhao et al. (2018), Zhang, et al. (2020) y Chen et al. (2021), donde en la simulación de árboles de manera dispersa exhibieron mejores efectos de enfriamiento que los árboles en el caso de cobertura. La comparación entre escenarios muestra la importancia de disponer árboles de sombra residenciales, además de dar un panorama sobre un número óptimo de árboles a utilizar para conseguir un resultado eficaz. Por otro lado, teniendo en cuenta los costos de mantenimiento, es importante maximizar los beneficios con un número limitado de árboles, como lo es el caso de ciudades donde la disponibilidad de agua es limitada, como es el caso de la ciudad de Ensenada donde existe una sobreexplotación de los yacimientos donde se abastece a la población, como se comenta en la investigación de Elizondo y Mendoza-Espinosa (2020).

Por otra parte, Salvati et al. (2022), señalan que reducir la absorción solar de los materiales tiene un efecto mitigador sobre la temperatura del aire, sin embargo, aumentar la reflectancia de las carreteras puede tener un impacto perjudicial en el microclima a nivel de calle debido al aumento de la radiación reflejada hacia los peatones. Por lo que se deben tomar precauciones antes de adoptar esta estrategia a gran escala. Middel et al. (2020) sugieren que aumentar solo la reflectividad no promueve las actividades al aire libre para lograr resultados positivos en la salud; y que la carga de calor de los peatones en las primeras horas de la tarde puede ser

ligeramente mayor en las aceras por dónde camina la gente si la carretera no está separada por un retranqueo con vegetación.

En síntesis, los resultados indican que un revestimiento de mayor albedo no puede sustituir los mecanismos de regulación del microclima que dispone la vegetación, en especial los que otorga el sombreado, que reduce la exposición de los peatones al calor. Por ello, se sugiere priorizar la incorporación de árboles y áreas verdes en el diseño urbano, combinando pavimentos de alto albedo con vegetación para maximizar el confort térmico en espacios públicos.

La hipótesis de la investigación fue comprobada, las alteraciones microclimáticas que la urbanización provoca no sólo afectan los espacios interiores de los edificios, sino que impactan en las superficies exteriores. A través de los resultados del presente estudio, se muestra que la combinación entre un material pavimento con un albedo mayor al de los convencionales (0.3) en la superficie urbana y árboles de sombreado con un LAI entre 3.0 y 6.0  $m^2/m^2$ , traerán consigo un efecto de enfriamiento que, a su vez, ayudara a mitigar la isla de calor del área de estudio, representando una disminución en la temperatura del aire y de las superficies en los alrededores inmediatos. Como se mencionó anteriormente, el enfriamiento no se presentó en todas las horas, si no en ciertos períodos que varían entre los escenarios en ambas temporadas.

De acuerdo con los objetivos planteados y la pregunta de investigación ¿Qué combinación del parámetro de vegetación LAI y la propiedad superficial de albedo resulta más eficaz para mitigar la isla de calor urbana en climas mediterráneos durante las temporadas de verano e invierno a nivel microclima urbano?; la comparación entre diferentes ubicaciones, número de árboles y albedo del pavimento del presente estudio, revela que para maximizar los beneficios de enfriamiento, se sugiere utilizar una combinación de estrategias de mitigación, el utilizar un mayor albedo potencia el enfriamiento de los arreglos de dos árboles individuales a 7.0 m de distancia uno de otro, como se muestra en el CB-2-A en temporada de verano e invierno. La especie *Cupressus forbesii* presentó las características ideales, como el LAI y las dimensiones

adecuadas para ambos fraccionamientos, proporcionando un sombreado constante sin interferir con la circulación.

En este sentido, los hallazgos obtenidos permitieron establecer una regla de diseño urbano adaptativo que puede orientar intervenciones futuras en contextos mediterráneos como Ensenada: Para veranos con temperaturas máximas entre 29 °C y 35 °C, la combinación óptima para mitigar el calentamiento superficial y atmosférico corresponde a un Índice de Área Foliar (LAI) entre 3.0 y 6.0 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> y superficies de pavimento con albedo  $\geq 0.50$ . Esta configuración, con dos árboles separados cada 7.0 m por módulo, permite lograr reducciones de temperatura del aire de hasta 3.4 °C durante el verano y 1.5 °C en invierno, manteniendo condiciones de estabilidad higrotérmica y favoreciendo el confort térmico a escala peatonal.

Finalmente, los resultados de este trabajo abren distintas líneas de investigación futura para optimizar las estrategias de mitigación de UHI en contextos mediterráneos. Es fundamental extender las simulaciones a otras Áreas Climáticas Locales (LCZ) dentro de la ciudad, así como a las estaciones de transición (primavera y otoño), para obtener una comprensión integral del rendimiento microclimático a lo largo de todo el año y bajo diferentes morfologías urbanas. Adicionalmente, se recomienda evaluar el desempeño de otras especies arbóreas con diferentes características (tipo de hoja, altura, LAI y dimensión de copa), ya que estos factores pueden alterar significativamente la efectividad del enfriamiento. Por lo anterior, se sugiere que futuros estudios cuantifiquen el impacto de la radiación solar reflejada por los pavimentos de alto albedo sobre las fachadas de los edificios y el confort térmico peatonal, un factor mencionado, pero no analizado en profundidad. Por lo que es crucial investigar la durabilidad y el envejecimiento de los materiales de pavimento frío bajo las condiciones climáticas locales, ya que la degradación de sus propiedades reflectantes con el tiempo podría comprometer su eficacia a largo plazo. La exploración de estrategias combinadas que incluyan el aumento del albedo en otras superficies, como muros y techos, también representa una vía prometedora para maximizar la mitigación de la UHI.

## REFERENCIAS

- Abdi, B., Hami, A., & Zarehaghi, D. (2020). Impact of small-scale tree planting patterns on outdoor cooling and thermal comfort. *Sustainable Cities and Society*, 56(February), 102085. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102085>
- Aflaki, A., Mirnezhad, M., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Omrany, H., Wang, Z. H., & Akbari, H. (2016). Urban heat island mitigation strategies: A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong. *Cities*, 62, 131–145. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.09.003>
- Agencia Estatal de Meteorología. (2019). LA RADIACIÓN SOLAR. *Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino*, 11(1), 1–14. Retrieved from [http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484\\_SISTEM\\_PEMBETUNGAN\\_TERPUSAT\\_STRATEGI\\_MELESTARI](http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI)
- Ahmadi Venhari, A., Tenpierik, M., & Taleghani, M. (2019). The role of sky view factor and urban street greenery in human thermal comfort and heat stress in a desert climate. *Journal of Arid Environments*, 166(April), 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.04.009>
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295–310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Akbari, Hashem, Menon, S., & Rosenfeld, A. (2009). Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO 2. *Climatic Change*, 94(3–4), 275–286. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9515-9>
- Alamán, A. (1968). Índices de confort. II. *Informes de La Construcción*, 20(198), 91–98. <https://doi.org/10.3989/ic.1968.v20.i198.3927>
- Alchapar, N. L., Correa, E. N., & Cantón, M. A. (2013). Influencia del envejecimiento de los materiales en su desempeño térmico. *Rev. LatinAm. Metal. Mat.*, 33(2), 282–291.
- ANSI/ASHRAE. (2017). ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 : Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *ASHRAE Inc.*, 2017, 66. <https://doi.org/ISSN1041-2336>
- Arapakis, P. (2019). *The use of 3D digital models in microclimatic studies: First steps in coupling CityGML with ENVI-met.*
- Arghavani, S., Malakooti, H., & Ali Akbari Bidokhti, A. A. (2020). Numerical assessment of the urban green space scenarios on urban heat island and thermal comfort level in Tehran Metropolis. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121183. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121183>
- Armson, D., Stringer, P., & Ennos, A. R. (2012). The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry and Urban Greening*, 11(3), 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.05.002>

- Azcarate Mutiloa, I., Acero Alejandro, J. Á., & Arrizabalaga Ibarzabal, J. (2019). Metodología de selección de especies de arbolado para el sombreado urbano en la parte oriental de la cornisa Cantábrica. *Informes de La Construcción*, 71(556), 322. <https://doi.org/10.3989/ic.65135>
- Badaro-Saliba, N., Adjizian-Gerard, J., Zaarour, R., & Najjar, G. (2021). LCZ scheme for assessing Urban Heat Island intensity in a complex urban area (Beirut, Lebanon). *Urban Climate*, 37(April), 100846. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100846>
- Barrera-Ríos, F., Ramírez-León, S., Sánchez-Ángeles, E., Pérez-Trujillo, J., & Cruz-Álvarez, A. (2021). Heat transfer mechanisms. *TEPEXI Boletín Científico de La Escuela Superior Tepeji Del Río*, 8(16), 246–291. <https://doi.org/10.1533/9781845698423.246>
- Barros Moreira de Carvalho, G., & Bueno da Silva, L. (2023). The microclimate implications of urban form applying computer simulation: systematic literature review. In *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03737-5>
- Bartesaghi Koc, C., Osmond, P., & Peters, A. (2018). Evaluating the cooling effects of green infrastructure: A systematic review of methods, indicators and data sources. *Solar Energy*, 166(April), 486–508. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.008>
- Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., ... Havenith, G. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>
- Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling and Software*, 13(3–4), 373–384. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)
- Byrne, L. B., Bruns, M. A., & Kim, K. C. (2008). Ecosystem properties of urban land covers at the aboveground-belowground interface. *Ecosystems*, 11(7), 1065–1077. <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9179-3>
- CARRASCAL SIERRA, E. (2015). *Universidad de Baja California*. 14.
- CESAR. (2018). *El espectro electromagnético*. 1–8. Retrieved from [http://cesar.esa.int/upload/201807/espectro\\_electromagnético\\_booklet.pdf](http://cesar.esa.int/upload/201807/espectro_electromagnético_booklet.pdf)
- Chávez del Valle, F. J. (2002). Zona variable de confort térmico (Vol. 3).
- Chen, H., Liu, R., Wang, Y., & Peng, Z. (2025). Assessing seasonal thermal environment of two tree species: Integrating modeling and in-situ data in hot-summer and cold-winter climates. *Building and Environment*, 269(December 2024), 112394. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112394>
- Chen, T., Yang, H., Chen, G., Lam, C. K. C., Hantg, J., Wang, X., ... Ling, H. (2021). Integrated impacts of tree planting and aspect ratios on thermal environment in street canyons by scaled outdoor experiments. *Science of the Total Environment*, 764. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142920>

- Choudhury, D., Das, A., & Das, M. (2021). Investigating thermal behavior pattern (TBP) of local climatic zones (LCZs): A study on industrial cities of Asansol-Durgapur development area (ADDA), eastern India. *Urban Climate*, 35(December 2020), 100727. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100727>
- Clocchiatti, A., & Catelan, M. (2018). Radiación térmica. *Radiación y Materia En Astrofísica*, 57–90. <https://doi.org/10.2307/j.ctt20fw80h.6>
- Daros, W. R. (2002). ¿Qué es un marco teórico? *Enfoques*, XIV, número, 73–112.
- de Abreu-Harbich, L. V., Labaki, L. C., & Matzarakis, A. (2015). Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landscape and Urban Planning*, 138, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.008>
- Debbage, N., & Shepherd, J. M. (2015). The urban heat island effect and city contiguity. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 181–194. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.08.002>
- Demuzere, M., Kittner, J., & Bechtel, B. (2021). LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. *Frontiers in Environmental Science*, 9(April). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.637455>
- Detommaso, M., Costanzo, V., & Nocera, F. (2021). Application of weather data morphing for calibration of urban ENVI-met microclimate models. Results and critical issues. *Urban Climate*, 38(May), 100895. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100895>
- Dewan, A., Kiselev, G., Botje, D., Mahmud, G. I., Bhuiyan, M. H., & Hassan, Q. K. (2021). Surface urban heat island intensity in five major cities of Bangladesh: patterns, drivers and trends. *Sustainable Cities and Society*, 102926. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102926>
- Eckmann, T., Morach, A., Hamilton, M., Walker, J., Simpson, L., Lower, S., ... Kessi, A. (2018). Measuring and modeling microclimate impacts of *Sequoiadendron giganteum*. *Sustainable Cities and Society*, 38(December 2017), 509–525. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.12.028>
- Elizondo, L. S., & Mendoza-Espinosa, L. G. (2020). An analysis of water scarcity in a drought prone city: The case of Ensenada, Baja California, Mexico. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 11(2), 1–55. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-01>
- Erell, E. (2008). The application of urban climate research in the design of cities. *Advances in Building Energy Research*, 2(1), 95–121. <https://doi.org/10.3763/aber.2008.0204>
- EVIDENT. (n.d.). Introducción a la reflexión de la luz. Retrieved December 18, 2024, from <https://www.olympus-lifescience.com/es/microscope-resource/primer/lightandcolor/reflectionintro/>
- Fahmy, M., Ibrahim, Y., Hanafi, E., & Barakat, M. (2018). Would LEED-UHI greenery and high albedo strategies mitigate climate change at neighborhood scale in Cairo, Egypt? *Building Simulation*, 11(6), 1273–1288. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0463-7>

- Failache, H. (2010). *Elementos de Transferencia de Calor*.
- Fischer, E., Detommaso, M., Martinico, F., Nocera, F., & Costanzo, V. (2022). A risk index for assessing heat stress mitigation strategies. An application in the Mediterranean context. *Journal of Cleaner Production*, 346(March), 131210. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131210>
- Forouzandeh, A. (2021). Prediction of surface temperature of building surrounding envelopes using holistic microclimate ENVI-met model. *Sustainable Cities and Society*, 70(March), 102878. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102878>
- Gál, C. V., & Kántor, N. (2020). Modeling mean radiant temperature in outdoor spaces, A comparative numerical simulation and validation study. *Urban Climate*, 32(December 2019), 100571. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100571>
- Gallardo, V., Ruiz, M<sup>a</sup> A., Parera, A. y Hernández, A. (2000). Radiaciones solares: Tipos y efectos. *Ars Pharmaceutica*, 41(2), 167–176.
- García, L. (2018). Islas de calor, un fenómeno de las ciudades - Ciencia UNAM. *Dgcunam*, 1–7. Retrieved from <http://ciencia.unam.mx/leer/779/islas-de-calor-un-fenomeno-de-las-ciudades>
- Gatto, E., Ippolito, F., Rispoli, G., Carlo, O. S., Santiago, J. L., Aarrevaara, E., ... Buccolieri, R. (2021). Analysis of urban greening scenarios for improving outdoor thermal comfort in neighbourhoods of lecce (Southern Italy). *Climate*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/cli9070116>
- Ghenai, C., Rejeb, O., Sinclair, T., Almarzouqi, N., Alhanaee, N., & Rossi, F. (2023). Evaluation and thermal performance of cool pavement under desert weather conditions: Surface albedo enhancement and carbon emissions offset. *Case Studies in Construction Materials*, 18(August 2022), e01940. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01940>
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure. *Built Environment*, 33(1), 115–133. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>
- Hami, A., Abdi, B., Zarehaghi, D., & Maulan, S. Bin. (2019). Assessing the thermal comfort effects of green spaces: A systematic review of methods, parameters, and plants' attributes. *Sustainable Cities and Society*, 49(May), 101634. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101634>
- Hebbert, M., & Jankovic, V. (2013). Cities and Climate Change: The Precedents and Why They Matter. *Urban Studies*, 50(7), 1332–1347. <https://doi.org/10.1177/0042098013480970>
- Helletsgruber, C., Gillner, S., Gulyás, Á., Junker, R. R., Tanács, E., & Hof, A. (2020). Identifying tree traits for cooling urban heat islands—a cross-city empirical analysis. *Forests*, 11(10), 1–14. <https://doi.org/10.3390/f11101064>
- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). Metodología de la investigación: las tres rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. In *Mc Graw Hill* (Vol. 1).

- Hewitt, V., Mackres, E., & Shickman, K. (2014). Cool Policies for Cool Cities : Best Practices for Mitigating Urban Heat Islands in North American Cities. *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, (202), 131–145. Retrieved from <http://aceee.org/research-report/u1405>
- Hirose, T. (2005). Development of the Monsi-Saeki theory on canopy structure and function. *Annals of Botany*, 95(3), 483–494. <https://doi.org/10.1093/aob/mci047>
- INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010 BENITO JUÁREZ*.
- IPCC. (2023). Summary for Policymakers: Synthesis Report. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1–34.
- Jamei, E., Rajagopalan, P., Seyedmahmoudian, M., & Jamei, Y. (2016). Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1002–1017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.104>
- Katz, A. (1975). The determination of rubidium and strontium in silicates by flameless atomic-absorption spectroscopy. In *Chemical Geology* (Vol. 16). [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(75\)90087-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(75)90087-X)
- Kotharkar, R., Bagade, A., & Singh, P. R. (2020). A systematic approach for urban heat island mitigation strategies in critical local climate zones of an Indian city. *Urban Climate*, 34(August), 100701. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100701>
- Lai, D., Liu, W., Gan, T., Liu, K., & Chen, Q. (2019). A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Science of the Total Environment*, 661, 337–353. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.062>
- Li, Xiaoma, Zhou, Y., Yu, S., Jia, G., Li, H., & Li, W. (2019). Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings. *Energy*, 174, 407–419. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.183>
- Li, Xinlu, Lu, H., Yu, L., & Yang, K. (2018). Comparison of the spatial characteristics of four remotely sensed leaf area index products over China: Direct validation and relative uncertainties. *Remote Sensing*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/rs10010148>
- Litardo, J., Palme, M., Borbor-Cordova, M., Caiza, R., Macias, J., Hidalgo-Leon, R., & Soriano, G. (2020). Urban Heat Island intensity and buildings' energy needs in Duran, Ecuador: Simulation studies and proposal of mitigation strategies. *Sustainable Cities and Society*, 62(July), 102387. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102387>
- Liu, Z., Cheng, K. Y., He, Y., Jim, C. Y., Brown, R. D., Shi, Y., ... Ng, E. (2022). Microclimatic measurements in tropical cities: Systematic review and proposed guidelines. *Building and Environment*, 222(July), 109411. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109411>
- Ma, X., Fukuda, H., Zhou, D., & Wang, M. (2019). The evaluation of outdoor thermal

- sensation and outdoor energy efficiency of a commercial pedestrianized zone. *Energies*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/en12071324>
- Macintyre, H. L., & Heaviside, C. (2019). Potential benefits of cool roofs in reducing heat-related mortality during heatwaves in a European city. *Environment International*, 127(April), 430–441. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.065>
- Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Sabio-Ortega, A., & García-Cruz, A. (2015). Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 736–755. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>
- Mashhoodi, B. (2020). Land surface temperature and energy expenditures of households in the Netherlands: Winners and losers. *Urban Climate*, 34(January), 100678. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100678>
- Matzarakis, A., & Fröhlich, D. (2018). Influence of urban green on human thermal bioclimate - Application of thermal indices and micro-scale models. *Acta Horticulturae*, 1215, 1–9. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1215.1>
- Matzarakis, Andreas, Rutz, F., & Mayer, H. (2010). *Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model*. 131–139. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>
- Matzarakisa, A., & Fröhlich, D. (2018). Influence of urban green on human thermal bioclimate - Application of thermal indices and micro-scale models. *Acta Horticulturae*, 1215, 1–9. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1215.1>
- McRae, I., Freedman, F., Rivera, A., Li, X., Dou, J., Cruz, I., ... Bornstein, R. (2020). Integration of the WUDAPT, WRF, and ENVI-met models to simulate extreme daytime temperature mitigation strategies in San Jose, California. *Building and Environment*, 184(May), 107180. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107180>
- Mehrotra, S., Subramanian, D., Bardhan, R., & Jana, A. (2021). Effect of surface treatment and built form on thermal profile of open spaces: A case of Mumbai, India. *Urban Climate*, 35(October 2020), 100736. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100736>
- Middel, A., Turner, V. K., Schneider, F. A., Zhang, Y., & Stiller, M. (2020). Solar reflective pavements-A policy panacea to heat mitigation? *Environmental Research Letters*, 15(6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab87d4>
- Moody, M. J., Bailey, B. N., Pardyjak, E. R., Mahaffee, W. F., & Stoll, R. (2021). Adaptation and validation of a voxel based energy transport model for conifer species. *Urban Climate*, 39(April), 100967. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100967>
- Mostofi, N., Aghamohammadi Zanjirabad, H., Vafaeinejad, A., Ramezani, M., & Hemmasi, A. (2021). Developing an SDSS for optimal sustainable roof covering planning based on UHI variation at neighborhood scale. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09151-6>
- Nafarrate-Hecht, A. C. (2017). *Estimación directa e indirecta del índice de área foliar*

(IAF) y su modelación con Lidar en un bosque tropical seco de Yucatán. 80.

- Nasrollahi, N., Ghosouri, A., Khodakarami, J., & Taleghani, M. (2020). Heat-Mitigation Strategies to Improve Pedestrian Thermal Comfort in Urban Environments: A Review. *Sustainability*, 12(23), 10000. <https://doi.org/10.3390/su122310000>
- Nuruzzaman, M. (2015). Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3(2), 67. <https://doi.org/10.11648/j.ijema.20150302.15>
- Nwakaire, C. M., Onn, C. C., Yap, S. P., Yuen, C. W., & Onodagu, P. D. (2020a). Urban Heat Island Studies with emphasis on urban pavements: A review. *Sustainable Cities and Society*, 63(May), 102476. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102476>
- Nwakaire, C. M., Onn, C. C., Yap, S. P., Yuen, C. W., & Onodagu, P. D. (2020b). Urban Heat Island Studies with emphasis on urban pavements: A review. *Sustainable Cities and Society*, 63(August), 102476. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102476>
- Oke, T. R. (1973). CITY SIZE AND THE URBAN HEAT ISLAND. *Atmospheric Environment*, 7(4), 769–779. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island (Symons Memorial Lecture, 20 May 1980). *Quarterly Journal, Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24.
- Omidvar, A., & Kim, J. (2020). Modification of sweat evaporative heat loss in the PMV/PPD model to improve thermal comfort prediction in warm climates. *Building and Environment*, 176(March), 106868. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106868>
- Ouali, K., El Harrouni, K., Abidi, M. L., & Diab, Y. (2020). Analysis of Open Urban Design as a tool for pedestrian thermal comfort enhancement in Moroccan climate. *Journal of Building Engineering*, 28, 101042. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101042>
- Ouyang, W., Morakinyo, T. E., Ren, C., & Ng, E. (2020). The cooling efficiency of variable greenery coverage ratios in different urban densities: A study in a subtropical climate. *Building and Environment*, 174(February), 106772. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106772>
- Park, S., Tuller, S. E., & Jo, M. (2014). Application of Universal Thermal Climate Index (UTCI) for microclimatic analysis in urban thermal environments. *Landscape and Urban Planning*, 125, 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.02.014>
- Peng, W., Wang, R., Duan, J., Gao, W., & Fan, Z. (2022). Surface and canopy urban heat islands: Does urban morphology result in the spatiotemporal differences? *Urban Climate*, 42(February), 101136. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101136>
- Perini, K., Chokhachian, A., & Auer, T. (2018). Green streets to enhance outdoor comfort. In *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812150-4.00011-2>

- Pigliautile, I., Pisello, A. L., & Bou-Zeid, E. (2020). Humans in the city: Representing outdoor thermal comfort in urban canopy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133(January), 110103. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110103>
- Qin, Y. (2015). Urban canyon albedo and its implication on the use of reflective cool pavements. *Energy and Buildings*, 96, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.005>
- Rimal, B., Zhang, L., Keshtkar, H., Haack, B. N., Rijal, S., & Zhang, P. (2018). Land use/land cover dynamics and modeling of urban land expansion by the integration of cellular automata and markov chain. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/ijgi7040154>
- Rosso, F., Mannucci, S., Morganti, M., Mariani, S., Cecere, C., & Ferrero, M. (2019). The effect of Sustainable Urban Drainage Systems on outdoor comfort and runoff. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012023>
- Royé, D., Martí Ezpeleta, A., & López Casal, R. (2011). La aplicación del Índice Bioclimático PET al noroeste de España para la delimitación de espacios con estrés térmico. *Congreso Regional de La UGI*, (January 2016).
- Rui, L., Buccolieri, R., Gao, Z., Gatto, E., & Ding, W. (2019). Study of the effect of green quantity and structure on thermal comfort and air quality in an urban-like residential district by ENVI-met modelling. *Building Simulation*, 12(2), 183–194. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0498-9>
- Sabrin, S., Karimi, M., Nazari, R., Pratt, J., & Bryk, J. (2021). Effects of Different Urban-Vegetation Morphology on the Canopy-level Thermal Comfort and the Cooling Benefits of Shade Trees: Case-study in Philadelphia. *Sustainable Cities and Society*, 66(December 2020), 102684. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102684>
- Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., & de Lieto Vollaro, A. (2016). Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. *Sustainable Cities and Society*, 26, 318–343. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.07.005>
- Salata, F., Golasi, I., Vollaro, A. D. L., & Vollaro, R. D. L. (2015). How high albedo and traditional buildings' materials and vegetation affect the quality of urban microclimate. A case study. *Energy and Buildings*, 99, 32–49. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.010>
- Salvati, A., Kolokotroni, M., Kotopouleas, A., Watkins, R., Giridharan, R., & Nikolopoulou, M. (2022). Impact of reflective materials on urban canyon albedo, outdoor and indoor microclimates. *Building and Environment*, 207(PB), 108459. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108459>
- Sankar Cheela, V. R., John, M., Biswas, W., & Sarker, P. (2021). Combating urban heat island effect—a review of reflective pavements and tree shading strategies. *Buildings*, 11(3), 1–21. <https://doi.org/10.3390/buildings11030093>
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban

- environments. *Solar Energy*, 103, 682–703.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Santamouris, M., Ban-Weiss, G., Osmond, P., Paolini, R., Synnefa, A., Cartalis, C., ... Kolokotsa, D. (2018). Progress in Urban Greenery Mitigation Science – Assessment Methodologies Advanced Technologies and Impact on Cities. *Journal of Civil Engineering and Management*, 24(8), 638–671.  
<https://doi.org/10.3846/jcem.2018.6604>
- Santamouris, M., Ding, L., Fiorito, F., Oldfield, P., Osmond, P., Paolini, R., ... Synnefa, A. (2017). Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*, 154, 14–33.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.006>
- Santos, T., Miguel, P. S., & Banda, P. (2019). Medio físico y natural. *Vamos San Nicolás de Los Garza*, 316, 400.
- Schneider, F. A., Ortiz, J. C., Vanos, J. K., Sailor, D. J., & Middel, A. (2023). Evidence-based guidance on reflective pavement for urban heat mitigation in Arizona. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36972-5>
- Secretaria de Protección al Ambiente. (2012). *Programa Estatal De Acción Ante El Cambio Climatico De Baja California*. Retrieved from [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/170327/2013\\_hgo\\_peacc\\_parte\\_1.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/170327/2013_hgo_peacc_parte_1.pdf)
- Seyndic S., Z. M. (2017). *No Brillan, Reflejan*. 42–46.
- Sharafkhani, R., Khanjani, N., Bakhtiari, B., Jahani, Y., & Sadegh Tabrizi, J. (2018). Physiological Equivalent Temperature Index and mortality in Tabriz (The northwest of Iran). *Journal of Thermal Biology*, 71(August 2017), 195–201.  
<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.11.012>
- Soma, M., Pimont, F., & Dupuy, J. L. (2021). Sensitivity of voxel-based estimations of leaf area density with terrestrial LiDAR to vegetation structure and sampling limitations: A simulation experiment. *Remote Sensing of Environment*, 257(January), 112354. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112354>
- Speak, A., Montagnani, L., Wellstein, C., & Zerbe, S. (2020). The influence of tree traits on urban ground surface shade cooling. *Landscape and Urban Planning*, 197(July 2019), 103748. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103748>
- Srivanit, M., & Jareemit, D. (2020). Modeling the influences of layouts of residential townhouses and tree-planting patterns on outdoor thermal comfort in Bangkok suburb. *Journal of Building Engineering*, 30, 101262.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101262>
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900.  
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and



- anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25(2), 99–103. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(96\)00999-1](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(96)00999-1)
- Taleghani, M. (2018). Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(June), 2011–2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.010>
- Tan, J. K. N., Belcher, R. N., Tan, H. T. W., Menz, S., & Schroepfer, T. (2021). The urban heat island mitigation potential of vegetation depends on local surface type and shade. *Urban Forestry & Urban Greening*, 62(April), 127128. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127128>
- Teshnehdel, S., Akbari, H., Di Giuseppe, E., & Brown, R. D. (2020). Effect of tree cover and tree species on microclimate and pedestrian comfort in a residential district in Iran. *Building and Environment*, 178(May), 106899. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106899>
- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., & van Heijst, G. J. F. (2017). A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(January), 1613–1640. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.248>
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, A., & Theodosiou, T. (2018a). Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. *Sustainable Cities and Society*, 43(April), 55–76. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.009>
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, A., & Theodosiou, T. (2018b). Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. *Sustainable Cities and Society*, 43(August), 55–76. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.009>
- Tsoka, Stella, Tsikaloudaki, K., & Theodosiou, T. (2017). Urban space's morphology and microclimatic analysis: A study for a typical urban district in the Mediterranean city of Thessaloniki, Greece. *Energy and Buildings*, 156, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.066>
- Tumini, I. (2012). *El microclima urbano en los espacios abiertos: estudio de casos en Madrid*. 385. Retrieved from <http://oa.upm.es/14893/>
- Vera, N. (2005). 6 Albedo. 53–70. Retrieved from <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/index.htm>
- Wang, Y., & Akbari, H. (2016). The effects of street tree planting on Urban Heat Island mitigation in Montreal. *Sustainable Cities and Society*, 27, 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.04.013>
- Wang, Y., Akbari, H., & Chen, B. (2016). Urban Geometry and Environmental Urban Policy Development. *Procedia Engineering*, 169, 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.038>
- Wang, Z. H. (2021). Compound environmental impact of urban mitigation strategies: Co-benefits, trade-offs, and unintended consequence. *Sustainable Cities and Society*, 75(August), 103284. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103284>

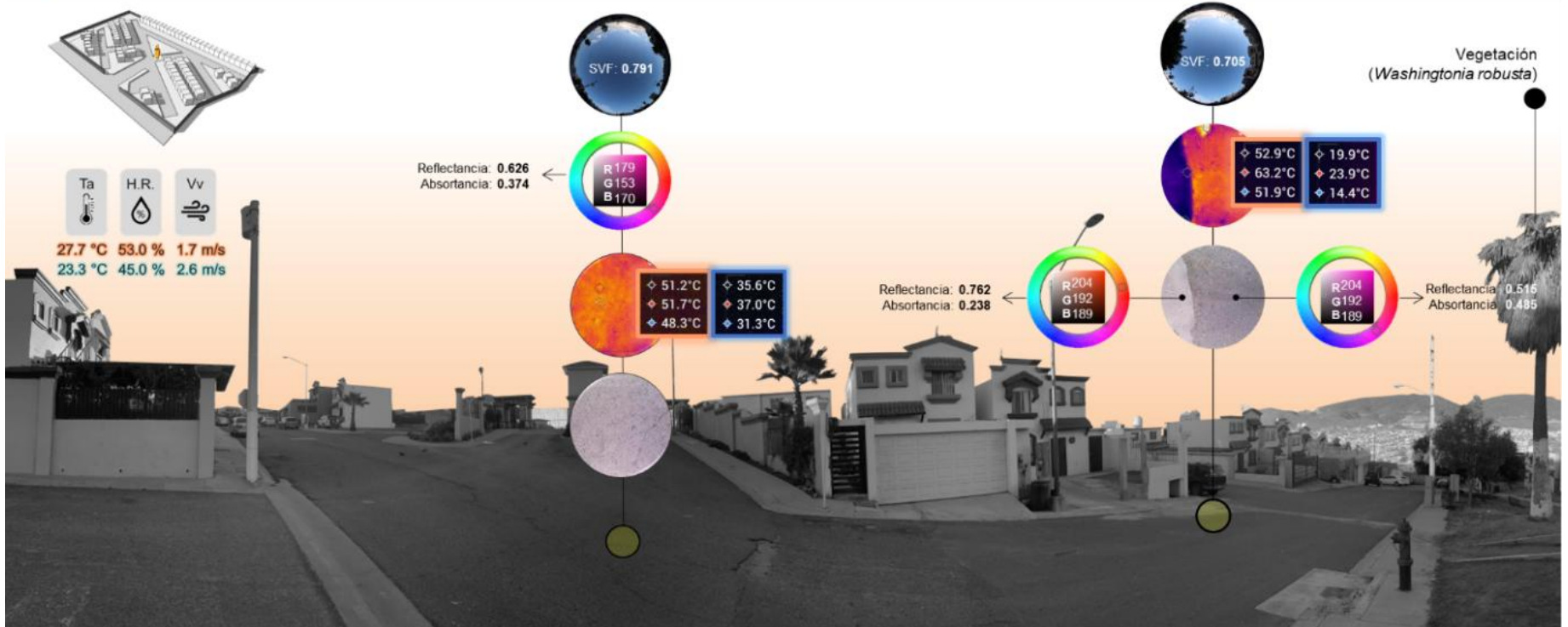
- WMO. (2008). *Guide to meteorological instruments and methods of observation*. (7th ed.). WMO.
- Wonorahardjo, S., Sutjahja, I. M., Mardiyati, Y., Andoni, H., Thomas, D., Achسانی, R. A., & Steven, S. (2020). Characterising thermal behaviour of buildings and its effect on urban heat island in tropical areas. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(1), 129–142. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00317-0>
- Wu, Z., Kong, F., Wang, Y., Sun, R., & Chen, L. (2016). The impact of greenspace on thermal comfort in a residential quarter of Beijing, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph13121217>
- Xu, X., AzariJafari, H., Gregory, J., Norford, L., & Kirchain, R. (2020). An integrated model for quantifying the impacts of pavement albedo and urban morphology on building energy demand. *Energy and Buildings*, 211, 109759. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109759>
- Yaghoobian, N., Kleissl, J., & Krayenhoff, E. S. (2010). Modeling the thermal effects of artificial turf on the urban environment. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(3), 332–345. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2198.1>
- Yahia, M. W., & Johansson, E. (2014). Landscape interventions in improving thermal comfort in the hot dry city of Damascus, Syria-The example of residential spaces with detached buildings. *Landscape and Urban Planning*, 125, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.014>
- Yu, Z., Zhang, J., & Yang, G. (2021). How to build a heat network to alleviate surface heat island effect? *Sustainable Cities and Society*, 74(April), 103135. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103135>
- Yunus A., Ç. (2007). Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico. In S. A. D. C. . McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES (Ed.), *Biotechnology Letters* (3rd ed.). México, D.F.
- Zhang, J., Gou, Z., Zhang, F., & Shutter, L. (2020). A study of tree crown characteristics and their cooling effects in a subtropical city of Australia. *Ecological Engineering*, 158(May), 106027. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106027>
- Zhao, Q., Sailor, D. J., & Wentz, E. A. (2018). Impact of tree locations and arrangements on outdoor microclimates and human thermal comfort in an urban residential environment. *Urban Forestry and Urban Greening*, 32(March), 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.03.022>
- Zhou, H., Yu, W., Zhao, K., Shan, H., Zhou, S., Zhang, Y., ... Wei, S. (2024). Adaptive thermal comfort analysis in the elderly based on Fried frailty classification in residential buildings during summer. *Building and Environment*, 252(October 2023), 111262. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111262>

## APÉNDICE 1. Trabajo y medición en campo



Trabajo de campo y medición en Fraccionamiento del Sol


 **02/09/2023** (14:30 h a las 15:00 h)  
 **23/02/2024** (14:30 h a las 15:00 h)




Trabajo de campo y medición en Fraccionamiento del Sol



Trabajo de campo y medición en Fraccionamiento Pedregal Playitas

 **20/09/2023** (14:30 h a las 15:00 h)



 **23/02/2024** (14:30 h a las 15:00 h)






Trabajo de campo y medición en Fraccionamiento Pedregal Playitas



Trabajo de campo y medición en Fraccionamiento Pedregal Playitas

 **02/09/2023** (14:30 h a las 15:00 h)  
 **23/02/2024** (14:30 h a las 15:00 h)



 **Ta**  
 **H.R.**  
 **Vv**  
**27.7 °C** **53.0 %** **1.7 m/s**  
**23.3 °C** **45.0 %** **2.6 m/s**





---

**MARIA FERNANDA ARRIAGA OSUNA**  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, FACULTAD DE INGENIERIA, ARQUITECTURA Y DISEÑO  
NOVIEMBRE 2025